



DILATOMETRO AUDIBERT ARNU, AUTOMATIZACIÓN DE LA  
HERRAMIENTA POR MEDIO DE PC

RICARDO RUEDA SALAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELECTRÍCA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMÚNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2009



DILATOMETRO AUDIBERT-ARNU, AUTOMATIZACIÓN DE LA  
HERRAMIENTA POR MEDIO DE PC

RICARDO RUEDA SALAS

Código 2000856

Proyecto de Grado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Electrónico

Director

Msc. JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO- MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELECTRÍCA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2009

A mis padres y a mis hermanos  
por su colaboración y paciencia  
en la elaboración de este trabajo  
así como a lo largo de mi  
carrera.

A mis profesores y compañeros  
que hicieron posible la  
realización de este trabajo y de  
mi carrera.

Ricardo Rueda Salas

## TABLA DE CONTENIDO

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | DESCRIPCION DEL PROYECTO .....  | 2  |
| 1.1.   | <b>OBJETIVOS</b> .....  | 2  |
| 1.1.1. | Generales .....   | 2  |
| 1.1.2. | Específicos .....   | 2  |
| 1.2.   | <b>BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</b> .....                                     | 3  |
| 2.     | MARCO TEÓRICO .....   | 5  |
| 2.1.   | <b>DILATÓMETRO DE CARBÓN AUDIBERT-ARNU</b> .....                                | 5  |
| 2.1.1. | Dilatometría .....  | 5  |
| 2.1.2. | Dilatómetro Audibert-Arnu. ....   | 6  |
| 2.2.   | <b>CONCEPTOS DE TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES</b> .....                       | 9  |
| 2.2.1. | Imagen digital.....   | 9  |
| 2.2.2. | Propiedades de una imagen digitalizada.....                                     | 9  |
| 2.2.3. | Máscara de imagen.....  | 10 |
| 2.2.4. | Espacios de color .....   | 11 |
| 2.2.5. | Espacio de color HSL .....  | 11 |
| 2.3.   | <b>CONFIGURACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMAGENES</b> ..... | 12 |
| 2.3.1. | Configuración de un sistema de imágenes .....                                   | 12 |
| 2.3.2. | Conceptos del sistema de adquisición de imágenes.....                           | 14 |
| 2.3.3. | Calibración espacial .....  | 17 |
| 2.3.4. | Proceso de Calibración .....  | 18 |
| 2.3.5. | Sistema de coordenadas .....  | 19 |
| 2.3.6. | Algoritmos de calibración .....   | 20 |
| 2.4.   | <b>ANÁLISIS DE IMAGENES</b> .....   | 22 |
| 2.4.1. | Histograma .....  | 23 |
| 2.4.2. | Morfología de escala de grises .....  | 25 |
| 2.4.3. | Conceptos de morfología de escala de grises .....                               | 25 |
| 2.4.4. | Análisis <i>Blob</i> .....  | 27 |
| 3.     | DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DEL ANTERIOR PROYECTO .....                              | 32 |
| 3.1.   | <b>SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO</b> .....                              | 32 |
| 3.1.1. | Requerimientos de la aplicación .....   | 32 |
| 3.1.2. | Adquisición y tratamiento de imágenes .....                                     | 33 |
| 3.2.   | <b>CONTROL DE TEMPERATURA</b> .....   | 35 |
| 3.2.1. | Actuador.....   | 35 |
| 3.2.2. | Sensor .....  | 38 |
| 3.2.3. | Acondicionador .....  | 38 |
| 3.2.4. | Control.....  | 39 |
| 3.2.5. | Controlador.....  | 40 |
| 3.3.   | <b>SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS</b> .....                                    | 41 |
| 3.3.1. | Módulo analógico .....  | 41 |

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| 3.3.2.      | Módulo digital .....  | 42        |
| 3.3.3.      | Módulo de alimentación .....                                      | 43        |
| 4.          | ETAPAS DEL PROYECTO .....   | 45        |
| <b>4.1.</b> | <b>CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES</b> ..... | <b>45</b> |
| 4.1.1.      | Cámara .....  | 45        |
| 4.1.2.      | Lente.....  | 46        |
| 4.1.3.      | Tarjeta de video .....  | 47        |
| 4.1.4.      | Iluminación .....   | 48        |
| 4.1.5.      | Ambiente controlado para fotografía.....                          | 51        |
| <b>4.2.</b> | <b>ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES</b> .....                | <b>52</b> |
| 4.2.1.      | Adquisición .....   | 52        |
| 4.2.2.      | Calibración.....  | 53        |
| 4.2.3.      | Tratamiento digital de imágenes.....                              | 54        |
| 4.2.4.      | Segmentación y medición.....                                      | 55        |
| 4.2.5.      | Transformación de píxel a unidades del mundo real.....            | 58        |
| 4.2.6.      | Despliegue de las graficas.....                                   | 59        |
| <b>4.3.</b> | <b>INTERFACES GRAFICAS</b> .....                                  | <b>61</b> |
| 4.3.1.      | Interfaz principal .....  | 61        |
| 4.3.2.      | Interfaz de la configuración del sistema de adquisición.....      | 62        |
| 4.3.3.      | Interfaz grafica de calibración .....                             | 63        |
| 4.3.4.      | Interfaz de resultados .....                                      | 65        |
| <b>4.4.</b> | <b>Pruebas y Resultados</b> .....                                 | <b>67</b> |
| 4.4.1.      | Medición de distancia entre marcas.....                           | 67        |
| 4.4.2.      | Medición de perímetros.....                                       | 71        |
| 4.4.3.      | Movimiento de marcas en tiempo real.....                          | 74        |
| 4.4.4.      | Medición de desplazamiento en tiempo real.....                    | 76        |
| 5.          | OBSERVACIONES .....   | 78        |
| 6.          | CONCLUSIONES.....   | 80        |
| 7.          | RECOMENDACIONES .....   | 81        |
| 8.          | MANUAL DEL LABORATORISTA .....                                    | 86        |
| 8.1.        | Requerimientos del equipo .....                                   | 86        |
| 8.1.1.      | Requerimientos de hardware.....                                   | 86        |
| 8.1.2.      | Requerimientos de software.....                                   | 90        |
| 8.2.        | Instalación .....   | 90        |
| 8.2.1.      | Hardware.....   | 90        |
| 8.2.2.      | Software .....  | 93        |
| 8.3.        | Iniciar el programa.....  | 98        |
| 8.4.        | Configuración del sistema .....                                   | 99        |
| 8.5.        | Calibración de imagen.....  | 100       |
| 8.6.        | Prueba dilatométrica.....   | 101       |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Parámetros del controlador .....  | 40 |
| Tabla 2. Características de la cámara .....  | 45 |
| Tabla 3. Características del lente .....   | 47 |
| Tabla 4. Características de la tarjeta de Video.....   | 48 |
| Tabla 5. Distancia entre puntos .....  | 53 |
| Tabla 6. Medidas de distancia entre marcas hechas por el sistema y por el<br>calibrador (lado izquierdo) ..... | 70 |
| Tabla 7. Medidas de distancia entre marcas hechas por el sistema y por el<br>calibrador (centro) .....         | 70 |
| Tabla 8. Medidas de distancia entre marcas hechas por el sistema y por el<br>calibrador y (lado derecho) ..... | 70 |
| Tabla 9. Error de la prueba .....  | 71 |
| Tabla 10. Medidas de desplazamiento de las marcas .....  | 75 |
| Tabla 11. Resultados de la prueba con el reloj .....   | 77 |
| Tabla 12. Especificaciones mínimas del PC.....   | 88 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Curva Dilatómétrica Típica.....   | 6  |
| Figura 2. Esquema Simplificado del Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu.....                           | 8  |
| Figura 3. Elementos fundamentales de un sistema de adquisición de imágenes<br>.....                   | 13 |
| Figura 4. Relación entre resolución de píxel y campo de vista .....                                   | 14 |
| Figura 5. Angulo relativo de la cámara a un objeto en inspección.....                                 | 17 |
| Figura 6. Grilla de puntos y calibración .....  | 19 |
| Figura 7. Calibration ROI .....   | 21 |
| Figura 9. Imagen fuente .....   | 26 |
| Figura 10. Imagen erosionada e imagen dilatada.....   | 26 |
| Figura 11. Diagrama de bloques del sistema .....  | 32 |
| Figura 12. Pistones pertenecientes al Dilatómetro .....   | 33 |
| Figura 13. Diagrama de flujo segmentación de marcas anterior proyecto .....                           | 35 |
| Figura 14. Circuito de disparo del TRIAC.....   | 37 |
| Figura 15. Diagrama de Bloques del AD595 .....  | 39 |
| Figura 16. Controlador.....   | 40 |
| Figura 17. Diagrama de bloques funcional del AD974.....   | 42 |
| Figura 18. Diagrama de bloques funcional del AD5231 .....   | 43 |
| Figura 19. Módulo de alimentación .....   | 44 |
| Figura 20. Iluminación difusa frontal .....   | 49 |
| Figura 21. Iluminación difusa axial .....   | 50 |
| Figura 22. Esquema de ambiente controlado de fotografía .....   | 51 |
| Figura 23. VI de adquisición de imágenes .....  | 52 |
| Figura 24. Grilla de puntos.....  | 53 |
| Figura 25. VI para calibración del sistema de medición de desplazamiento.....                         | 54 |
| Figura 26. VI para el tratamiento digital de imágenes.....  | 55 |
| Figura 27. Diagrama de flujo de segmentación de marcas.....   | 56 |
| Figura 28. VI de segmentación, identificación y medición de marcas.....                               | 57 |
| Figura 29. VI de transformación de píxel a coordenadas del mundo real .....                           | 58 |
| Figura 30. VI de medición de desplazamiento y filtrado de las muestras.....                           | 59 |
| Figura 31. VI para despliegue de graficas y resultados.....   | 60 |
| Figura 32. VI de despliegue de resultados en EXCEL.....   | 61 |
| Figura 33. Interfase principal.....   | 62 |
| Figura 34. Interfase para la configuración del sistema de adquisición de<br>imágenes .....            | 63 |
| Figura 35. Interfase para la calibración del sistema de medición de<br>desplazamiento.....            | 64 |
| Figura 36. Interfase para el despliegue de los resultados de la prueba<br>Dilatación vs. Tiempo ..... | 65 |
| Figura 37. Interfase de despliegue de Temperatura VS Tiempo.....                                      | 66 |
| Figura 38. Tabla de Excel con resultados de la prueba.....  | 67 |
| Figura 39. Marcas usadas para la prueba.....  | 68 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 40. MARCAS SEGMENTADAS.....  | 69  |
| Figura 41. Imagen de prueba .....   | 72  |
| Figura 42. Imagen segmentada .....  | 73  |
| Figura 43. Perímetro medido con el sistema y con el calibrador.....                         | 73  |
| Figura 44. Resultados de la prueba graficados.....  | 74  |
| Figura 46. Resultados de la prueba del reloj .....  | 77  |
| Figura 1. Dilatómetro de escuela de ingeniería Metalúrgica y ciencia de<br>Materiales ..... | 86  |
| Figura 2. Cámara del sistema .....  | 87  |
| Figura 3. Grilla de puntos.....   | 87  |
| Figura 4. Tarjeta de video .....  | 88  |
| Figura 5. Equipo de cómputo usado .....   | 89  |
| Figura 6. Control de temperatura.....   | 89  |
| Figura 7. Base de ubicación de la cámara.....   | 91  |
| Figura 8. Adaptador usado en el sistema.....  | 91  |
| Figura 9. Conexión de la tarjeta de video.....  | 92  |
| Figura 10. Conexión del control de temperatura.....   | 93  |
| Figura 11. SOFTWARE DE CONTROL DE LA TARJETA DE VIDEO.....                                  | 94  |
| Figura 12. EXTENSION DE LABVIEW.....  | 95  |
| Figura 13. INSTALADOR DE LABVIEW 7.1 .....  | 96  |
| Figura 14. INSTALADOR DE IMAQ VISION .....  | 97  |
| Figura 15. INTERFASE PRINCIPAL.....   | 98  |
| Figura 16. INTERFASE DE CONFIGURACION DEL SISTEMA DE<br>ADQUISICION .....                   | 99  |
| Figura 17. INTERFASE DE CALIBRACION DEL SISTEMA.....  | 100 |
| Figura 18. INTERFASE DE SELECCIÓN DE LA REGION DE INTERES.....                              | 101 |
| Figura 19. INTERFASE DE PRUEBA DILATOMETRICA .....  | 102 |
| Figura 20. RESULTADOS DE LA PRUEBA EN EXCEL .....   | 104 |

## LISTA DE FORMULAS

|   |    |
|---|----|
| Fórmula 1. Ecuaciones de corriente y de Temperatura .....       | 35 |
| Fórmula 2. Ecuación de Voltaje de entrada del Triac .....       | 36 |
| Fórmula 3. Voltaje de salida el Triac.....                      | 36 |
| Fórmula 4. Angulo del disparo del Triac.....                    | 37 |
| Fórmula 5. Formula del ancho de pulso mínimo para el Triac..... | 38 |
| Fórmula 6. Formula del voltaje de salida del AD595.....         | 39 |
| Fórmula 7. Función de transferencia de filtros pasa bajo.....   | 41 |

## LISTA DE ANEXOS

|  |     |
|--|-----|
| ANEXO 1. MANUAL DE USUARIO DEL SISTEMA IMPLEMENTADO..... | 83  |
| ANEXO 2. PROGRAMAS DE MICROCONTROLADOR.....              | 105 |

## RESUMEN

TITULO: DILATOMETRO AUDIBERT-ARNU, AUTOMATIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA POR MEDIO DE PC<sup>1</sup>

AUTOR: RICARDO RUEDA SALAS<sup>2</sup>

PALABRAS CLAVE: Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu, Sistema de Adquisición de Imágenes, frame grabber, tratamiento digital de imágenes, IMAQ Vision, LabVIEW ®.

DESCRIPCION:

En este proyecto se mejoraron el sistema de registro de desplazamiento, de medición y control de temperatura para el Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Dicho equipo permite realizar pruebas para la caracterización de las propiedades plásticas del carbón, o de diferentes mezclas para determinar su aptitud para ser empleadas en la fabricación de coque metalúrgico, el cual se emplea como agente reductor para la fundición de hierro y como combustible.

La medición de desplazamiento fue implementada con un sistema de adquisición de imágenes, que consta de un ambiente de iluminación controlada, una lente, una cámara de video y una tarjeta digitalizadora. El tratamiento digital de imágenes se realiza con IMAQ Vision de LabVIEW ®; éste software permite hacer la captura, el tratamiento, la segmentación de las marcas, la calibración de las imágenes y la medición de desplazamiento.

La adquisición de temperatura se realiza por medio de una termocupla tipo K, la tarjeta de adquisición de Datos, que fue repotenciada, El microcontrolador de la familia Motorola, el conversor análogo digital y el potenciómetro digital. La comunicación con el computador se realiza de forma bidireccional por medio de la interfaz RS-232.

El manual de usuario se realizó con base en las experiencias tenidas en la implementación de la herramienta, el proceso de montaje del prototipo y las necesidades de la persona que realizará la prueba. El manual contiene los requerimientos mínimos del computador y del Dilatómetro, el software a instalar, las carpetas que se deben almacenar con los subVI's a ejecutar y un protocolo para realizar un montaje y posterior realización de pruebas.

---

<sup>1</sup> Proyecto de grado

<sup>2</sup>Facultad Físico-Mecánicas. Ing Electrónica. Jaime Guillermo Barrero Pérez

## ABSTRACT

TITLE: Dilatometer of coal Audibert-Arnu, Automation of tool by means of PC.<sup>1</sup>

AUTHOR: Ricardo Rueda Salas<sup>2</sup>

KEY WORDS: Dilatometer of coal Audibert-Arnu, coke metallurgist, System of Acquisition of Images, frame grabber, Digital treatment of images, IMAQ Vision, LabVIEW

### DESCRIPTION:

In this project a system of registration of displacement data was improved, and of measurement and control of temperature for the Dilatometer of Coal Audibert-Arnu of the "Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales".

This team allows to make out tests for the characterization of the plastic properties of the coal or of different mixtures to determine its aptitude to be employees in the production of coke metallurgist, which is used as agent reducer for the iron foundry and as fuel.

The displacement measurement was implemented with a system of Acquisition of images; this consists of an environment of controlled illumination, a lens, a video camera and a frame grabber. The digital treatment of images is carried out with IMAQ Vision of LabVIEW ®; this software allows to make the capture, the treatment, the segmentation of the marks and the calibration of the images. \* Degree Project

The acquisition of temperature is carried out by means of a thermocouple type K and the Card of Acquisition of Data, which was re-powered. Microcontroller of the family Motorola, a A/D converter and a digital potentiometer. The communication with the computer is carried out in a bidirectional way by means of the interface RS-232.

The user manual was made based on the experiences during implementation of the tool, the assembly process of the prototype and the needs of the user. The manual contains the requirements of the computer and the dilatometer, the software to install, folders to be stored with subVI's to run and a protocol for a subsequent assembly and testing.

---

<sup>1</sup> Degree Project

<sup>2</sup> Facultad Físico-Mecánicas. Ing Electrónica. Jaime Guillermo Barrero Pérez



## INTRODUCCIÓN

La Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones en los últimos años ha venido realizando proyectos con la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales para restaurar y potenciar sus equipos de laboratorio. Dentro de este contexto se ha querido mejorar una anterior restauración del dilatómetro de carbón Audibert-Arnu para el cual se realizó un prototipo de medición y control de temperatura, y registro de datos de desplazamiento. Así se procedió a corroborar el adecuado funcionamiento del dispositivo de control y registro de temperatura, y del sistema de registro de desplazamiento para garantizar las condiciones necesarias del proceso.

El presente documento contiene un marco teórico en el cual se presentan una breve reseña de algunos conceptos de Dilatometría y del Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu, algunos fundamentos de adquisición y tratamiento digital de imágenes usados en la implementación del sistema de medición de desplazamiento. En el siguiente capítulo se ilustran las características del prototipo que se implementó en el anterior trabajo de grado. Posteriormente se presenta una descripción del trabajo realizado en donde se realizaron modificaciones al sistema de control de temperatura, en su tarjeta de adquisición, se realizó nuevamente el sistema de registro de desplazamiento y se hizo un manual de usuario.



## 1. DESCRIPCION DEL PROYECTO

### 1.1. OBJETIVOS

#### 1.1.1. Generales

Realizar la adecuación y el mejoramiento al sistema de control y registro de temperatura, al sistema de registro del desplazamiento de las muestras de carbón y un manual de usuario para el dilatómetro de carbón AUDIBERT-ARNU de la Escuela de Ingeniería metalúrgica.

#### 1.1.2. Específicos

- Poner en funcionamiento y realizar adecuaciones al sistema de control y registro de temperatura del dilatómetro, en un rango aproximado de 300°C hasta 700°C con una frecuencia de muestreo de 0.25 Hz.
- Realizar mejoras al sistema de iluminación y al sistema de procesamiento de datos para el registro de desplazamiento de las muestras de carbón por medio de imágenes, que corresponde a la contracción y dilatación de muestras de carbón con una resolución de 1mm a una frecuencia de muestreo de 0.25 Hz.
- Elaborar un manual de usuario que permita al operador hacer funcionar el sistema de adquisición y control de temperatura, y el sistema de registro de desplazamiento además de pronosticar algunas fallas del sistema del dilatómetro Audibert-Arnu de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica.



## 1.2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En este proyecto se desarrollaron una serie de mejoras y adecuaciones al sistema implementado en un anterior proyecto. Se busca controlar la temperatura y el registro de desplazamiento de un dilatómetro de carbón Audibert-Arnu perteneciente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica. Para lograr su funcionamiento de manera automática se usó procesamiento digital de señales. Este proyecto es la continuación del desarrollado por la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica llamado "Medición de desplazamiento por medio de tratamiento digital de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu"<sup>1</sup>.

La medición de desplazamiento se realizó por medio de un ambiente controlado de iluminación, una cámara de video y la herramienta software IMAQ Vision extensión de LabVIEW. De esta manera las mejoras se concentraron en todas las fases del procesamiento. El control de temperatura se realizó por medio de una termocupla, una tarjeta de adquisición y una extensión de LabVIEW llamada PID control toolset; la comunicación entre el computador y el instrumento es bidireccional, el trabajo en este sistema se concentro en verificar el correcto funcionamiento de este sistema.

El manual de usuario se realizó con base en información previa, experiencias adquiridas durante el desarrollo del trabajo y sugerencias de las diferentes personas involucradas. Con el fin de dar una herramienta al usuario final para desarrollo de las pruebas, y al laboratorista para la administración del sistema así como la implementación del sistema en

---

<sup>1</sup> BONILLA MURIEL Viviana, Sistema de medición de desplazamiento por medio de tratamiento digital de imágenes para el dilatómetro Audibert Arnu. 2005



cualquier otro equipo de cómputo que cumplan con los requisitos mínimos.



## 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta una breve descripción de algunos conceptos acerca de la Dilatometría para la caracterización de carbones, especificaciones sobre el Dilatómetro Audibert-Arnu, y finalmente fundamentos sobre sistemas de adquisición y tratamiento digital de imágenes.

### 2.1. DILATÓMETRO DE CARBÓN AUDIBERT-ARNU

En esta sección se incluyen generalidades acerca de la dilatometría, el instrumento para realizar la prueba en cuestión, y el sistema implementado con anterioridad.

#### 2.1.1. Dilatometría

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  $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$  desde  $300^{\circ}\text{C}$  hasta  $700^{\circ}\text{C}$ , el carbón se coloca en un recipiente cilíndrico cerrado por un pistón, cuyos desplazamientos son seguidos por medio de un dispositivo de medición.

Los equipos desarrollados para determinaciones Dilatométricas son: Sheffield, Hoffman, Chevenard-Jounier, Audibert-Arnu y Ruhr, pero los más difundidos en el mundo son estos dos últimos.

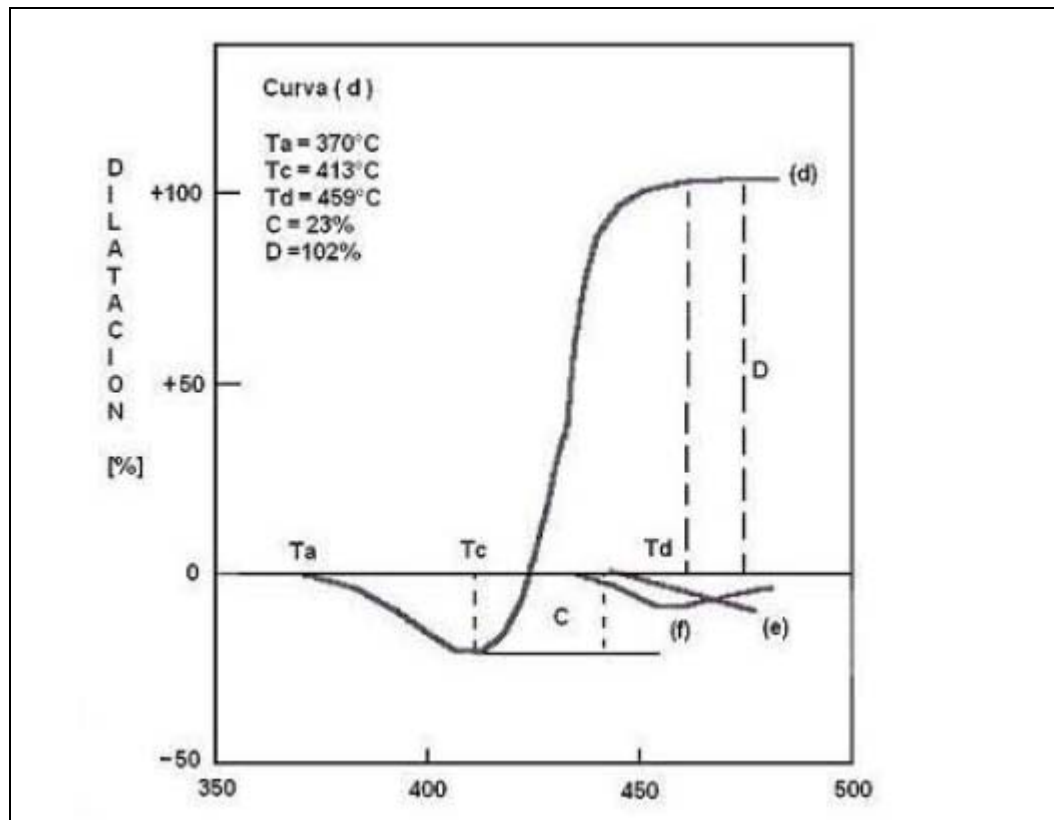


### 2.1.2. Dilatómetro Audibert-Arnu.

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 (Figura 1), de donde se pueden deducir los siguientes parámetros:

- Temperatura Inicial de Ablandamiento,  $T_a$ , °C.
- Temperatura de Máxima Contracción,  $T_c$  °C.
- Temperatura de Máxima Dilatación,  $T_d$  °C.
- Máxima Contracción, “c”, %.
- Máxima Dilatación, “d”, %.

Figura 1. Curva Dilatométrica Típica





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

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

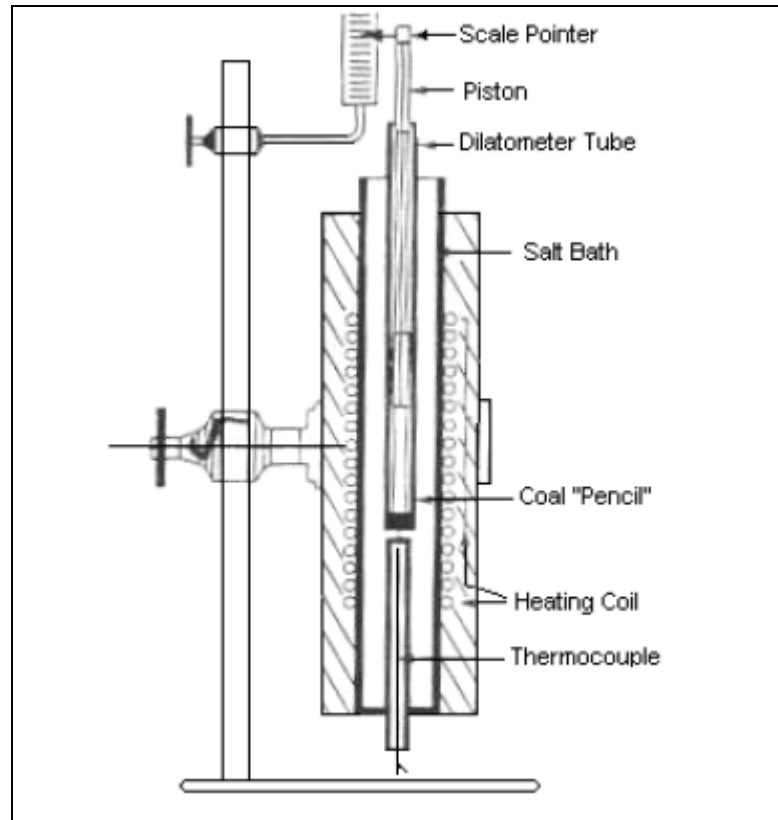
La primera parte de la curva (de  $T_a$  a  $T_c$ ) representa una contracción del carbón, ésta es determinada principalmente por el ablandamiento de las partículas de carbón, que bajo el efecto del peso del pistón, se deforman como una masa plástica.

Simultáneamente al 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 la materia volátil, la expansión cesa apenas el fósil se empieza a resolidificar, por efecto de las reacciones pirolíticas que producen el semi-coque.

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.

Como se mencionó anteriormente, para mediciones en el dilatómetro Audibert-Arnu, al carbón se le da forma de “lápiz”, se inserta en un tubo metálico, y sobre él se pone un pistón que pone carga sobre el carbón. En la Figura 2 se puede observar un esquema simplificado de este Dilatómetro.

Figura 2. Esquema Simplificado del Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu



Fuente: *An introduction to coal technology*

La medición de desplazamiento se hacía por medio de las plumillas unidas a los pistones y el cilindro registrador con movimiento eléctrico sobre el cual se enrollaba una hoja de papel de registro en el que las plumillas trazaban las curvas dilatométricas. El papel de registro estaba graduado en “mm” en la ordenada y “minutos” en la abscisa. El número de pistones disponibles es de seis (6) en lugar de los siete originales.

Para el presente proyecto se tiene implementado un sistema de medición de desplazamiento y se consideraron diferentes sensores. Entre los diferentes sensores de desplazamiento se encuentran sensores resistivos, inductivos, capacitivos, por láser, por ultrasonido, con encoders, por mencionar algunos.



Finalmente se cambiaron los sensores de desplazamiento tradicionales por la medición de desplazamiento por medio de tratamiento digital de imágenes, entre otras cosas porque dicha alternativa presenta la ventaja de no ser invasiva, por lo que no le genera carga adicional a la muestra de carbón, no se ve afectado por la temperatura y en lugar de hacer acondicionamiento de señal por hardware, el tratamiento es por software. Por eso a continuación se detallan fundamentos sobre adquisición y tratamiento digital de imágenes.

## **2.2. CONCEPTOS DE TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES**

### **2.2.1. Imagen digital**

Una imagen es un arreglo bidimensional de valores representando intensidad de luz. Para propósitos de procesamiento digital de imágenes el término imagen refiere a una imagen digital. Una imagen se representa con una función de la intensidad de luz

$$f(x,y)$$

donde  $f$  es el brillo del punto  $(x,y)$ ,  $x$  y  $y$  representan las coordenadas espaciales de un píxel.

En procesamiento digital de imágenes, un sensor convierte una imagen a un número discreto de píxeles. El sensor asigna a cada píxel una ubicación numérica y un nivel de gris o de color que especifica el brillo o color del píxel.

### **2.2.2. Propiedades de una imagen digitalizada**

Una imagen digitalizada tiene tres propiedades básicas: resolución, definición y número de planos.

- Resolución de imagen

La resolución espacial de una imagen es su número de filas y columnas de píxeles. Una imagen compuesta de  $m$  columnas y  $n$  filas tiene una resolución de  $mxn$ . Esta imagen tiene  $m$  píxeles a lo largo de su eje horizontal y  $n$  píxeles a lo largo del eje vertical.



- Definición de una imagen

La definición de una imagen indica el número de tonos que se puede ver en una imagen. La profundidad de bits de una imagen es el número de bits usados para codificar el valor de un píxel. Para una profundidad de bits  $n$  la imagen tiene una definición igual a  $2^n$  lo que significa que un píxel puede tener  $2^n$  valores diferentes.

- Número de planos

El número de planos de una imagen corresponde al número de arreglos de píxeles que conforman una imagen. Una imagen en escala de grises o pseudo color esta compuesta de un plano, mientras que un plano en color verdadero esta compuesto de tres planos. Un componente de rojo, un componente de verde y un componente de azul.

En imágenes de verdadero color las intensidades de componentes de color de un píxel están codificadas en tres valores diferentes. La imagen de color es la combinación de tres arreglos de de píxeles correspondientes a rojo, verde, azul componentes de una imagen RGB (iniciales en ingles).

Las imágenes en HSL están definidas por su matiz, saturación, y luminancia.

### **2.2.3. Máscara de imagen**

Una máscara de imagen aísla partes de una imagen para procesamiento, si una imagen se somete a una de máscara de imagen, el procesamiento o análisis depende de ambos la imagen original y la imagen enmascarada.

Se puede limitar el área en el cual una función actúa aplicando una mascara en el rectángulo que limita la región que se quiere procesar determinando un ROI (region of interest) o región de interés.



#### **2.2.4. Espacios de color**

Los espacios de color permiten representar un color. Un espacio de color es un subespacio con un sistema de coordenadas tridimensional donde cada color es representado como un punto.

Los humanos percibimos el color con parámetros como el brillo, tono e intensidad, mientras que los computadores perciben el color como una combinación entre rojo, verde y azul. La industria de la impresión usa cian, magenta y amarillo para especificar un color.

La siguiente es una lista de espacios de color comunes:

- RGB-basado en rojo, verde y azul. Usado por computadores para desplegar imágenes.
- HSL-basado en tono, saturación, y luminancia. Usado en aplicaciones de procesamiento de imágenes.

Se debe definir un espacio de color cada vez que se procese imágenes de color. Si se espera que las condiciones de luz varíen considerablemente durante una aplicación de visión de maquina de color se usa el espacio de color HSL. Este espacio provee información de color más precisa que el espacio RGB cuando se corren funciones de procesado de color.

Si no se espera que las condiciones de luz varíen considerablemente durante una aplicación se puede definir fácilmente los colores que se desean buscar usando el espacio de color RGB, además se usa el espacio de color RGB si se quiere sencillamente desplegar una imagen y no procesarla. El espacio RGB reproduce una imagen como se esperaría verla.

#### **2.2.5. Espacio de color HSL**

Este espacio de color fue desarrollado para poner el color en términos que son fácilmente cuantificables por los humanos. Tono, saturación, y brillo son características que distinguen un color de otro en el espacio HSL. El tono



corresponde a la longitud de onda dominante del color. El componente de tono es un color como naranja, verde o violeta. La saturación refiere a la cantidad de blanco añadido al tono y representa la pureza de un color. Un color sin nada de blanco está totalmente saturado.

El grado de saturación es inversamente proporcional a la cantidad de luz blanca añadida. El brillo encarna la noción cromática de luminancia, o la amplitud o poder de la luz. Cromaticidad es la combinación del tono y la saturación, y la relación entre la cromaticidad y el brillo característico de un color.

### **2.3. CONFIGURACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES**

A continuación se describen las características de un sistema de adquisición de imágenes y como se realiza una calibración con el fin de convertir píxeles coordinados a coordenadas del mundo real.

#### **2.3.1. Configuración de un sistema de imágenes**

Antes de adquirir, analizar y procesar imágenes, se debe configurar los diferentes dispositivos que intervienen en el proceso. Estos son algunos de los componentes de un sistema de imágenes: el campo de vista, la distancia de trabajo, resolución, profundidad de campo y el tamaño del sensor.

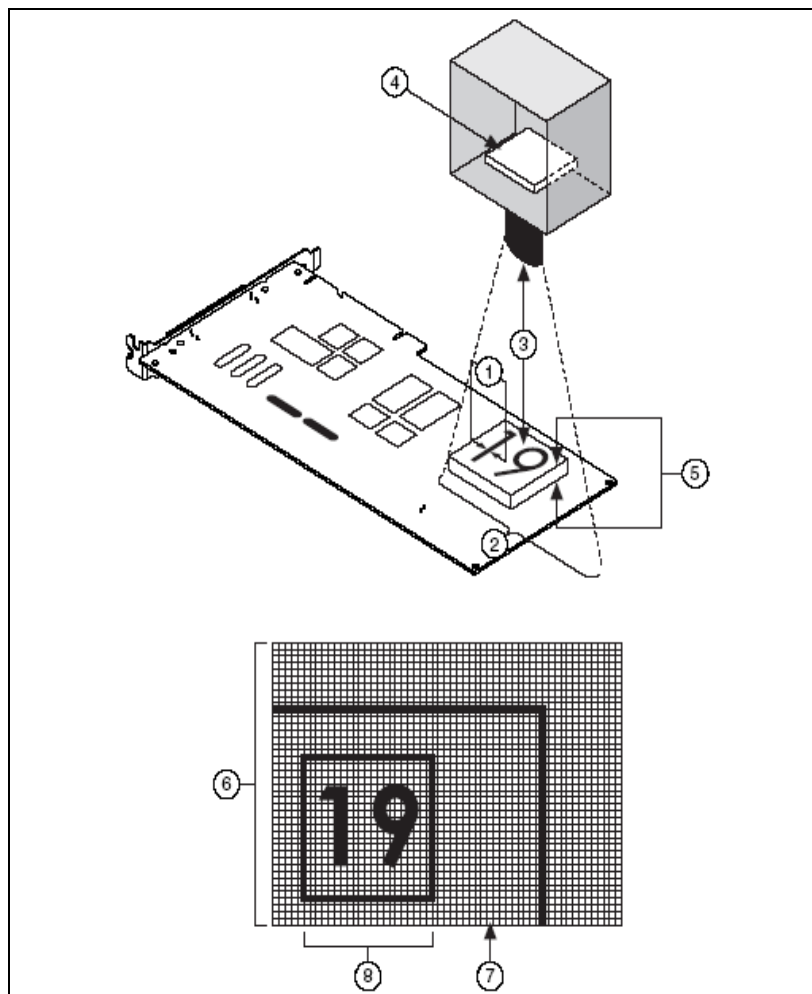
- Resolución mínima requerida- el objeto de menor tamaño que el sistema de procesamiento debe distinguir.
- Resolución de píxel- el mínimo número de píxeles necesitado para representar el objeto bajo inspección.
- Campo de vista- el área del objeto bajo inspección que la cámara puede adquirir.
- Distancia de trabajo- distancia desde el frente del lente de la cámara al objeto bajo inspección.

- Profundidad de campo- la máxima profundidad del objeto que se mantiene en foco.

La manera en la cual se configura depende del tipo de análisis y procesamiento que se desea hacer.

En la Figura 3 se muestran los elementos a tomar en cuenta cuando se configura un sistema de adquisición de imágenes:

Figura 3. Elementos fundamentales de un sistema de adquisición de imágenes



Fuente: *IMAQ Vision Concept Manual*

1. Resolución      3. Distancia de trabajo      5. Profundidad de campo      7. Pixel

2. campo de vista   4. Tamaño del sensor   6. Imagen   8. Resolución de píxel

### 2.3.2. Conceptos del sistema de adquisición de imágenes

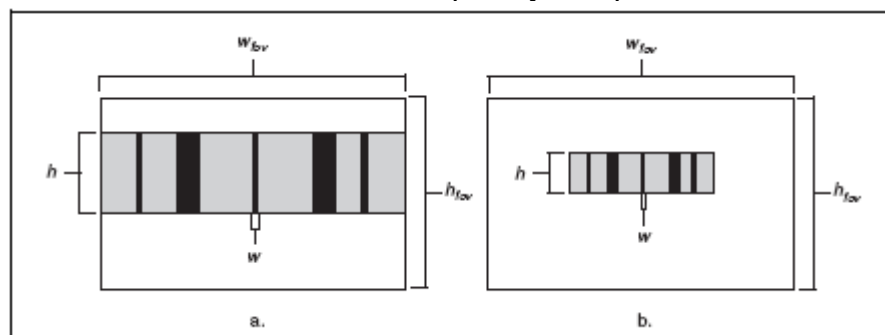
A continuación se define con mayor profundidad los conceptos a tener en cuenta en la configuración del sistema de adquisición de imágenes

- **Resolución:** hay dos clases de resolución a considerar cuando se configura un sistema de imágenes: *resolución de píxel* y *resolución*. La *resolución de píxel* se refiere a un mínimo número de píxeles que se necesitan para representar el objeto bajo inspección. Se puede determinar la *resolución de píxel* por el objeto más pequeño que se necesite inspeccionar.

La *resolución* indica la cantidad de detalle de un objeto que el sistema de imágenes puede reproducir. Imágenes con baja resolución obvian detalles y a menudo aparecen borrosas. Tres factores contribuyen a la resolución del sistema de imágenes: campo de vista, tamaño del sensor de la cámara y número de píxeles en el sensor de la cámara. Una vez se conozca esos tres factores, se puede determinar el largo focal del lente de la cámara.

- **Campo de vista:** es el área del objeto bajo inspección que la cámara puede adquirir. La figura describe la relación entre la resolución de píxel y el campo de vista:

Figura 4. Relación entre resolución de píxel y campo de vista



Fuente: *IMAQ Vision Concept Manual*



La figura a. muestra un objeto que ocupa todo el campo de vista. La figura b. muestra un objeto que ocupa menos espacio que el campo de vista. Si  $w$  es el tamaño del rasgo mas pequeño en la dirección  $x$  y  $h$  es el tamaño del rasgo mas pequeño en dirección  $y$ , la **mínima resolución de píxel  $x$**  es

$$\frac{w_{fov}}{w} \times 2$$

Y la **mínima resolución de píxel  $y$**  es

$$\frac{h_{fov}}{h} \times 2 .$$

Se escoge la resolución de píxel mas grande de los dos para la aplicación de imágenes.

- **Tamaño del sensor y número de píxeles en el sensor:** el tamaño del sensor es importante para determinar el campo de vista, lo cual es clave para determinar el requerimiento de resolución mínima. El largo diagonal del sensor determina el tamaño del área activa del mismo. El número de píxeles debe ser igual o más grande a la resolución de píxel. Se debe escoger una cámara que especifique su mínimo requerimiento de resolución.
- **Longitud focal del lente:** una vez se determine el campo de vista y un apropiado tamaño de sensor, se puede determinar que tipo de lente cumple con las necesidades de la aplicación. Un lente esta definido por su longitud focal. La relación entre el lente, campo de vista, y tamaño del sensor es como sigue:

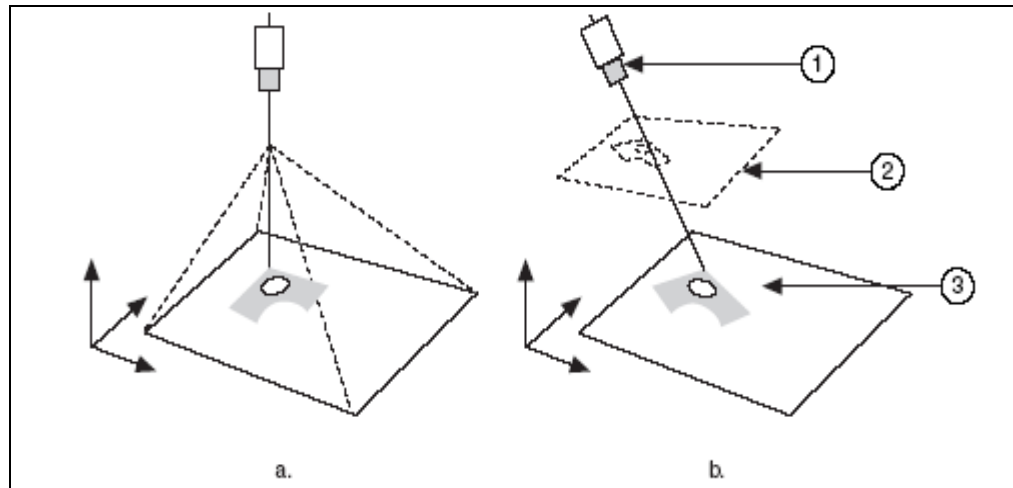
$$\text{Longitud focal} = (\text{tamaño del sensor} \times \text{distancia de trabajo}) / \text{campo de vista}$$



si no se puede cambiar la distancia de trabajo, se esta limitado para escoger una longitud focal para su lente. Si se tienen una distancia de trabajo fija y una longitud focal corta, las imágenes se pueden distorsionar. Sin embargo, si se tiene la disponibilidad de cambiar la distancia de trabajo se puede seleccionar un lente con la apropiada longitud focal y minimizar la distorsión.

- **Contraste:** resolución y contraste son factores estrechamente relacionados a la calidad de una imagen. El contraste define la diferencia en valores de intensidad entre objetos bajo inspección y el fondo de la imagen. Técnicas apropiadas de iluminación pueden mejorar el contraste del sistema.
- **Profundidad de campo:** es la habilidad para mantener objetos de variadas alturas en foco. Si se necesita inspeccionar objetos de varias alturas se debe escoger un lente que mantenga la calidad de imagen que se necesite para los objetos que se acercan así como los que se alejan del lente.
- **Perspectiva:** los errores de perspectiva aparecen cuando el eje de la cámara no esta perpendicular al objeto que se esta inspeccionando. A Figura 5 a. muestra una posición ideal para la cámara. La b. muestra la imagen de un objeto desde una posición angulada.

Figura 5. Angulo relativo de la cámara a un objeto en inspección



1. Distorsión del lente                      2. Error de perspectiva                      3. Cambio de orientación conocida

Figura: *IMAQ Vision Concept Manual*

Los errores de perspectiva aparecen como cambios en el tamaño del objeto dependiendo de la distancia del objeto al lente de la cámara.

- **Distorsión:** la distorsión no lineal es una aberración geométrica causada por errores ópticos en el lente de la cámara. Un lente de cámara típica produce distorsión radial. Esto causa que los objetos que están más lejos del centro óptico de la cámara parezcan más lejos del centro de los que realmente ellos están. Cuando la distorsión ocurre la información en la imagen se desplaza al centro del campo de vista, pero la información no necesariamente se pierde. Por eso se puede mejorar la distorsión en la imagen a través de una calibración espacial.

### 2.3.3. Calibración espacial

La calibración espacial es el proceso de transformación del píxel a unidades del mundo real. Una imagen contiene información en forma de píxeles. La calibración espacial permite trasladar una medición de unidades de píxel a otras unidades, así como pies o centímetros. Esta conversión es fácil si se



conoce una relación de conversión entre píxeles y unidades del mundo real. Además se puede usar la información de calibración para corregir errores de perspectiva o de distorsión.

La calibración se lleva a cabo con herramientas de IMAQ Visión que permiten hacer lo siguiente:

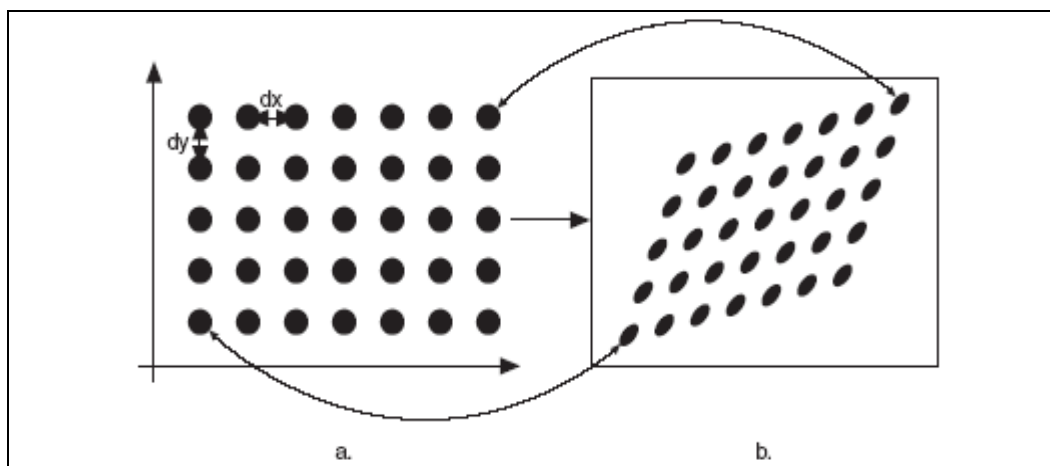
- Calibrar el sistema automáticamente con un patrón de calibración estándar o proveyendo puntos de referencia.
- Convertir mediciones (longitudes, áreas, anchos) de unidades del mundo real a unidades de píxeles y al contrario.
- Aplicar un mapa de calibración conocido para corregir una imagen adquirida a través de un sistema calibrado.
- Asignar un sistema de coordenadas arbitrario para medir posiciones en unidades del mundo real.

#### **2.3.4. Proceso de Calibración**

La calibración por software requiere una lista de píxeles conocidos del mundo real para computar la información de calibración de la imagen completa. Se puede especificar la lista de dos maneras:

- Una imagen de una cuadrícula de puntos como la que se muestra en la Figura 6. Ingresar el espacio  $dx$  y  $dy$  entre los puntos en unidades del mundo real. El software de calibración usa la imagen de la cuadrícula y el espacio entre los puntos para generar la lista de píxeles para el mapa del mundo real requerida para el proceso de calibración.
- Ingresar una lista de puntos del mundo real y las coordenadas de los correspondientes píxeles directamente al software de calibración.

Figura 6. Grilla de puntos y calibración

Figura: *IMAQ Vision Concept Manual*

El proceso de calibración usa la lista de píxeles del mundo real y un algoritmo definido por el usuario para crear un mapa para la imagen completa. El software de calibración también genera un mapa de error. Un mapa de error retorna un estimado del error en el peor caso cuando una coordenada de píxel es transformada a coordenadas del mundo real.

### 2.3.5. Sistema de coordenadas

Para expresar mediciones en unidades del mundo real, se debe definir un sistema de coordenadas. Un sistema de coordenadas se define por su origen, ángulo, y dirección del eje. Si no se especifica un sistema de coordenadas, el proceso de calibración define un sistema de coordenadas por defecto, como sigue:

1. El origen es puesto en el centro del punto más alto de la izquierda en la cuadrícula de calibración.
2. El ángulo es fijado a cero. Esto alinea el eje x con la fila más alta de puntos en la cuadrícula.



3. La dirección del eje se fija indirecta. Esto alinea el eje y a la columna mas a la izquierda de los puntos en la cuadrícula.

### 2.3.6. Algoritmos de calibración

IMAQ Vision tiene dos algoritmos para calibración: *perspective* y *nonlinear*. La calibración *Perspective* corrige errores de perspectiva, y la calibración *nonlinear* corrige errores de perspectiva y distorsión no lineal de lentes.

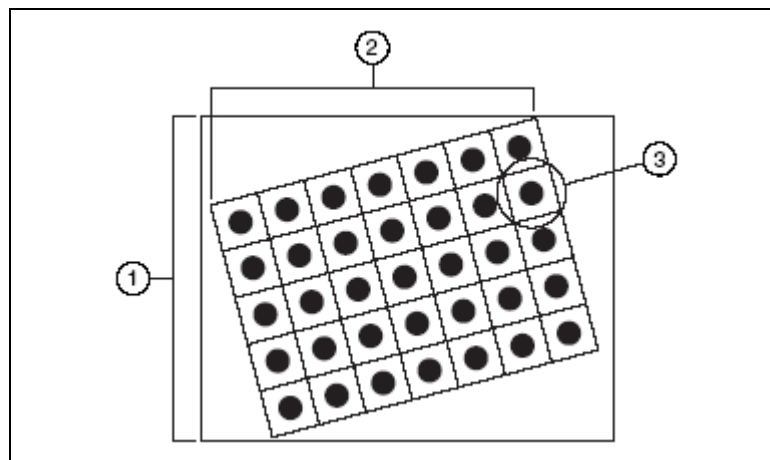
El algoritmo *Perspective* computa píxeles al mapa del mundo real para la imagen completa. Puede usar este mapa para convertir las coordenadas de algún píxel en la imagen a unidades del mundo real.

El algoritmo no lineal computa píxeles al mapa del mundo real en una región rectangular centrada alrededor de cada punto en la cuadrícula de calibración. IMAQ Vision estima la información del mapa alrededor de cada punto basado en los bordes de los mismos.

Se pueden convertir unidades de píxeles a unidades del mundo real dentro del área cubierta por los puntos de la cuadrícula. Debido a que IMAQ Vision computa el mapa alrededor de cada punto, solo el área en la imagen cubierta por la cuadrícula de puntos es calibrada con precisión.

La salida *calibration ROI* de la función de calibración define la región de la imagen en la cual la información de la calibración es precisa. La *calibration ROI* en el método de perspectiva es la imagen completa. La *calibration ROI* en el método no lineal encuadra el borde del rectángulo que encierra toda la región rectangular alrededor de los puntos de la cuadrícula.

Figura 7. Calibration ROI



1. Calibration ROI usando el algoritmo *perspective*
2. Calibration ROI usando el algoritmo No lineal
3. Región alrededor de los puntos

Fuente: IMAQ Vision Concept Manual

- Calidad de la Información de Calibración

Las salidas *quality score* y *error map* de la función de calibración indica cuan bien el sistema es calibrado.

La *quality score*, la cual esta en un rango de 0 a 1000, no refleja la precisión de la calibración, pero describe cuan bien el mapa de la calibración se adapta a la cuadrícula o la característica de puntos.

El mapa de error es una estimación del error posicional que se puede esperar cuando se convierte una coordenada de píxel a coordenadas del mundo real. El valor del error de la coordenada de píxel (i,j) indica el error de la posible localización más grande para la coordenada del mundo real estimada (x,y) comparada con la localización verdadera del mundo real.



El mapa del error permite determinar si la configuración del sistema de imágenes e información de calibración satisface los requerimientos de precisión de la aplicación.

- Corrección de la Imagen

La corrección de la imagen implica la transformación de una imagen adquirida distorsionada en una imagen donde los errores de perspectiva y de distorsión de lente son corregidos. IMAQ Vision corrige una imagen aplicando la transformación de píxel a coordenadas del mundo real para cada píxel en la imagen de entrada.

- Almacenamiento de la Información de Calibración

Después de adquirir la información de calibración, se puede guardar de manera que no se tenga que readquirir la información para procesamiento subsiguiente.

- Adjuntar la Información de Calibración

Cuando se tiene calibrado el sistema correctamente, se puede aplicar la información de calibración de la configuración actual a cada imagen que se adquiera. Usando la información de calibración adjuntada a la imagen, se puede convertir con precisión las coordenadas de píxel a coordenadas del mundo real para hacer medidas simples, o se puede corregir la imagen removiendo distorsión.

## 2.4. ANALISIS DE IMAGENES

El análisis de imágenes combina técnicas estadísticas y mediciones basadas en la intensidad de nivel de gris de los píxeles de las imágenes. Se pueden usar las funciones de análisis de imágenes para entender el contenido de la imagen y decidir cual tipo de herramientas de inspección se usará para



resolver una aplicación. Las funciones de análisis de imágenes proveen medidas con las cuales se pueden desempeñar tareas de inspección básica.

#### **2.4.1. Histograma**

Un histograma cuenta y grafica el número total de píxeles de cada nivel de escala de grises, desde la grafica se puede determinar si la imagen contiene distintas regiones de cierto valor de nivel de gris.

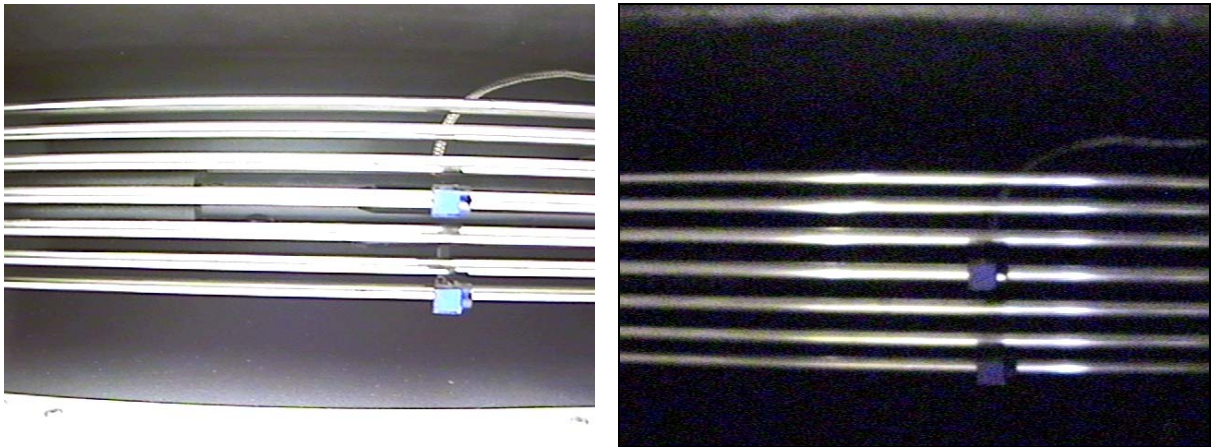
Un histograma provee una descripción general de la apariencia de una imagen y ayuda a identificar diferentes componentes tales como el fondo, objetos y ruido.

El histograma es una herramienta fundamental en el análisis de imágenes, que describe la distribución de la intensidad de los píxeles en una imagen. Se puede usar el histograma para determinar si una imagen contiene distintas regiones de ciertos valores de escala de grises. Además se puede usar un histograma para adecuar las condiciones de adquisición de imágenes.

se pueden determinar dos criterios importantes buscando en el histograma

- Saturación: poca luz en el ambiente de la imagen lleva a una baja exposición del sensor de imagen. Mientras que demasiada luz lleva a una sobreexposición, o saturación del sensor de imágenes. Las imágenes adquiridas bajo condiciones de sobreexposición o saturación no contendrán la información que se quiere inspeccionar desde la escena que esta siendo observada.

Figura 8. Imagen sobreexpuesta e imagen saturada



Fuente: Diseñador del sistema

Es importante detectar esas condiciones de imagen y corregirlas durante la configuración del sistema de imágenes. Se puede detectar si un sensor esta con baja exposición o saturado buscando en el histograma. Una imagen con baja exposición contiene un gran número de píxeles con bajos niveles de gris. Esto aparece como un pico en la parte mas baja del histograma. Una imagen saturada contiene un gran número de píxeles con muy alto valor en la escala de grises.

#### **2.4.1.1. Histograma de imágenes de color**

El histograma de una imagen de color es expresado como una serie de tres tablas, cada una correspondiente a los tres componentes en el modelo de color.

- **Medidores de intensidad**



Los medidores de intensidad miden las estadísticas de la escala de grises de una imagen o una región. Se usan medidores de intensidad para medir el valor promedio en una imagen a determinar. Por ejemplo la presencia o ausencia de una parte o un defecto en una parte.

#### **2.4.2. Morfología de escala de grises**

Las transformaciones morfológicas extraen y alteran la estructura de partículas en una imagen, entre ellas se encuentran dos categorías:

- Morfología binaria.
- Morfología de escala de grises.

En morfología de escala de grises, un píxel es comparado a los píxeles que lo rodean con el fin de mantener esos valores que son el más pequeño en el caso de la erosión, y el más grande en el caso de la dilatación.

Se usa la morfología de escala de grises para filtrar o suavizar la intensidad de los píxeles de una imagen. Las aplicaciones incluyen filtrado de ruido, corrección de fondo disparejo, y una extracción de rasgos de escala de grises.

#### **2.4.3. Conceptos de morfología de escala de grises**

Se pueden usar esas funciones para alterar la forma de las regiones expandiendo las áreas brillantes a expensas de las áreas oscuras y viceversa. Estas funciones suavizan gradualmente variando patrones e incrementando el contraste en áreas limitadas. Esta sección describe las siguientes funciones de morfología de escala de grises:

- Erosión.
- Dilatación.

- Apertura.
- Cerramiento.
- Auto-mediana.

En el presente proyecto se hizo uso de las funciones de morfología de escala de grises especificadas a continuación:

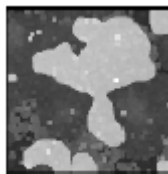
- Funciones de erosión

Una erosión de escala de grises reduce el brillo de cada píxel que esta rodeado por vecindarios de una intensidad más baja. Los vecindarios están definidos por un elemento estructural.

- Funciones de dilatación

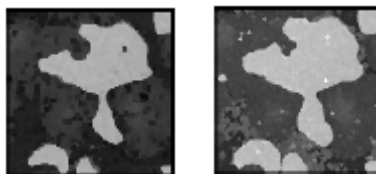
Esta función incrementa el brillo de cada píxel que esta rodeado por vecindarios con una intensidad más alta. La vecindad esta definida por un elemento estructural. La dilatación del nivel de gris tiene el efecto opuesto a la erosión de nivel de gris porque dilata las regiones con niveles de gris y erosiona los niveles oscuros.

Figura 9. Imagen fuente



Fuente: *IMAQ Vision Concept Manual*

Figura 10. Imagen erosionada e imagen dilatada



Fuente: *IMAQ Vision Concept Manual*



#### **2.4.4. Análisis *Blob***

*Blob* (Binary large objects, objetos binarios grandes) son áreas de píxeles juntos dentro de una imagen, los cuales tienen el mismo estado lógico. Todos los píxeles que pertenecen a un *blob* de una imagen están en el frente de la imagen, todos los otros píxeles pertenecen al fondo de la imagen. En una imagen binaria los píxeles del fondo tienen valores iguales a cero, mientras que cada píxel de valor diferente a cero pertenece a un objeto binario.

Se usa el análisis *blob* para detectar regiones conectadas o grupos de píxeles en una imagen y después hacer medición de esas imágenes. El análisis *blob* consiste de una serie de operaciones de procesamiento y funciones de análisis que produce información acerca de *blobs* en una imagen.

Se usa análisis *blob* cuando se este interesado en encontrar objetos cuyas características espaciales satisfacen ciertos criterios, se usa análisis *blob* para eliminar los objetos que no son de interés basados en sus características espaciales y mantiene solo los objetos relevantes para análisis posterior.

Se usa análisis *blob* para encontrar información estadística.- como el tamaño o el número de los objetos, localización, y la presencia de objetos-. Se puede además localizar objetos en aplicaciones de control de movimiento, donde hay variación significativa de forma u orientación.

Un típico análisis *blob* busca a través de una imagen y detecta todas las partículas en la imagen y construye reportes detallados en cada partícula. Este reporte usualmente contiene aproximadamente 50 elementos de información acerca de objetos e incluyendo localización en la imagen,



tamaño, forma, orientación a otros objetos, segmento más largo, y momento de inercia.

Se pueden usar múltiples parámetros como perímetro, ángulo, área, y centro de masa para identificar y clasificar esos objetos. O se puede identificar los objetos con una sola característica como criterio para remover todos los objetos que no coinciden y que no están dentro de una tolerancia. Se puede desempeñar una búsqueda mas refinada en las partículas que quedan usando otra lista de parámetros. Esas incluyen el segmento en cada objeto, y el factor de unión (el radio del área del objeto al área del rectángulo que encierra el objeto).

#### **2.4.4.1. Umbralización**

La umbralización consiste en segmentar una imagen en dos regiones: una región partícula y una región de fondo. Este proceso trabaja otorgando el valor 1 a todos los valores que pertenece a un intervalo de escala de grises, llamado intervalo umbral, y otorga 0 al resto de los píxeles de la imagen.

Se usa umbralizacion para aislar objetos de interés en una imagen. El rango de los valores de píxeles van de 0 a 255, en cambio para una imagen binaria el valor de los píxeles es 0 o 1.

La umbralización permite seleccionar rangos de píxeles en escala de grises e imágenes de color para separar objetos de interés del fondo de la imagen. Se usa umbralizacion para extraer áreas que corresponden a estructuras significativas en una imagen y para enfocar el análisis a esas áreas.



#### 2.4.4.2. Conceptos de umbralizacion

- Umbral de intensidad: las partículas están caracterizadas por un rango de intensidad. Esta compuesta de píxeles con valores de escala de grises pertenecientes a un intervalo umbral dado. Todos los otros píxeles son considerados parte del fondo.
- El intervalo umbral es definido por dos parámetros (umbral inferior, umbral superior) todos los píxeles que tienen valores de escala de gris igual o más grande el umbral inferior y más pequeño que el valor del umbral superior, son seleccionados como píxeles pertenecientes a partículas en la imagen.

#### 2.4.4.3. Umbralizacion automática

Existen varias técnicas de umbralizacion automática:

- *Clustering*
- Entropía
- Métrica
- Momentos
- Varianza interclase

En contraste a la umbralizacion manual, esos métodos no requieren que se configuren el mínimo y máximo de intensidades de luz. Esas técnicas son adecuadas para condiciones en las cuales la intensidad de luz varía.

#### 2.4.4.4. Medición de partículas

En esta sección se muestran las características y las medidas que pueden ser determinadas de las partículas

- partículas digitales

Se puede caracterizar una partícula digital por un grupo de parámetros morfológicos y de intensidad como las áreas, largos, coordenadas, equivalencia de formas y diversas mediciones.



- áreas
  - Numero de píxeles: área de una partícula, sin hoyos, solo píxeles.
  - área de la partícula: área de una partícula en unidades reales (basado en calibración espacial de imagen). Este valor es igual al numero de píxeles cuando la calibración espacial es tal que un píxel representa una unidad cuadrada.
  - área escaneada: área de la imagen entera expresada en unidades reales. Este valor es igual al producto (**Resolución X x Paso de X**) (**Resolución Y x Paso de Y**)
  - Numero de hoyos: numero de hoyos dentro de una partícula.
  - área de los hoyos: área total de los hoyos dentro de una partícula.
  - área total: área de una partícula incluyendo el área de sus hoyos. Este valor es igual a área de las partícula + área de hoyos
  
- Longitudes
  - perímetro de las partículas: longitud del contorno exterior de una partícula.
  - perímetro de hoyos: suma de los perímetros de los hoyos dentro de una partícula.
  - Amplitud: distancia entre el píxel más a la izquierda y el píxel más a la derecha en una partícula. La amplitud es además igual al lado horizontal del rectángulo horizontal más pequeño que contenga la partícula, o la diferencia  $MaxX - MinX$ .
  - Altura: distancia entre el píxel superior y el píxel inferior en una partícula. Es además igual al lado vertical del rectángulo



horizontal más pequeño que contenga a la partícula. O la diferencia  $maxY - minY$ .

- Coordenadas

- Centro de Masa (X,Y): coordenadas de centro de gravedad de una partícula, el centro de gravedad de una partícula compuesta de N píxeles  $P_i$  es definido como el punto G tal que

$$\overline{OG} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} \overline{OP_i}$$

y el centro de masa

$$X_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} X_i$$

$X_G$  da la ubicación promedio de los puntos centrales del segmento horizontal en una partícula.

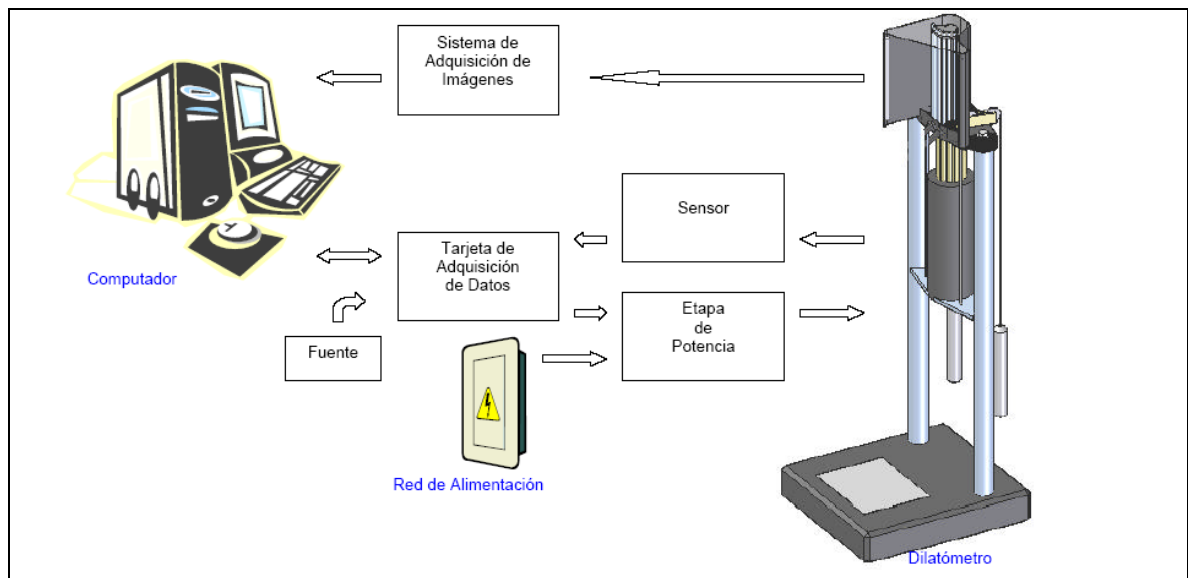
$$Y_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} Y_i$$

$Y_G$  da la localización promedio de los puntos centrales de los segmentos verticales en una partícula.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DEL ANTERIOR PROYECTO

A continuación se presentan los elementos que conforman el Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu y el prototipo anterior (Figura 11) con base en el procedimiento de la prueba expuesta en el documento resultado del anterior proyecto. Además se incluye el estado inicial de los mismos.

Figura 11. Diagrama de bloques del sistema



Fuente: Autor del proyecto

#### 3.1. SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO

##### 3.1.1. Requerimientos de la aplicación

En la prueba de Dilatometría se debe medir la contracción y dilatación de muestras de carbón. El sistema mecánico del equipo permite transmitir dichos eventos a unos pistones metálicos sobre los cuales se debe medir el desplazamiento. Éstos a su vez, se desplazan sobre unas guías también metálicas. En la siguiente imagen se pueden observar las guías pistones.

Figura 12. Pistones pertenecientes al Dilatómetro



Fuente: Autor del proyecto

- **CONDICIONES DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES**

Distancia de Trabajo: <450 mm

Campo de vista horizontal: 200 mm

Resolución: ~1mm

Profundidad de campo: ~20mm

### **3.1.2. Adquisición y tratamiento de imágenes**

Se encontró implementada una aplicación con IMAQ Vision como software de adquisición y tratamiento de imágenes, el cual es una librería de LabVIEW que permite desarrollar aplicaciones de visión de máquina y aplicaciones científicas con procesamiento de imágenes.

#### **3.1.2.1. TRATAMIENTO**

La estrategia encontrada para la medición del desplazamiento consiste en medir el centro de masa de unas marcas ubicadas en el extremo de los pistones. Aprovechando la teoría de colores oponentes, el método para



segmentar dichas marcas consiste en hacer una operación lógica con los diferentes planos de color de la imagen binarizados.

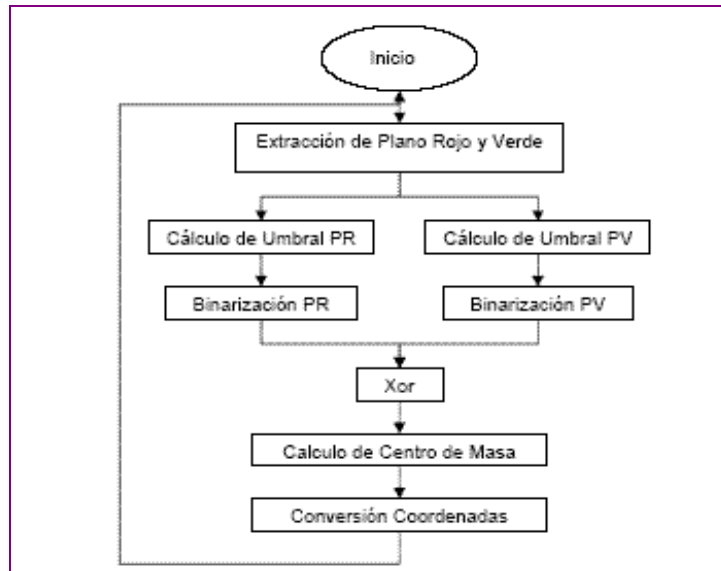
El color encontrado para las marcas, es el verde, La forma de las marcas es rectangular debido a que la naturaleza de la medición es de nivel.

Como la guía sobre la que se desplaza el pistón es metálica, su color se asocia a un nivel de gris, por lo que su aporte en cada plano de color es muy similar. De manera que si se extrae el plano de color rojo y se binariza, se obtiene una imagen en la que se observan las guías y las marcas.

De igual manera, si se extrae el plano de color verde y se binariza, se observan solo las guías ya que el aporte de las marcas al plano de color opuesto es mínimo. Así, para obtener solo las marcas se realiza una operación XOR entre los planos binarios y se obtiene una imagen solo con las marcas. Se realiza un filtrado de objetos indeseados del proceso con VI IMAQ Count Objects, El cual además localiza, cuenta, y mide objetos en un área de búsqueda rectangular. La opción de filtrado da la capacidad de ignorar objetos más pequeños o más grandes que los tamaños predefinidos.

Una vez se ha determinado el centro de masa de las marcas se debe asociar la información de calibración. A continuación se presenta el diagrama de flujo del algoritmo que se encontró implementado en LabVIEW®.

Figura 13. Diagrama de flujo segmentación de marcas anterior proyecto



Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu

## 3.2. CONTROL DE TEMPERATURA

### 3.2.1. Actuador

Ya que el elemento calefactor consiste en una resistencia que se calienta por circulación de corriente se tiene que:

Fórmula 1. Ecuaciones de corriente y de Temperatura

$$\Delta tem = kI^2$$
$$I = \frac{V_{eff}}{R}$$

Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu



Por lo tanto para controlar la temperatura del horno se debe controlar la tensión eficaz aplicada a la resistencia. Para hacerlo, se encontró implementado un controlador bidireccional monofásico de onda completa, por medio de un TRIAC. Se encontró un TRIAC Q8040, que es de 800 Volts y 40 Amperios.

En este caso, si el voltaje de entrada es

Fórmula 2. Ecuación de Voltaje de entrada del Triac

$$v_s = \sqrt{2}V_s \text{Sen}\omega t$$

Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu

Para un ángulo de disparo al voltaje rms de salida esta dado por:

Fórmula 3. Voltaje de salida el Triac

$$V_o = V_s \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\text{sen}2\alpha}{2} \right) \right]^{1/2}$$

Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu

El circuito de disparo esta implementado por medio del circuito integrado TCA785 de SIEMENS. Este integrado proporciona las señales necesarias para poner en conducción el TRIAC con un ángulo de disparo controlado, a partir de un nivel de tensión Vc entre 0 y 5 VDC.

A partir de la red alterna senoidal, se genera una onda diente de sierra sincronizada con la red en los instantes de paso por cero. Esta señal se

compara con el nivel de tensión de tal forma que en el momento en que la rampa supera a  $V_c$ , se produce un pulso de tensión desplazado en el tiempo un ángulo  $\alpha$  con respecto del paso por cero de la señal senoidal. El ángulo de disparo del TRIAC esta dado por:

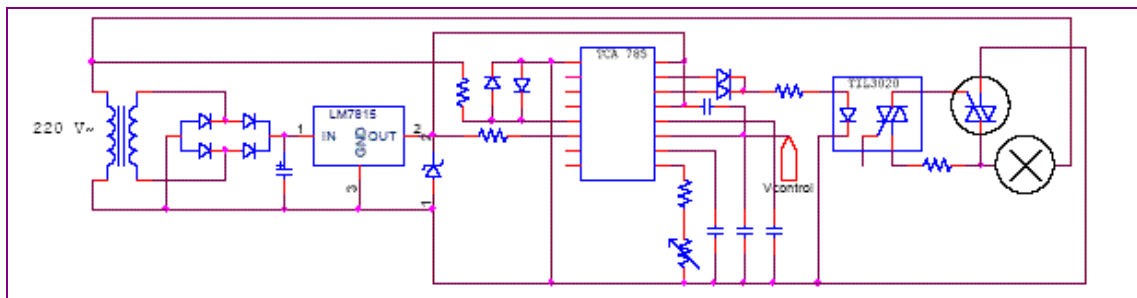
Fórmula 4. Angulo del disparo del Triac

$$\alpha(\text{seg}) = \frac{V_{\text{control}} R_9 C_{10}}{1.1 V_{\text{ref}}}$$

Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu

Donde  $V_{\text{ref}}$  corresponde al voltaje que hay en el pin 8 del TCA785, que corresponde a un nivel de continua de referencia de 3.1 V de valor típico. Como el TRIAC maneja una carga que consume una potencia de 3 KVA, se encontró un aislamiento entre el circuito de control y el circuito de potencia, el cual se realizó con un optotriac. Los TRIACs acoplados ópticamente combinan un diodo emisor de luz con un TRIAC foto-detector. Al no existir conexión eléctrica entre la entrada y la salida, el acople es seguro para los dispositivos presentes en el circuito y para el computador usado para el sistema.

Figura 14. Circuito de disparo del TRIAC





Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu

El TCA785 permite controlar el ancho de los pulsos de disparo variando capacitancia conectada al pin 12, o ampliarlos hasta 180° conectando dicho pin tierra. Para hacer más eficiente el disparo, se ajusto el ancho del pulso para realizarlo por “agujas”, con el ancho mínimo para que el TRIAC dispare correctamente. El ancho de pulso esta dado por:

..

Fórmula 5. Formula del ancho de pulso mínimo para el Triac

$$tp(\mu s) = \frac{C_{12}(pF)}{2} + 30$$

Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu

### 3.2.2. Sensor

El Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu originalmente tenía una termocupla de control tipo S, además cuenta un tubo dilatométrico adicional para alojarla. Las termocuplas más usadas industrialmente son la tipo J y la tipo K, y en el rango de temperatura de trabajo [25°C-800°C], la termocupla tipo K presenta un comportamiento más lineal. Se encontró una termocupla tipo K, con 30cm de revestimiento en INCONEL 600 y cable de extensión de 1.80m en fibra de vidrio con malla. El INCONEL 600 aguanta hasta 1.100°C y la fibra de vidrio con malla hasta 550°C de temperatura ambiente.

### 3.2.3. Acondicionador

El principal inconveniente de las termocupla es su necesidad de "compensación de cero". Esto se debe a que en algún punto, se empalman los cables de la termocupla con conductores de otros materiales, además se sufre otro efecto causado por la diferencia entre la temperatura ambiente y la

que esta siendo medida ambas generan un nivel de tensión. Para esto, se cuenta con el circuito integrado AD595C que combina una referencia de punto frío para compensar los efectos antes mencionados y un amplificador precalibrado que además linealiza la señal de temperatura para producir una variación de 10mV/°C. En la ecuación se presenta la función de transferencia que puede usarse para determinar el voltaje de salida del integrado.

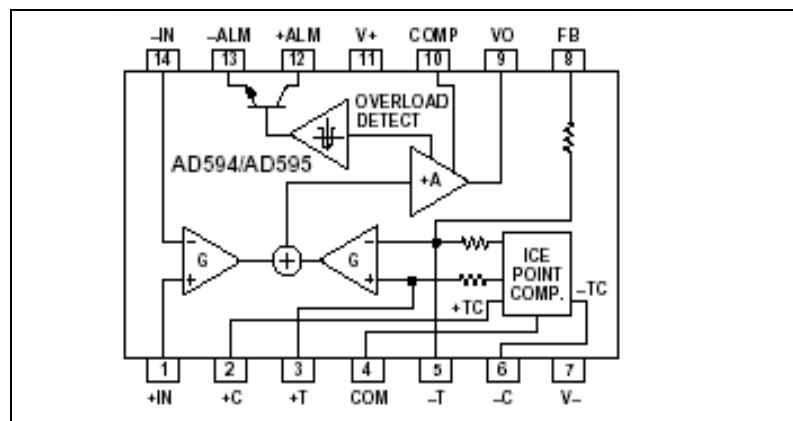
Fórmula 6. Formula del voltaje de salida del AD595

$$V_{out\_AD595} = (VoltajeSalidaK + 11\mu V) * 247.3$$

Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu

..El diagrama de bloques del integrado se presenta a continuación.

Figura 15. Diagrama de Bloques del AD595



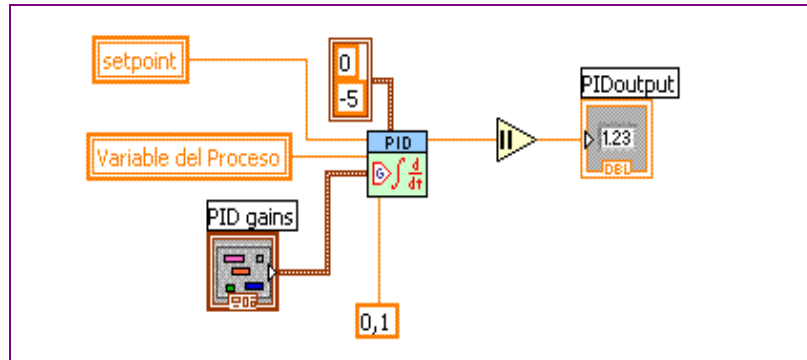
Fuente: Analog Devices

### 3.2.4. Control

El VI PID implementa un algoritmo PID básico, cuyas entradas son el valor deseado, la variable del proceso, y las constantes PID.

### 3.2.5. Controlador

Figura 16. Controlador



Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu

El último elemento del sistema de control es el valor deseado. Para esto se emplea el VI *PID Setpoint Profile* que genera los valores del *setpoint* en función del tiempo para aplicaciones de control de tipo rampa, como es el presente caso.

A continuación se presentan los parámetros del controlador de la respuesta del sistema de control. Estos valores se tomaron del anterior proyecto en los cuales se consideraron óptimos para el desarrollo de y que fueron consolidados en la puesta en marcha del prototipo efectuada en el presente proyecto.

Tabla 1. Parámetros del controlador

| P    | I    |
|------|------|
| 0.08 | 0.01 |

Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu



### 3.3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

#### 3.3.1. Módulo analógico

- Filtro

El tipo de filtro existente es “Butterworth” ya que brinda una respuesta máximamente plana y de cuarto orden para obtener una alta pendiente de atenuación. Se encontraron implementados dos filtros de paso bajo de segundo orden en cascada, cuya función de transferencia esta dada por:

Fórmula 7. Función de transferencia de filtros pasa bajo

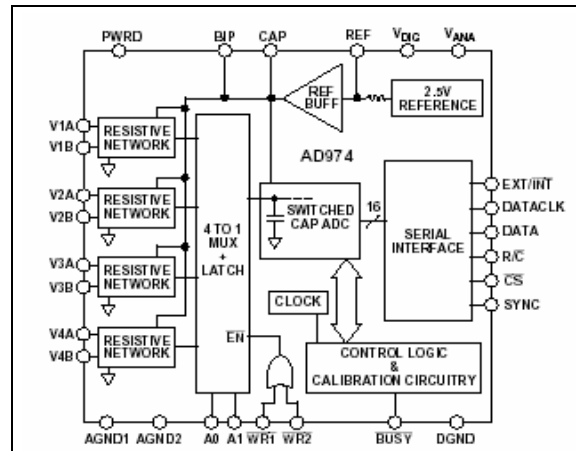
$$T(s) = \frac{a_0}{s^2 + s \frac{w_0}{Q} + w_0^2}$$
$$Ganancia_{CD} = \frac{a_0}{w_0^2}$$

Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu

- Conversor Analógico-Digital

El encontrado es el AD974 de Analog Devices ®, que es de 16 bits, rango de  $\pm 10V$  y cuatro canales. A continuación se presenta el diagrama de bloques funcional.

Figura 17. Diagrama de bloques funcional del AD974



Fuente: Analog Devices

Este convertor opera con una sola fuente de 5 volts, tiene interfaz serial y puede ser operado con unas pocas líneas de comando.

### 3.3.2. Módulo digital

El parámetro fundamental para determinar los elementos de este módulo es el tipo de interfaz con el computador. La interfaz usada es la RS232, la cual es frecuentemente usada, emplea un bajo número de líneas de conexión con el computador y el software empleado en este proyecto permite su adquisición de manera sencilla.

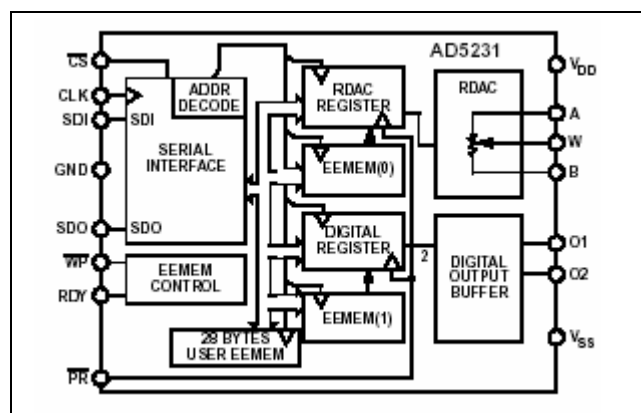
- Microcontrolador

La función del microcontrolador en la presente tarjeta es interconectar los diferentes elementos con el computador, ya que, el control es hecho por el computador. El encontrado es el MC68HC908GP32, que además cuenta con interfaz SPI que permite manejar periféricos fácilmente. Las aplicaciones que se usaron para programar el microcontrolador se encuentran en el ANEXO 2.

- Potenciómetro digital

El potenciómetro digital permite enviar la señal de control del PC al actuador descrito anteriormente. El potenciómetro encontrado es el AD5231 de Analog Devices, el cual tiene 1024 bits de resolución y puede ser ajustado modificando un registro de manera muy sencilla por medio de una interfaz serie. A continuación se presenta su diagrama funcional.

Figura 18. Diagrama de bloques funcional del AD5231



Fuente: Analog Devices

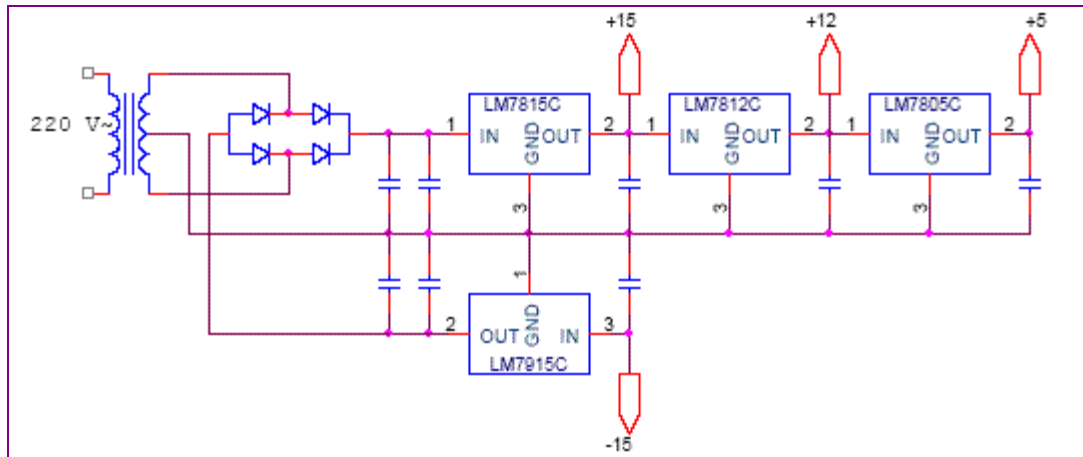
- Max232

Este circuito integrado permite acoplar los niveles de tensión de las señales del Microcontrolador y el computador para la comunicación por medio del puerto serie con la interfaz RS-232.

### 3.3.3. Módulo de alimentación

Este módulo es el encargado de suministrar energía a los demás módulos. En el circuito genera cuatro tensiones de alimentación en corriente continua de +5V, +12V, +15V y -15V.

Figura 19. Módulo de alimentación



Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu



## 4. ETAPAS DEL PROYECTO

### 4.1. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

En esta etapa se requiere que por medio de la configuración, de los elementos que componen el sistema de adquisición de imágenes, se consiga tener imágenes en tiempo real con las condiciones propicias de contraste, brillo, resolución y definición, con el fin de hacer un procesamiento adecuado. Los componentes que se tuvieron en cuenta en la configuración se describen a continuación.

#### 4.1.1. Cámara

Además de los requisitos del sistema, se caracterizarán los componentes ya existentes. La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales tiene una cámara de video CCD destinada a este proyecto. Las principales características son las siguientes:

Tabla 2. Características de la cámara

|  |                     |
|--|---------------------|
| <b>Sensor</b>                                | 1/3" CCD Color      |
| <b>Tamaño del Sensor (Horz x Vert en mm)</b> | 4.82 x 3.64         |
| <b>Resolución</b>                            | 380 líneas          |
| <b>píxeles</b>                               | 290,000             |
| <b>Tipo de Montura</b>                       | C y CS              |
| <b>Formatos</b>                              | EIA/NTSC - CCIR/PAL |

Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu

Es importante integrar elementos con el mismo nivel de desempeño. Por lo tanto, se consideran las características de la cámara como el factor limitante



de la resolución del sistema y no vale la pena que los elementos adicionales ofrezcan características superiores a ésta, ya que sería un malgaste de recursos.

$$Re\ s.Horiz.Camara(lp/mm) = \frac{LineaTVHorizx1.3333}{2xTamañoSensor(Horiz)} = \frac{380x1.3333}{2x4.82}$$

$$Re\ s.Camara(\mu m) = \frac{1000}{Re\ sCamara(lp/mm)} = \frac{1000}{52.54} \approx 19.03$$

$$PMAG = \frac{TamañoSensor(Horiz,mm)}{FOV(Horiz,mm)} = \frac{4.82}{200} = 0.0241$$

A partir de estas ecuaciones se obtiene que,

$$Re\ s.Sistema(\mu m) = \frac{Re\ sCamara(\mu m)}{PMAG} = \frac{2x1000xFOV(Horiz,mm)}{LineaTVHorizx1.333} = 789.63$$

#### 4.1.2. Lente

El siguiente elemento en consideración es el lente. Para seleccionar el lente los criterios del sistema básico que deben estar claros son el campo de vista, la distancia de trabajo, la profundidad de campo, y la resolución del objeto, los cuales se definieron en los requisitos del sistema. La información adicional que ayuda a seleccionar el lente es el tamaño y peso, capacidad de enfoque, capacidad de zoom, control del iris, y costo.

Como se necesita inspeccionar objetos a diferentes distancias se tiene un lente que puede mantener la calidad de la imagen en los diferentes planos de las guías. Para aumentar la profundidad de campo del sistema se puede cerrar el iris del lente pero debe aumentarse la iluminación para compensar esto. Por estas razones se tiene un lente con capacidad de enfoque e iris ajustable.



El fabricante del lente presente es **Edmund Industrial Optics**. En su guía del lente hay varios parámetros que ayudan a caracterizar el lente, que son: Máximo formato CCD, Campo de vista (mm), PMAG o Campo de vista angular, Distancia de trabajo, posibilidad de enfoque, Iris ajustable y costo. El formato CCD del diseño del lente es mayor al de la cámara, es decir igual a 1/3", la distancia de trabajo es menor de 450mm. El Lente de video Varifocal NT57-675, cuyas principales características son las siguientes.

Tabla 3. Características del lente

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| <b>Distancia Focal</b>          | 2.8 - 12.0mm |
| <b>Max CCD</b>                  | 1/3"         |
| <b>Apertura f/# (C=cerrado)</b> | F1.3 - 16C   |
| <b>FOV Angular Horiz</b>        | 98.2 - 23.8  |
| <b>FOV en Min WD (mm)</b>       | 692 - 126    |
| <b>Min WD</b>                   | 0.3m         |

Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu

#### 4.1.3. Tarjeta de video

El siguiente elemento en consideración es la tarjeta video de imágenes. La tarjeta digitalizadora permite usar la señal de salida de la cámara en un computador para su posterior análisis.

Se tiene una tarjeta que maneja señales de video estándar, además sus librerías están abiertas para que la captura de imágenes se pueda hacer por software. La tarjeta DFG/LC1 de **The Imaging Source** tiene las siguientes características.



Tabla 4. Características de la tarjeta de Video

|                           |   |
|---------------------------|---|
| Formatos de video         | PAL/NTSC/SECAM, RS-170/CCIR, composite (CVBS), Y/C (S-VHS)  |
| Resolución Max de video   | 768x576 at (NTSC/RS170) 50Hz (PAL/CCIR), 640x480 at 60Hz  |
| Entradas Análogas         | 2x composite, 1x Y/C (multiplexed inputs)   |
| Conectores                | 2x female RCA (Cinch), 1x 4 pin S-VHS   |
| Software incluido         | Grab&View Light, ActiveX-based SDK, DLL-based SDK, VfW and WDM drivers, Capture filter (for MS filter graph editor), Codec (for MS filter graph editor) |
| Compiladores recomendados | MS Visual Basic, MS Visual Studio, Borland Delphi   |

Fuente: Sistema de Medición de Desplazamiento por medio de tratamiento de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu

La gran ventaja adicional que proporciona esta tarjeta es que se puede instalar la extensión IC LabVIEW para hacer la adquisición de imágenes desde este software.

#### 4.1.4. Iluminación

El siguiente elemento es la iluminación. Muchas veces se subestima la iluminación. Un escenario de iluminación apropiado puede aumentar el contraste de la imagen y la resolución, mejorando el comportamiento global del sistema.

Cada componente afecta la cantidad de luz incidente en el sensor y, por consiguiente, la calidad de la imagen del sistema. La abertura del lente tiene un impacto directo sobre la cantidad de luz incidente en la cámara. La iluminación debe aumentarse cuando la abertura del lente está cerrada. La sensibilidad mínima de la cámara también es importante determinando la

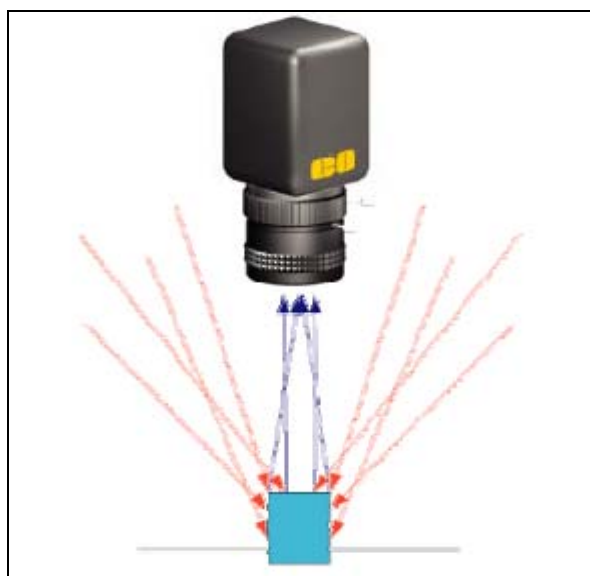
cantidad mínima de luz requerida en el sistema. Estos factores necesitan ser ajustados para acomodar objetos con diferentes características (perfil, reflectividad, etc.). Como la presente aplicación necesita Iluminación uniforme del objeto, el tipo de iluminación implementada es Difusa frontal o Difusa Axial.

#### 4.1.4.1. Iluminación difusa frontal

Difusa, iluminación uniforme desde una fuente extendida. La iluminación frontal significa simplemente que la fuente de luz esta en el mismo lado de la escena que la cámara.

- **Pros:** Reduce brillo, proporciona iluminación homogénea y minimiza sombras y reflexiones especulares.
- **Contras:** Grande y difícil de encajar en espacios confinados. Características de la superficie menos claras.
- **Tipo:** Fluorescentes lineales, fluorescentes en anillo.
- **Aplicaciones:** Buena para sistemas de imágenes grandes, objetos brillantes con distancias de trabajo grandes.

Figura 20. Iluminación difusa frontal



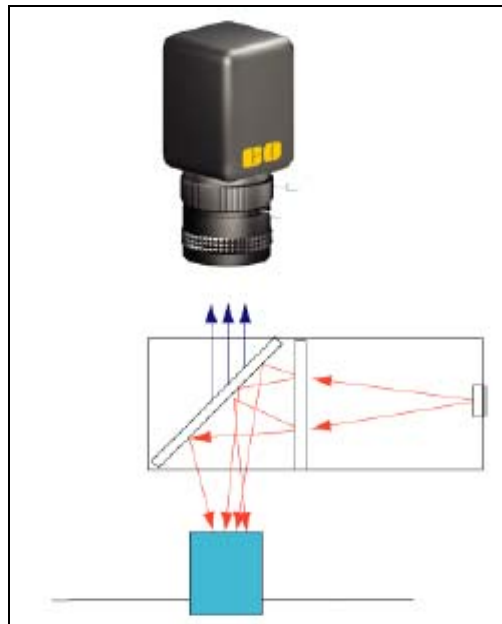
Fuente: *Edmund Industrial Optics*

#### 4.1.4.2. Iluminación difusa axial

Luz difusa en línea con los rayos ópticos. El lente se ubica al frente de un panel que refleja la luz hacia el objeto.

- **Pros:** Muy uniforme y difusa; reduce el sombreado; muy pocos brillos, luz intensa pequeña.
- **Contras:** Grande y difícil montar. Más baja intensidad a través del panel interior.
- **Tipo:** Fibra óptica axial difusa. Iluminadores simples o múltiples de fibra óptica. LED iluminador axial difuso.
- **Aplicaciones:** Medidas e inspección de objetos brillantes.

Figura 21. Iluminación difusa axial



Fuente: *Edmund Industrial Optics*

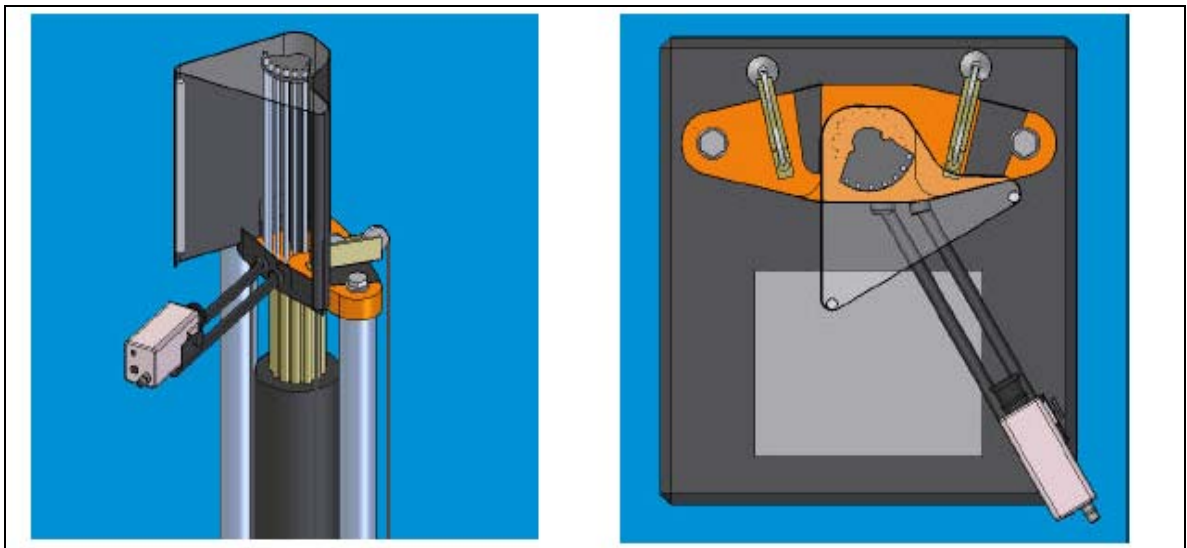
Como el objeto de interés es naturalmente muy reflexivo se usa iluminación difusa frontal para minimizar la especularidades en la imagen. La iluminación uniforme libre de sombras mejora la calidad de la imagen y permite aumentar

la exactitud de la medida. La luz frontal aumenta la cantidad de detalles pero anula la textura y los colores son reproducidos con gran brillantez. Esta iluminación se implementó con fluorescentes lineales.

#### 4.1.5. Ambiente controlado para fotografía

Como la iluminación tiene un impacto directo en la calidad de la imagen, es importante mantener las condiciones de iluminación constantes para resultados repetibles. Además, se debe evitar mezclar la luz fluorescente con fuentes de otra naturaleza. Por esto se tiene un sistema de ambiente controlado para la adquisición de las imágenes. El sistema que se tiene es el siguiente:

Figura 22. Esquema de ambiente controlado de fotografía



Fuente: Diseñador del sistema

Las lámparas fluorescentes seleccionadas son de 6 W, delgadas y de 24 cm. Se tiene la caracterización de la lámpara. De este patrón de iluminación se concluyó que la ubicación más conveniente del tubo fluorescente es centrada con respecto a las guías metálicas sobre las que se desplazan los pistones,

esto, debido a que la iluminación hacia los extremos del fluorescente decrece considerablemente.

La cantidad de luz es menor que la producida en la anterior implementación, debido a que las lámparas tienen menos potencia, lo que reduce las dificultades con el brillo, y ayuda a mejorar el contraste de la imagen.

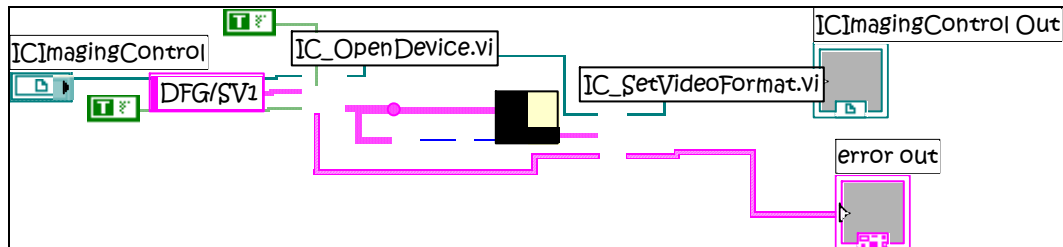
## 4.2. ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES

Se implementó una aplicación con IMAQ Vision como software de adquisición y tratamiento de imágenes, el cual es una librería de LabVIEW que permite desarrollar aplicaciones de visión de máquina y aplicaciones científicas con procesamiento de imágenes.

### 4.2.1. Adquisición

La adquisición está implementada con la extensión IC LabVIEW la cual consiste en una serie de VI's que permiten usar todas las funciones de la tarjeta de video Imaging Control en LabVIEW. Este VI implementado realiza la adquisición de imágenes. De manera que con unas pocas funciones se selecciona el dispositivo de captura, el tipo de imagen, el formato de video y se graban imágenes. A continuación se muestra el VI que se implementó para esta labor:

Figura 23. VI de adquisición de imágenes





Fuente: Diseñador del sistema

Además de realizarse la captura con este VI, también se realiza el enfoque de la región de interés con la ayuda del lente, y se adecua las condiciones de brillo de la imagen con la ayuda del iris del lente.

#### 4.2.2. Calibración

La tarjeta digitalizadora y el software de medida se usan para hacer la medición del desplazamiento de los pistones. Una vez configurado el sistema, el primer paso es calibrarlo. Calibrar es importante cuando se necesita hacer mediciones precisas en unidades del mundo real.

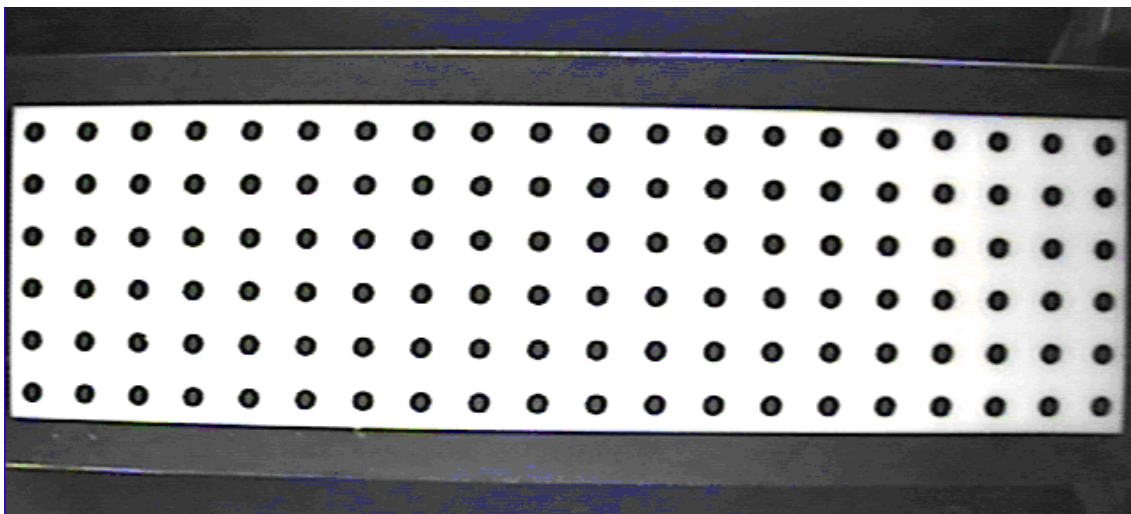
La calibración se lleva a cabo con la ayuda de una grilla de puntos de distancia especificadas a continuación:

Tabla 5. Distancia entre puntos

|                               |         |
|-------------------------------|---------|
| PROMEDIO DISTANCIA HORIZONTAL | 9.74 mm |
| PROMEDIO DISTANCIA VERTICAL   | 9.76 mm |

Fuente: Diseñador del sistema

Figura 24. Grilla de puntos

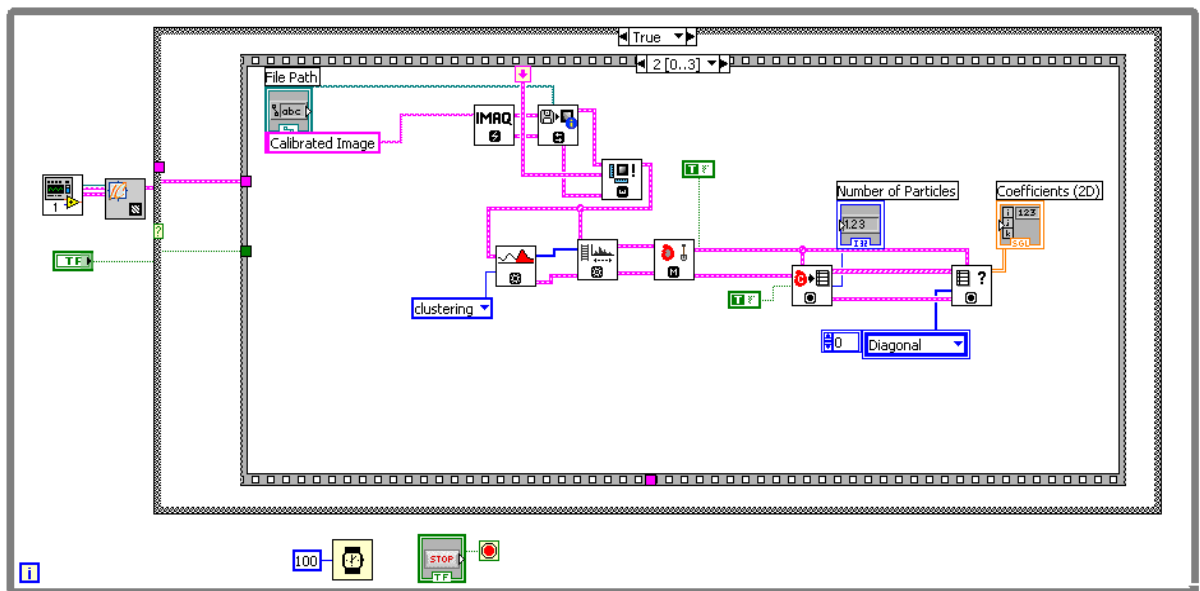


Fuente: Diseñador del sistema

y con un VI que se elaboró, con el fin que el usuario seleccione una región de interés que encierre todos los puntos de la grilla y para los cuales se tiene información de calibración.

A continuación se muestra el VI que se desarrollo para esta labor

Figura 25. VI para calibración del sistema de medición de desplazamiento

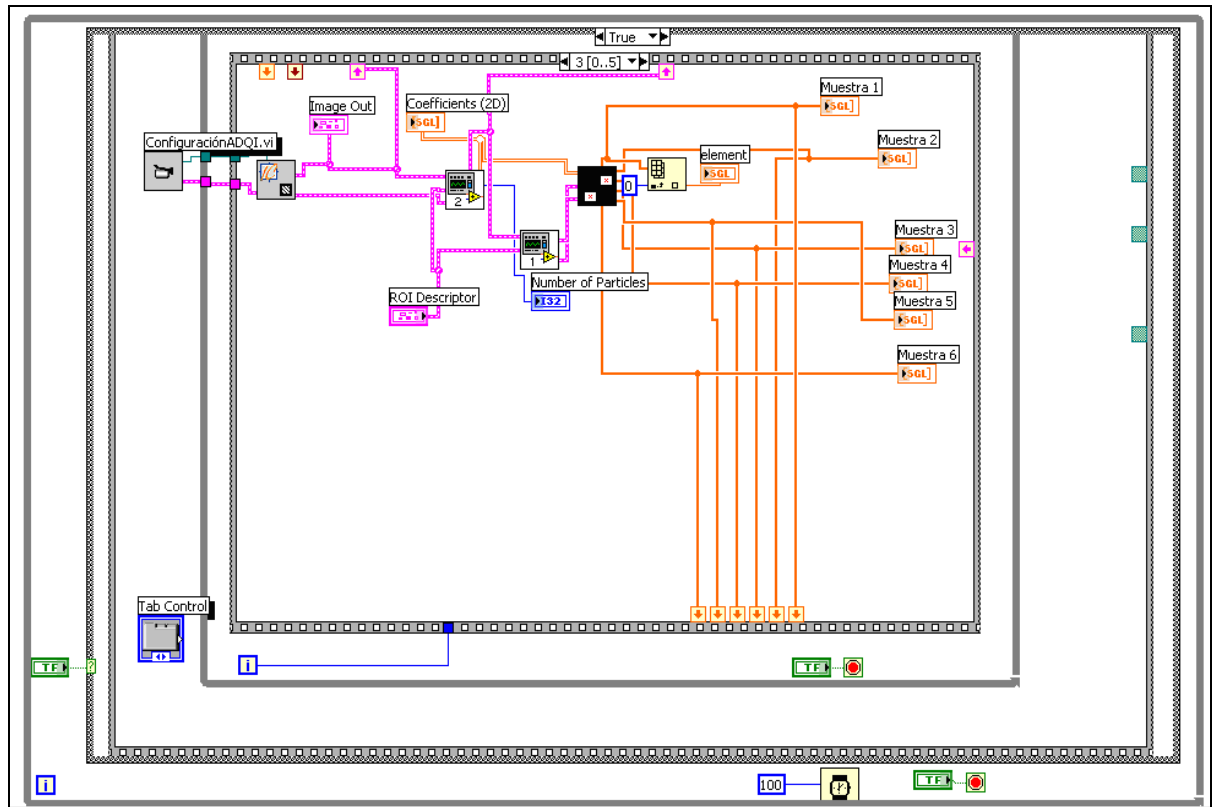


Fuente: Diseñador del sistema

#### 4.2.3. Tratamiento digital de imágenes

El tratamiento digital se realizó en LabVIEW con ayuda de la extensión IMAQ Vision, se realizó mediante un conjunto de VI's cuya función es capturar imágenes en tiempo real, segmentar las marcas, medir el movimiento de las marcas y transformar a medidas del mundo real el desplazamiento. El VI se muestra a continuación:

Figura 26. VI para el tratamiento digital de imágenes



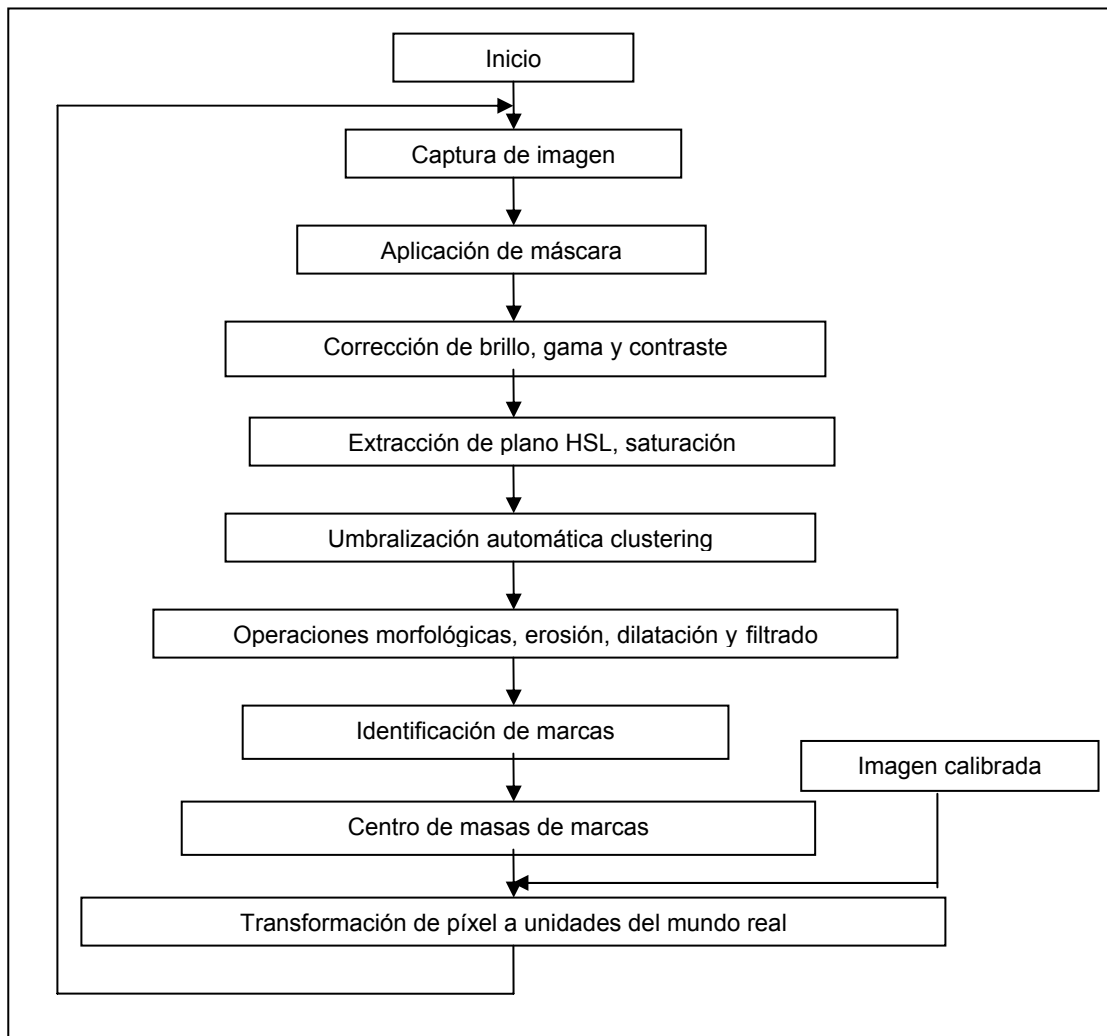
Fuente: Diseñador del sistema

#### 4.2.4. Segmentación y medición

Este VI se encarga de tomar las imágenes a color, extraer la región de interés con el fin de aislar los objetos de interés de objetos de alrededor que pueden representar fuentes de error, corregir las condiciones de brillo, gama y contraste con el fin de dar mayor calidad a la imagen que será segmentada, extracción de planos, para este caso se trabajó en el espacio HSL, por las características expresadas en secciones anteriores y se extrajo el plano de saturación. Se realizaron operaciones morfológicas más específicamente erosiones con el fin de obtener las marcas y remover de la imagen objetos indeseados, posteriormente se realizó una dilatación con el fin de devolver algunas de las características perdidas por los objetos por las erosiones. Se

realizó posteriormente un proceso de umbralización automática *Clustering* para realizar una identificación final de las marcas y realizar el proceso de medición final de los centros de masa de los objetos identificados que finalmente son las marcas del sistema.

Figura 27. Diagrama de flujo de segmentación de marcas

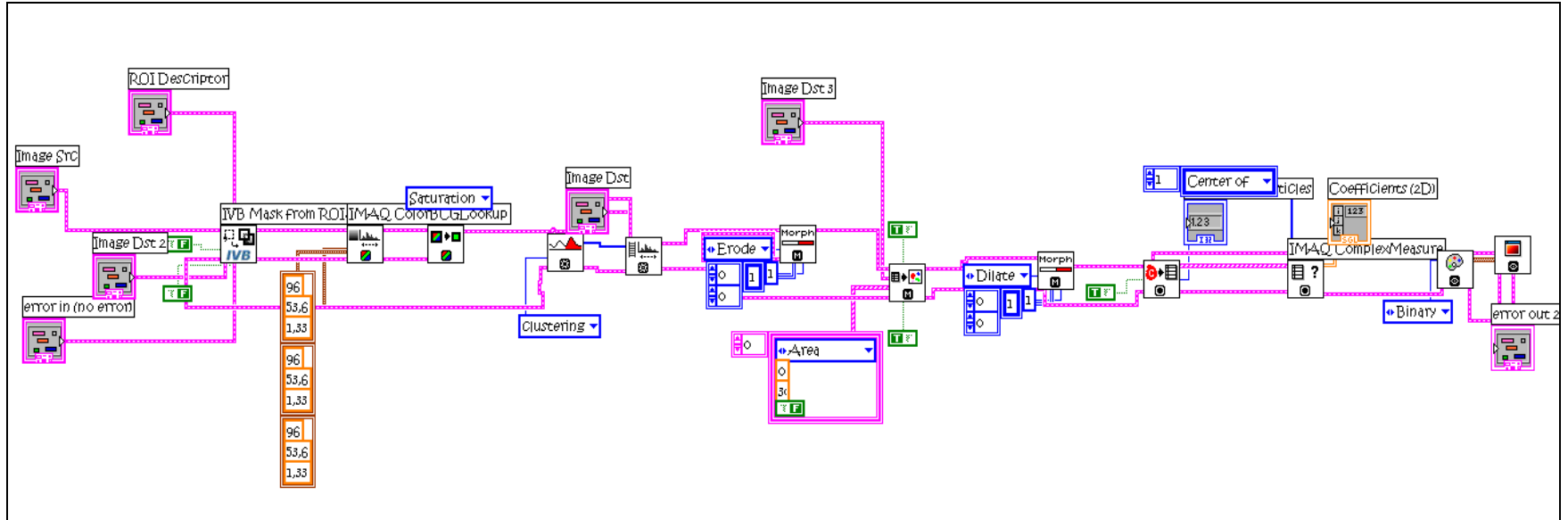


Fuente: Diseñador del sistema

A continuación se muestra el VI que se uso para esta labor:



Figura 28. VI de segmentación, identificación y medición de marcas



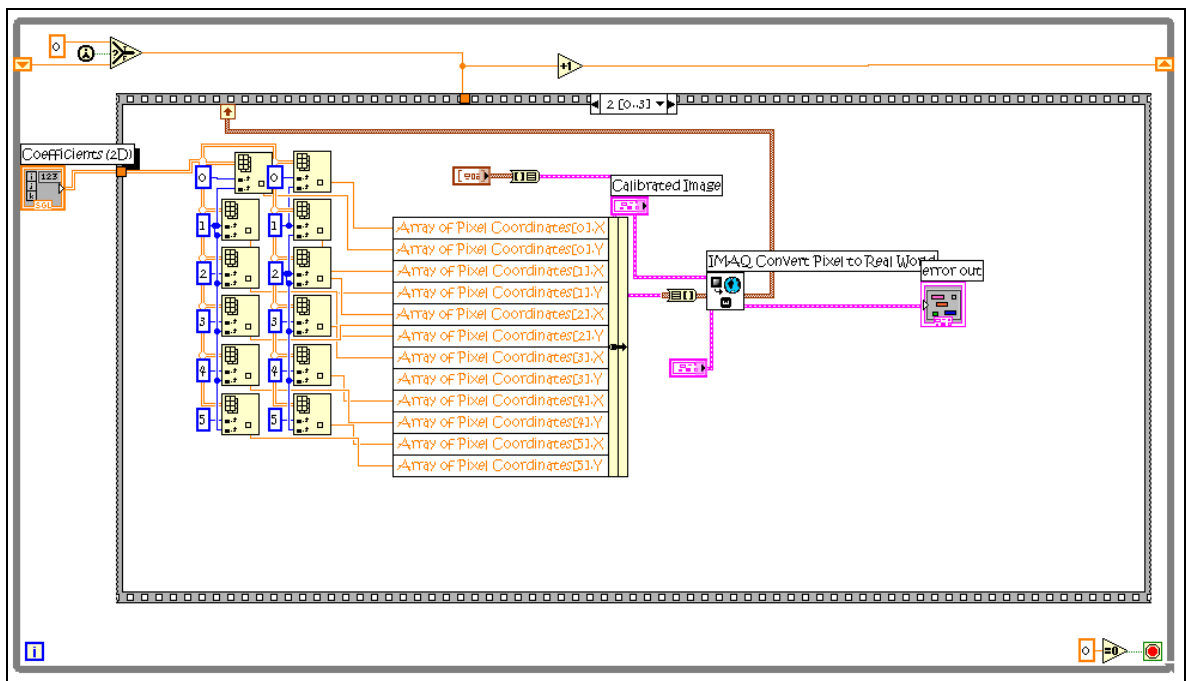
Fuente: Diseñador del sistema

#### 4.2.5. Transformación de píxel a unidades del mundo real

Este VI se encarga de procesar la información obtenida del VI de segmentación y medición, que es un arreglo bidimensional de datos, por medio de funciones que involucran manejo arreglos, cluster y elementos, e IMAQ *ConvertPixeltoRealWorld*. Este VI realiza la transformación de píxeles a unidades del mundo real, para posteriormente realizar un proceso que determina el movimiento de las marcas y un filtrado de las medidas para su posterior despliegue en una grafica del panel frontal.

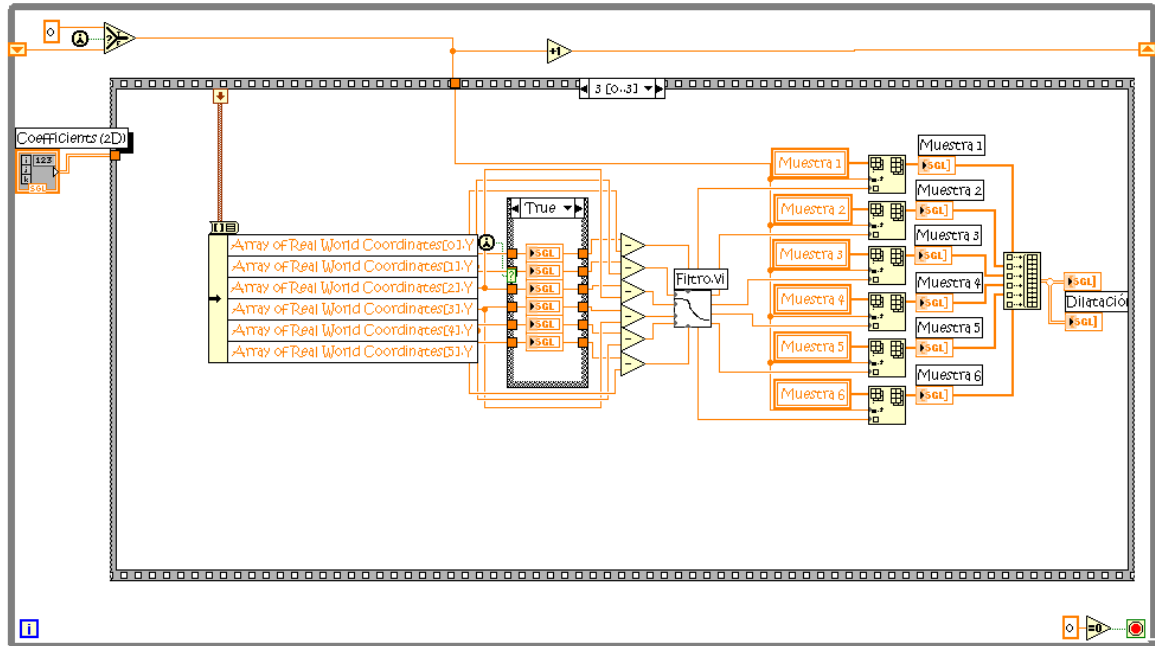
A continuación se muestra el VI que se uso para esta labor:

Figura 29. VI de transformación de píxel a coordenadas del mundo real



Fuente: Diseñador del sistema

Figura 30. VI de medición de desplazamiento y filtrado de las muestras

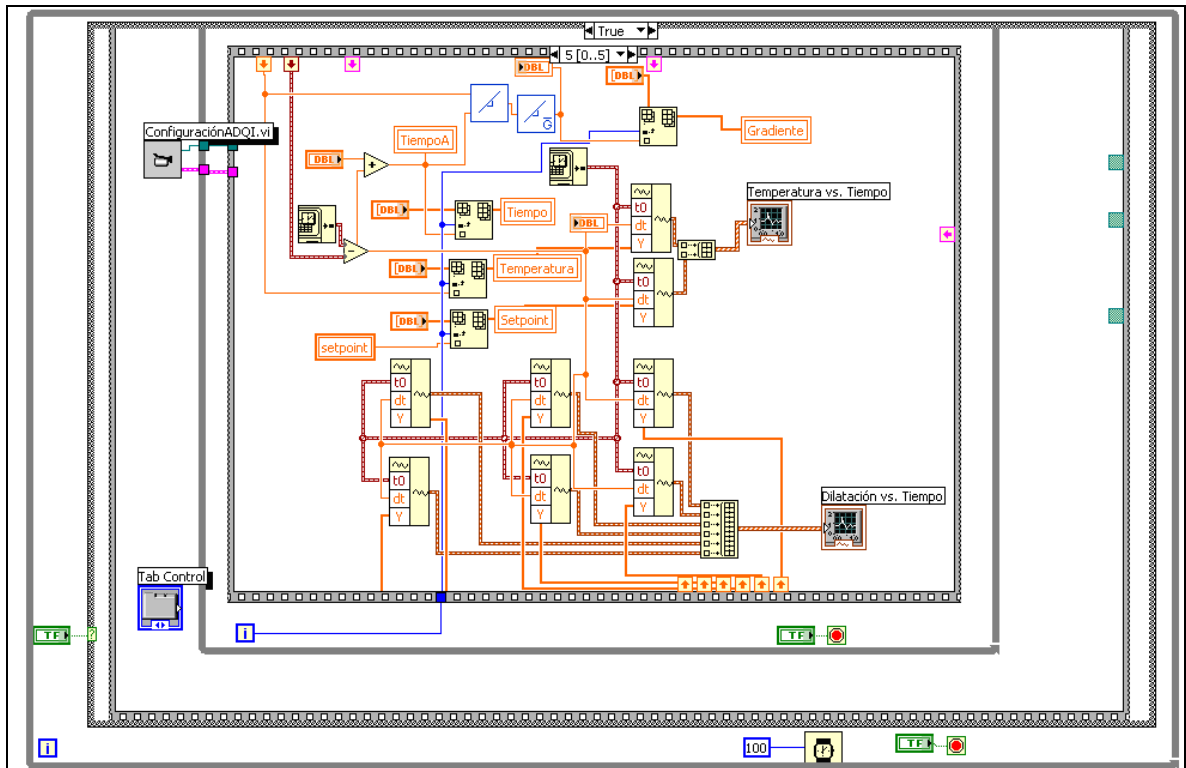


Fuente: Diseñador del sistema

#### 4.2.6. Despliegue de las graficas

Los resultados del procesamiento se despliegan en una grafica en donde se muestra la variación de la posición de las marcas, la medida de temperatura y una imagen de las marcas segmentadas, lo cual se realiza por medio del VI que se presenta a continuación:

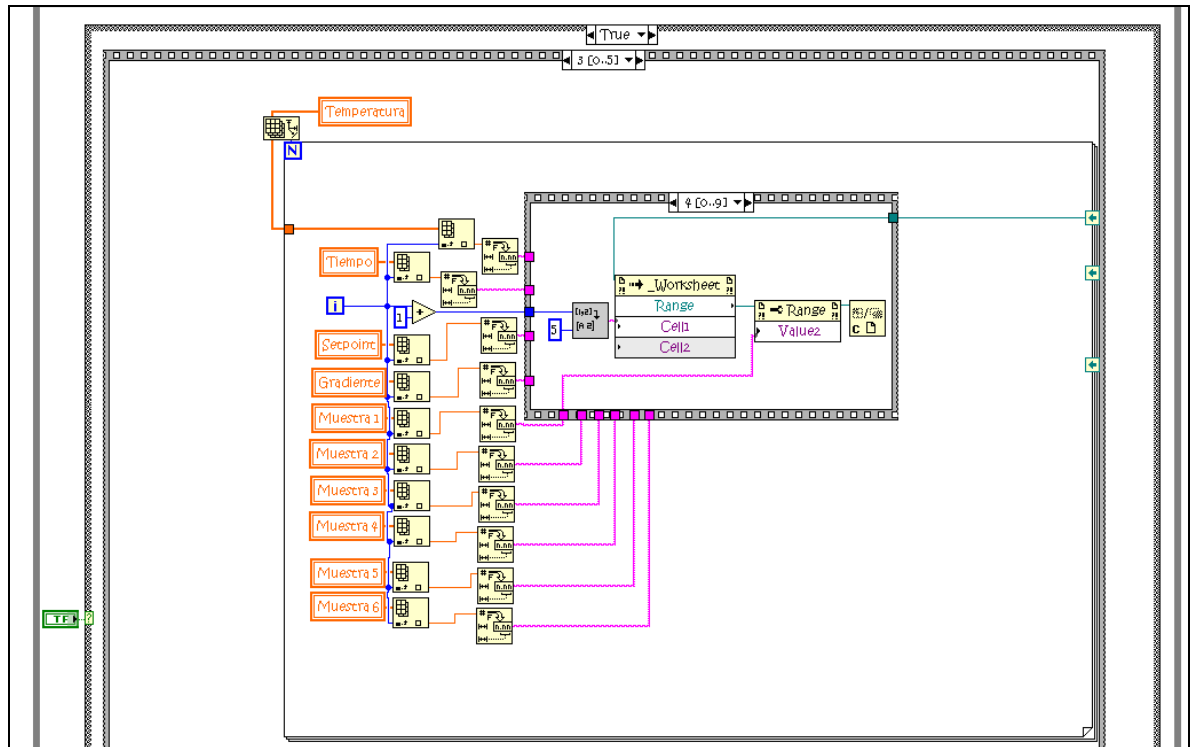
Figura 31. VI para despliegue de graficas y resultados



Fuente: Diseñador del sistema

Además se implemento un VI con el fin de desplegar los resultados obtenidos en una tabla de EXCEL para que los datos obtenidos sean analizados con esta herramienta. A continuación se muestra el VI implementado para el despliegue de los resultados en EXCEL:

Figura 32. VI de despliegue de resultados en EXCEL



Fuente: Diseñador del sistema

### 4.3. INTERFACES GRAFICAS

Para una fácil realización de las pruebas se tienen una serie de interfaces graficas por las cuales se configura el sistema de adquisición de imágenes en tiempo real, se calibra la imagen para la posterior medición, y se realiza la identificación de las marcas, además del despliegue de la dilatación de las marcas y de la temperatura.

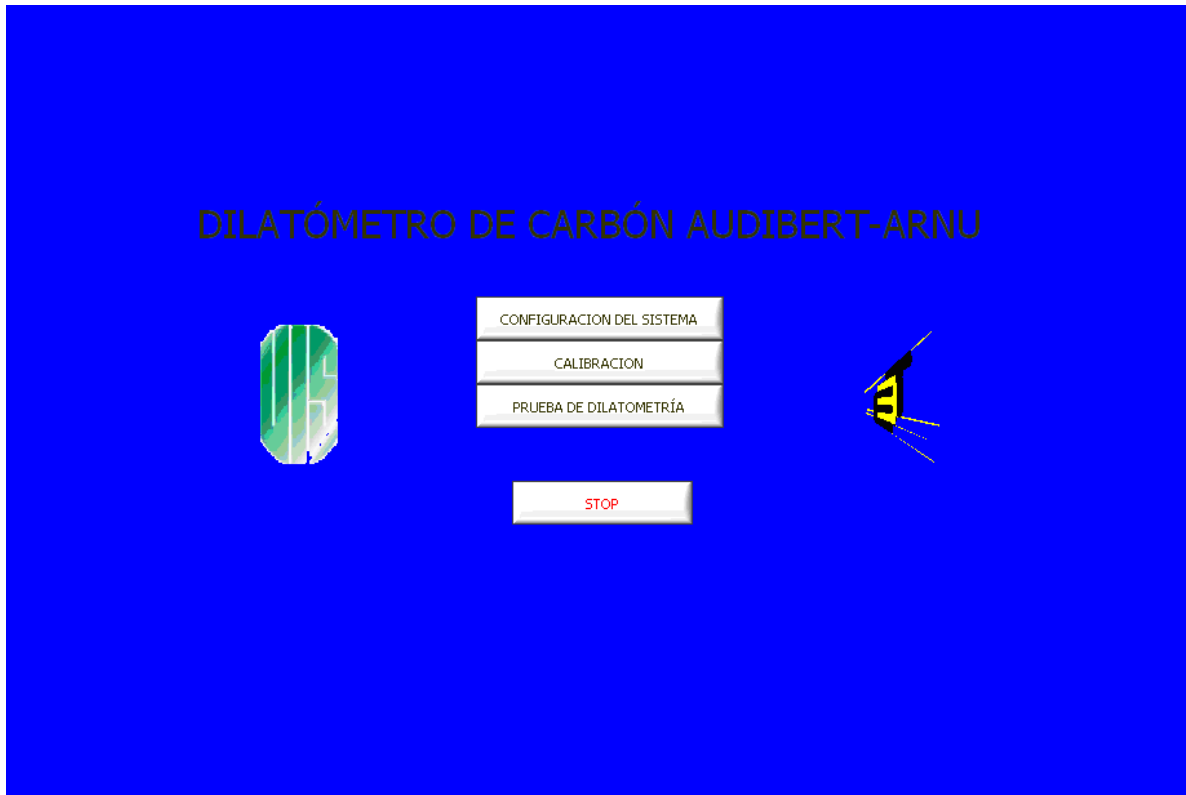
#### 4.3.1. Interfaz principal

Desde esta interfase que es la de inicio se accede a las demás interfaces que se describen mas adelante, será la primera pantalla que se desplegara el momento de ejecutar el programa de dilatometría.

A continuación se muestra la interfaz grafica:



Figura 33. Interfase principal



Fuente: Diseñador del sistema

#### 4.3.2. Interfaz de la configuración del sistema de adquisición

Esta interfaz permite modificar las condiciones de adquisición como el brillo y el enfoque, con ayuda del lente, de la base de la cámara, y la grilla de puntos con el fin de tener características adecuadas para el procesamiento que se realizara posteriormente. A continuación se muestra la interfaz grafica de configuración del sistema de adquisición

Figura 34. Interfase para la configuración del sistema de adquisición de imágenes

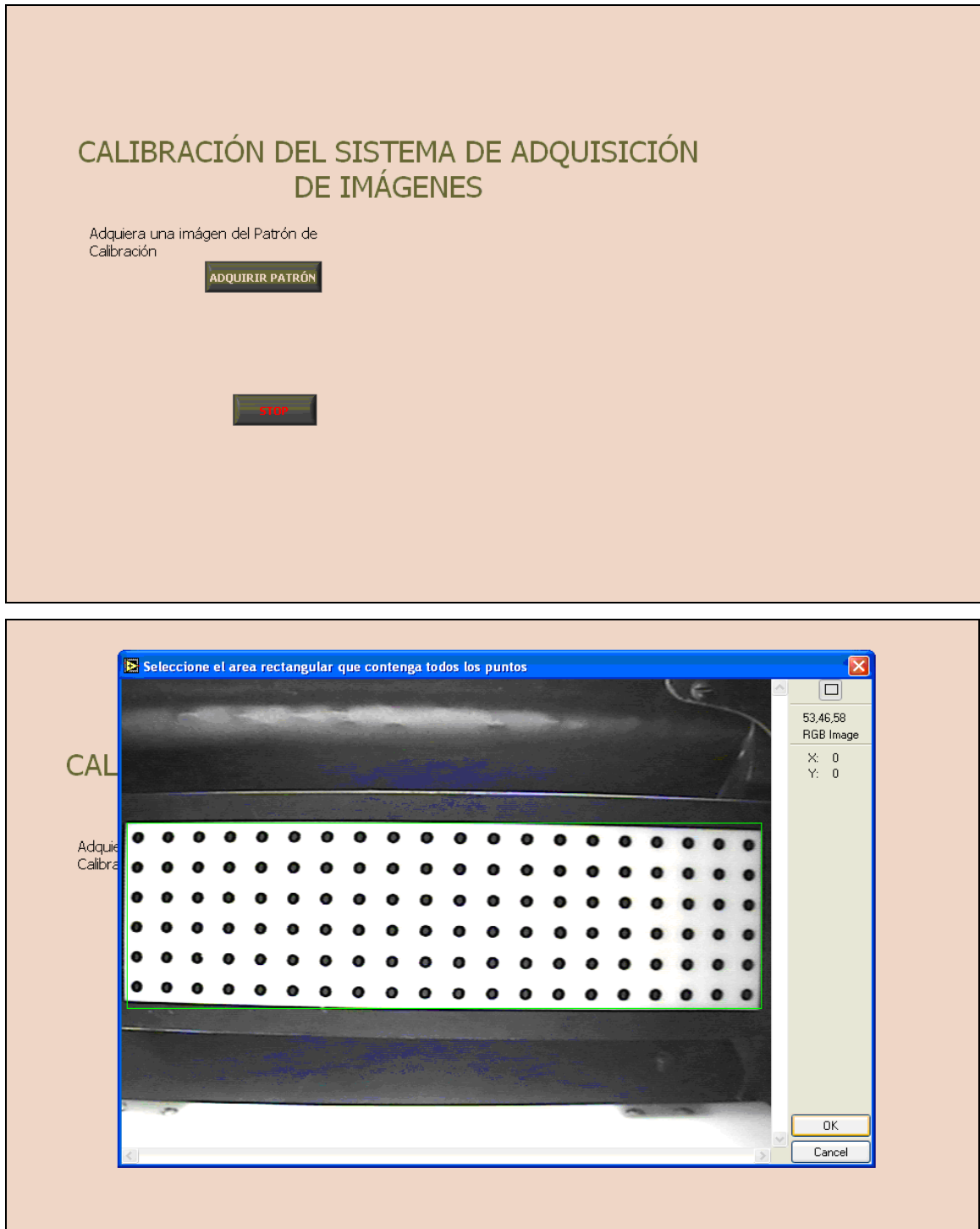


Fuente: Diseñador del sistema

#### 4.3.3. Interfaz grafica de calibración

Esta interfaz permite al usuario realizar la calibración de la imagen por medio de la determinación de una región de interés, que en este caso es la grilla de puntos y con la información de calibración contenida en la aplicación, y de esta manera realizar la transformación de píxel a medidas del mundo real. A continuación se muestra la interfaz para la calibración de la imagen.

Figura 35. Interfase para la calibración del sistema de medición de desplazamiento



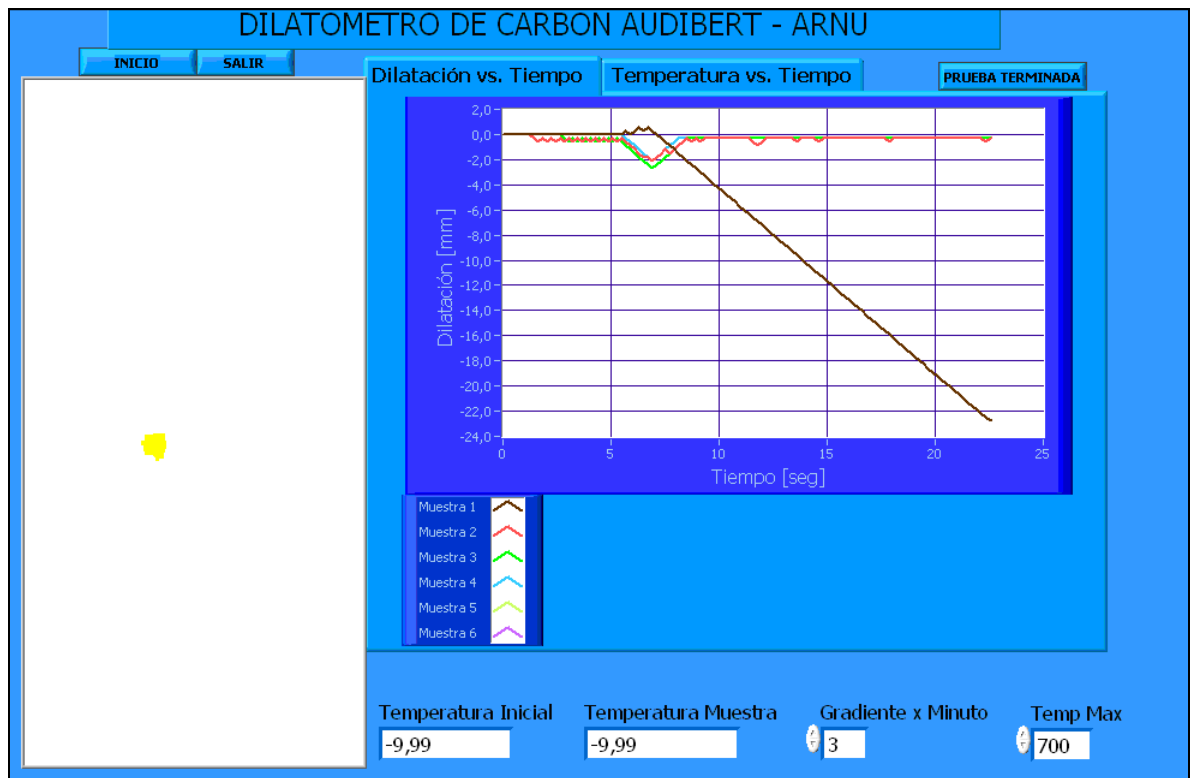
Fuente: Diseñador del sistema



#### 4.3.4. Interfaz de resultados

Esta interfaz permite ver al usuario en tiempo real las marcas segmentadas en una imagen binaria, además de ver los gráficos con los resultados de la prueba de dilatometría en donde se despliega la temperatura y la dilatación de las marcas contra el tiempo, además de desplegar una tabla de Excel con los resultados de la prueba en el momento en que esta se de por terminada. A continuación se muestran las interfaces

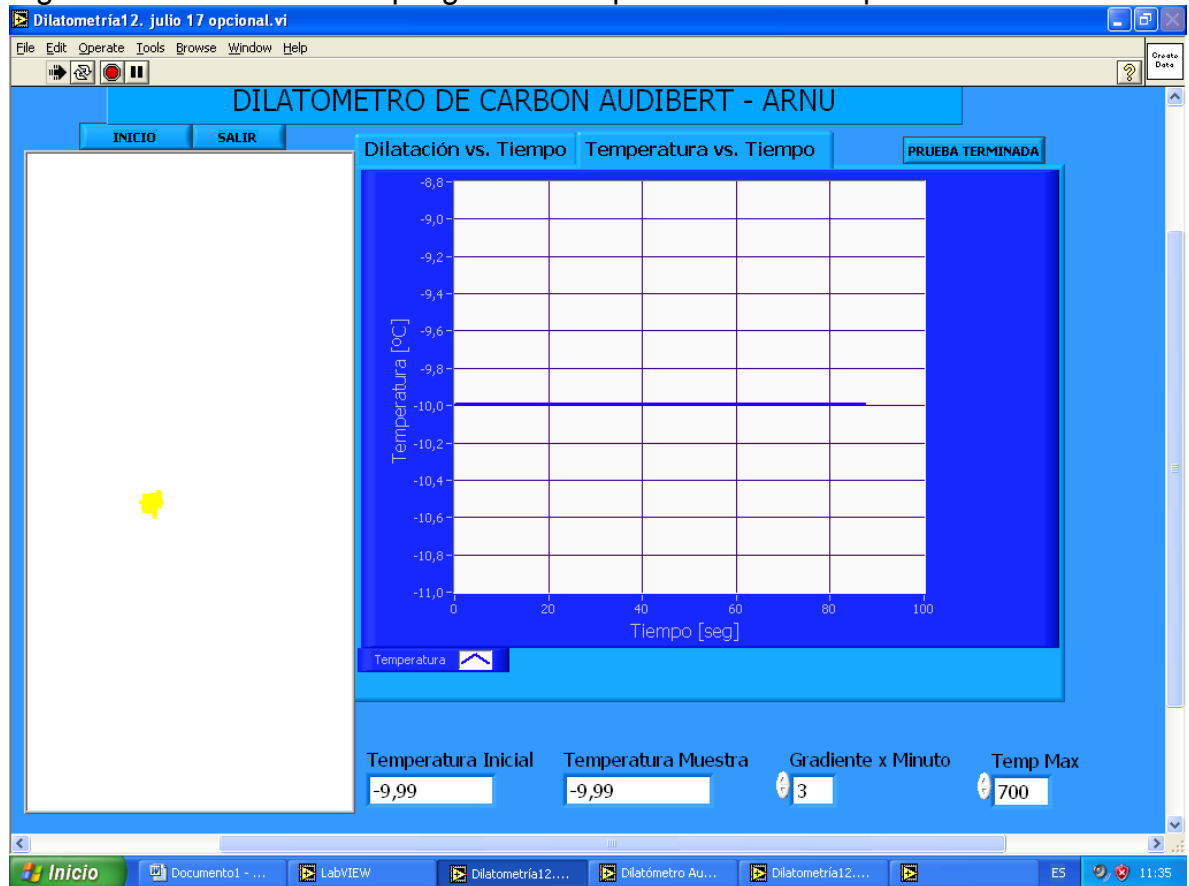
Figura 36. Interfase para el despliegue de los resultados de la prueba Dilatación vs. Tiempo



Fuente: Diseñador del sistema



Figura 37. Interfase de despliegue de Temperatura VS Tiempo



Fuente: Diseñador del sistema



Figura 38. Tabla de Excel con resultados de la prueba

|    | A          | B          | C          | D        | E          | F          | G          | H          | I          | J          | K | L |
|----|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---|---|
| 36 | 7.297.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 0,600000   | -0,600000  | -0,600000  | -0,600000  | -0,600000  | -0,600000  |   |   |
| 37 | 7.516.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 0,900000   | -0,900000  | -0,900000  | -0,900000  | -0,900000  | -0,900000  |   |   |
| 38 | 7.766.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 1.200.000  | -1.200.000 | -1.200.000 | -1.200.000 | -1.200.000 | -1.200.000 |   |   |
| 39 | 7.969.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 1.500.000  | -1.500.000 | -1.500.000 | -1.500.000 | -1.500.000 | -1.500.000 |   |   |
| 40 | 8.219.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 1.800.000  | -1.800.000 | -1.800.000 | -1.800.000 | -1.800.000 | -1.800.000 |   |   |
| 41 | 8.422.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 2.100.000  | -2.100.000 | -2.100.000 | -2.100.000 | -2.100.000 | -1.500.000 |   |   |
| 42 | 8.641.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 2.400.000  | -2.400.000 | -2.400.000 | -2.400.000 | -2.400.000 | -1.800.000 |   |   |
| 43 | 8.860.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 2.700.000  | -2.700.000 | -2.700.000 | -2.100.000 | -2.100.000 | -1.500.000 |   |   |
| 44 | 9.047.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 3.000.000  | -3.000.000 | -2.400.000 | -1.800.000 | -1.800.000 | -1.200.000 |   |   |
| 45 | 9.219.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 3.300.000  | -2.700.000 | -2.100.000 | -1.500.000 | -1.500.000 | 0,900000   |   |   |
| 46 | 9.407.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 3.600.000  | -3.000.000 | -1.800.000 | -1.200.000 | -1.200.000 | 0,600000   |   |   |
| 47 | 9.610.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 3.900.000  | -2.700.000 | -1.500.000 | 0,900000   | 0,900000   | 0,300000   |   |   |
| 48 | 9.828.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 4.200.000  | -2.400.000 | -1.200.000 | 0,600000   | 0,600000   | 0,300000   |   |   |
| 49 | 10.047.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 4.500.000  | -2.100.000 | 0,900000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 50 | 10.266.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 4.800.000  | -1.800.000 | 0,600000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 51 | 10.453.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 5.100.000  | -1.500.000 | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 52 | 10.641.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 5.400.000  | -1.200.000 | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 53 | 10.813.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 5.700.000  | 0,900000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 54 | 11.016.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 6.000.000  | 0,600000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 55 | 11.219.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 6.300.000  | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 56 | 11.391.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 6.600.000  | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 57 | 11.563.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 6.900.000  | 0,600000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 58 | 11.750.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 7.200.000  | 0,900000   | 0,600000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 59 | 11.985.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 7.500.000  | 0,600000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 60 | 12.172.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 7.800.000  | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 61 | 12.375.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 8.100.000  | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 62 | 12.593.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 8.400.000  | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 63 | 12.765.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 8.700.000  | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 64 | 12.953.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 9.000.000  | 0,600000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 65 | 13.171.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 9.300.000  | 0,900000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 66 | 13.406.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 9.600.000  | 0,600000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 67 | 13.578.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 9.900.000  | 0,900000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 68 | 13.750.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 10.200.000 | 0,600000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 69 | 13.938.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 10.500.000 | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |
| 70 | 14.156.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 10.800.000 | 0,600000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   | 0,300000   |   |   |

Fuente: Diseñador del sistema

#### 4.4. Pruebas y Resultados

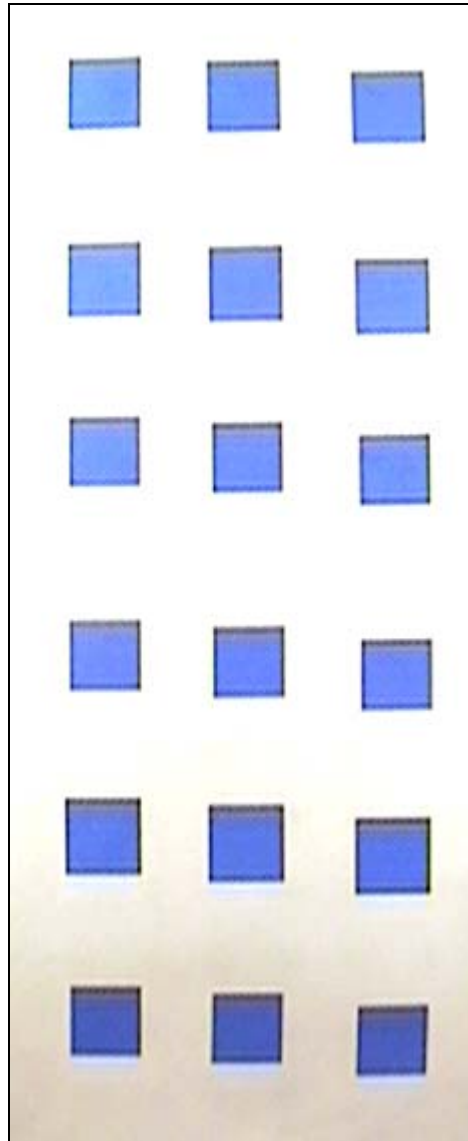
Esta sección muestra las pruebas realizadas al sistema implementado así como los resultados obtenidos durante el desarrollo de los mismos.

Las pruebas se concentraron en caracterizar el desempeño del sistema de medición de desplazamiento.

##### 4.4.1. Medición de distancia entre marcas

Esta prueba consistió en encontrar las distancias entre marcas, dispuestas de manera que simulan un efecto de movimiento. A continuación se muestran las marcas usadas en la prueba.

Figura 39. Marcas usadas para la prueba



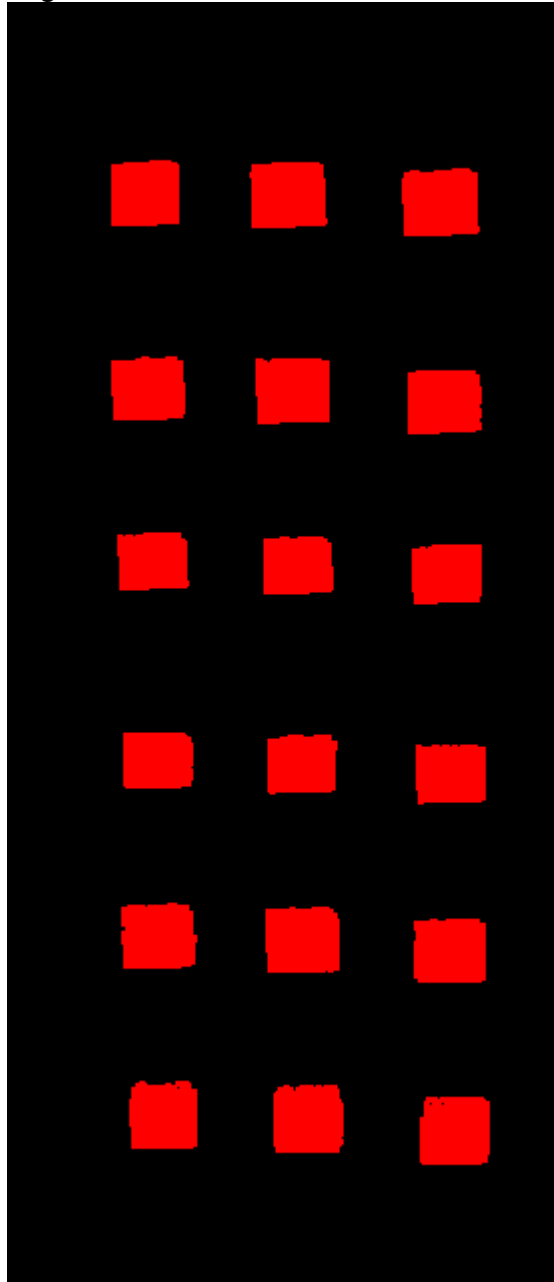
Fuente: Diseñador del sistema

Las marcas están agrupadas verticalmente en tres grupos de seis simulando el efecto de movimiento en esta dirección. La prueba busca medir la exactitud del sistema de medición a diferentes posiciones de las marcas, las marcas fueron hechas de tal manera que sus distancias verticales entre centros de área son conocidas. A continuación se muestran las marcas segmentadas. La identificación de las marcas es un paso previo a la medición de cualquier



parámetro, para esta prueba es distancias verticales del origen al centro de masa la requerida.

Figura 40. MARCAS SEGMENTADAS



Fuente: Diseñador del sistema

A continuación se muestran las distancias entre marcas encontradas por el sistema, para cada lado de la imagen (izquierdo, centro, derecho)



Tabla 6. Medidas de distancia entre marcas hechas por el sistema y por el calibrador (lado izquierdo)

| Distancia vertical de la marca al origen (mm) | Distancia en marcas medidas con el sistema (mm) | Distancias entre marcas conocidas (mm) | Diferencia entre medidas (mm) | Error encontrado (%) |
|---|---|--|-------------------------------|----------------------|
| 34,7219                                       |   |  |                               |                      |
| 64,5471                                       | 29,8252   | 27,94                                  | 1,8852                        | 6,74731568           |
| 90,3052                                       | 25,7581   | 24,979                                 | 0,7791                        | 3,11901998           |
| 120,228                                       | 29,9228   | 29,142                                 | 0,7808                        | 2,67929449           |
| 146,779                                       | 26,551  | 26,02                                  | 0,531                         | 2,04073789           |
| 173,763                                       | 26,984  | 27,323                                 | -0,339                        | 1,24071295           |
| Error promedio de marcas lado izquierdo       |   |  |                               | 3,1654162            |

Fuente: Diseñador del sistema

Tabla 7. Medidas de distancia entre marcas hechas por el sistema y por el calibrador (centro)

| Distancia vertical de la marca al origen (mm) | Distancia en marcas medidas con el sistema (mm) | Distancias entre marcas conocidas (mm) | Diferencia entre medidas (mm) | Error encontrado (%) |
|---|---|--|-------------------------------|----------------------|
| 33,5855                                       |   |  |                               |                      |
| 62,8444                                       | 29,2589   | 27,94                                  | 1,3189                        | 4,72047244           |
| 89,0823                                       | 26,2379   | 24,979                                 | 1,2589                        | 5,03983346           |
| 118,8   | 29,7177   | 29,142                                 | 0,5757                        | 1,97549928           |
| 145,159                                       | 26,359  | 26,02                                  | 0,339                         | 1,30284397           |
| 171,997                                       | 26,838  | 27,323                                 | -0,485                        | 1,7750613            |
| Error promedio de marcas centro               |   |  |                               | 2,96274209           |

Fuente: Diseñador del sistema

Tabla 8. Medidas de distancia entre marcas hechas por el sistema y por el calibrador y (lado derecho)

| Distancia vertical de la marca al origen (mm) | Distancia en marcas medidas con el sistema (mm) | Distancia entre marcas conocidas (mm) | Diferencia entre medidas (mm) | Error encontrado (%) |
|---|---|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 33,3528                                       |   |                                       |                               |                      |
| 62,6181                                       | 29,2653   | 27,94                                 | 1,3253                        | 4,74337867           |
| 88,4218                                       | 25,8037   | 24,979                                | 0,8247                        | 3,30157332           |
| 118,242                                       | 29,8202   | 29,142                                | 0,6782                        | 2,32722531           |
| 144,61  | 26,368  | 26,02                                 | 0,348                         | 1,33743274           |
| 171,493                                       | 26,883  | 27,323                                | -0,44                         | 1,61036489           |
| Error promedio de marcas lado derecho         |   |                                       |                               | 2,66399499           |

Fuente: Diseñador del sistema



De la prueba se encontró que el sistema realiza la segmentación de las marcas, mide distancia en píxeles y realiza la conversión a medidas del mundo real. A continuación se observa el error encontrado en la prueba

Tabla 9. Error de la prueba

|                      |            |
|----------------------|------------|
| Error lado izquierdo | 3,1654162  |
| Error centro         | 2,96274209 |
| Error lado derecho   | 2,66399499 |
| Error total          | 2,93071776 |

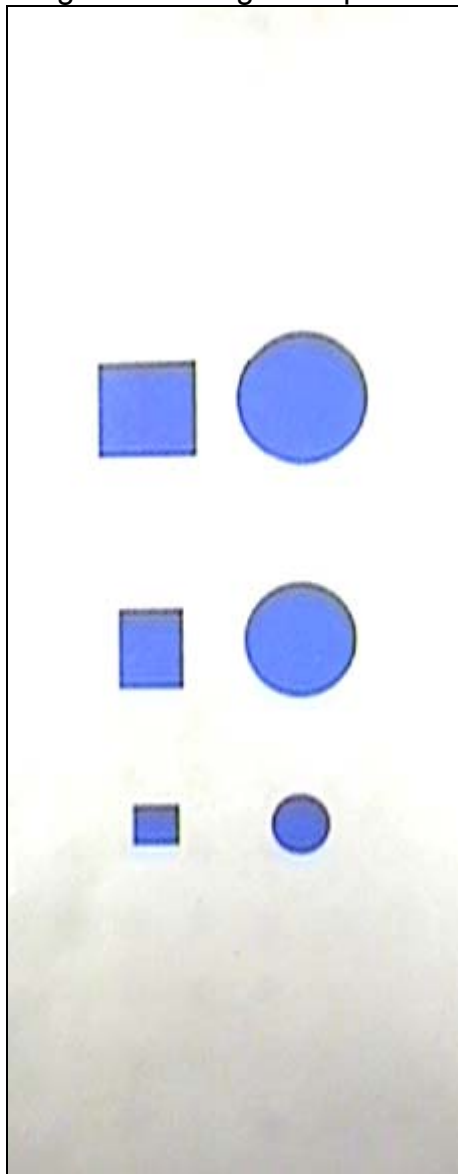
Fuente: Diseñador del sistema

Para el análisis de estos resultados se debe tener en cuenta los errores correspondientes de cualquier proceso de medición.

#### 4.4.2. Medición de perímetros

Esta prueba se llevo a cabo con la ayuda de una imagen con seis marcas de objetos de perímetros conocidos (tres rectángulos y tres círculos). El objetivo es obtener los perímetros de estos objetos conocidos con el fin de determinar la exactitud del sistema de medición en diferentes direcciones y conocer la capacidad de reconocimiento de objetos de diferentes formas y tamaños.

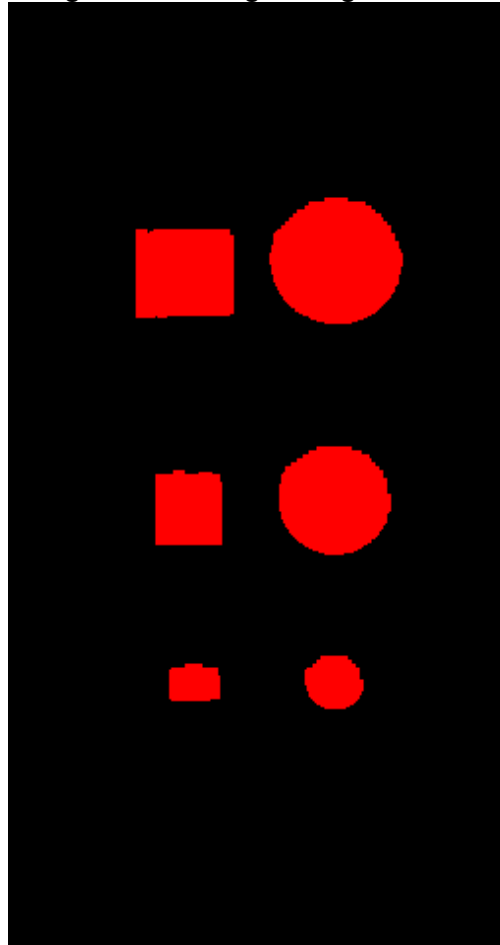
Figura 41. Imagen de prueba



Fuente: Diseñador del sistema

A continuación se muestran la imagen segmentada, y los resultados de la prueba.

Figura 42. Imagen segmentada



Fuente: Diseñador del sistema

Figura 43. Perímetro medido con el sistema y con el calibrador

| objeto             | Perímetro medido por el sistema (mm) | Perímetro medido conocido (mm) | Diferencia entre los perímetros (mm) | Error (%)  |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|------------|
| Cuadrado grande    | 54,8335                              | 57,764                         | -2,9305                              | 5,34436066 |
| Cuadrado mediano   | 41,44                                | 41,518                         | -0,078                               | 0,18822394 |
| Circulo pequeño    | 27,8757                              | 26,9769192                     | 0,8987808                            | 3,22424477 |
| Circulo mediano    | 53,0721                              | 51,5002488                     | 1,5718512                            | 2,96172791 |
| Circulo grande     | 62,603                               | 60,6391632                     | 1,9638368                            | 10,0241333 |
| Cuadrado pequeño   | 24,4891                              | 24,978                         | -0,4889                              | 1,9963984  |
| Error de la prueba |                                      |                                |                                      | 2,80865414 |

Fuente: Diseñador del sistema

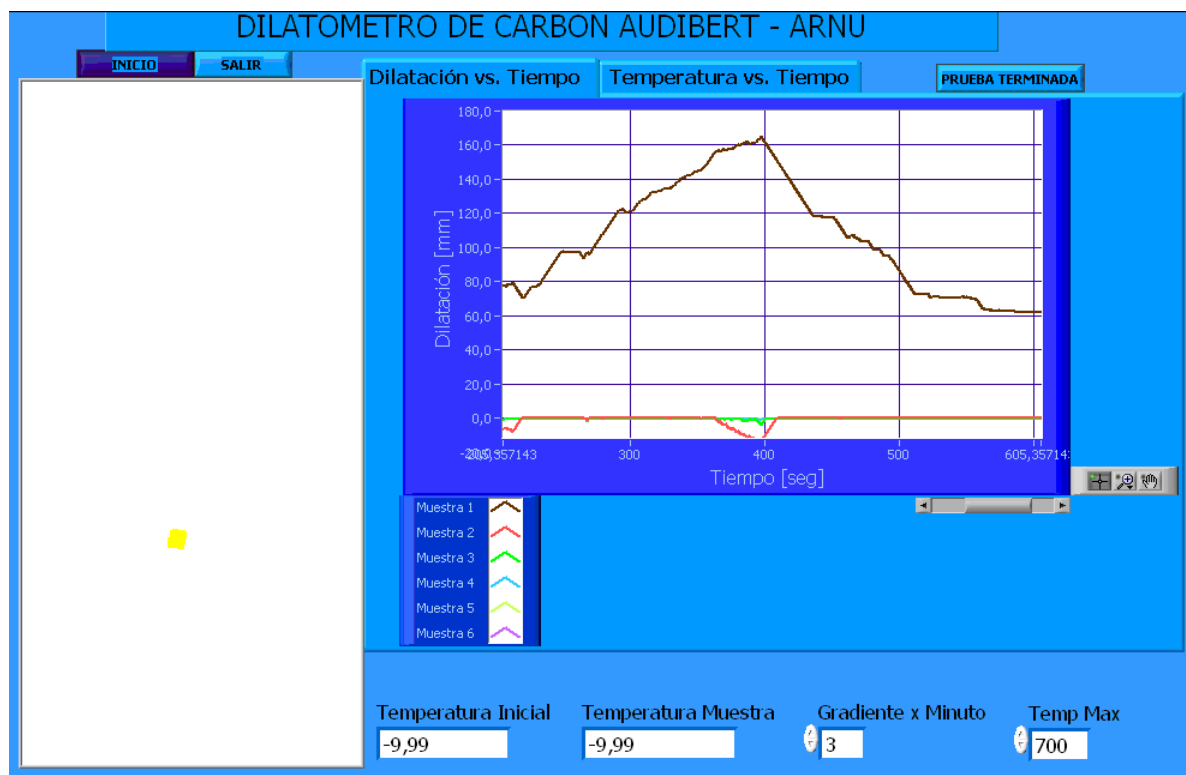
Para el análisis de estos resultados se deben tener en cuenta los errores correspondientes de cualquier proceso de medición.

#### 4.4.3. Movimiento de marcas en tiempo real

Esta prueba consiste en poner en marcha el sistema de medición de desplazamiento completo, o sea captura de imágenes en tiempo real, calibración, reconocimiento de marcas y finalmente medición en medidas del mundo real del desplazamiento de una marca. En esta prueba se simuló el movimiento producido por la dilatación del carbón.

A continuación se muestra el gráfico con los resultados de la prueba y las seis marcas segmentadas.

Figura 44. Resultados de la prueba graficados



Fuente: Diseñador del sistema



De la prueba se concluye que se realizó la captura en tiempo real, la calibración, la identificación de las marcas y la medición de desplazamiento en medidas del mundo real (En el gráfico se aprecia que las medidas se encuentran en milímetros).

Durante la prueba se tomaron algunas medidas significativas del desplazamiento de las marcas, con la ayuda de un calibrador, con el fin de analizar la exactitud del sistema. A continuación se muestran los resultados:

Tabla 10. Medidas de desplazamiento de las marcas

| Marca | Distancia en el tiempo medida con el calibrador (mm) | Distancia de en el tiempo medida con el sistema (mm) | Diferencia (mm) | Error (%) |
|-------|--|--|-----------------|-----------|
| 1     | 30,00  | 33,50  | - 3,50          | 11,67     |
|       | 30,00  | 28,00  | 2,00            | 6,67      |
|       | 30,00  | 30,00  | -               | -         |
|       | 30,00  | 28,50  | 1,50            | 5,00      |
|       | 30,00  | 27,60  | 2,40            | 8,00      |
|       | Error promedio por marca                             |  |                 |           |
| 2     | 30,00  | 33,00  | - 0,10          | 10,00     |
|       | 30,00  | 29,40  | 0,02            | 2,00      |
|       | 30,00  | 30,60  | - 0,02          | 2,00      |
|       | 30,00  | 28,80  | 0,04            | 4,00      |
|       | 30,00  | 29,70  | 0,01            | 1,00      |
|       | Error promedio por marca                             |  |                 |           |
| 3     | 30,00  | 31,80  | - 1,80          | 6,00      |
|       | 30,00  | 31,80  | - 1,80          | 6,00      |
|       | 30,00  | 30,30  | - 0,30          | 1,00      |
|       | 30,00  | 35,10  | - 5,10          | 17,00     |
|       | 30,00  | 30,00  | -               | -         |
|       | Error promedio por marca                             |  |                 |           |
| 4     | 30,00  | 27,70  | 2,30            | 7,67      |
|       | 30,00  | 29,00  | 1,00            | 3,33      |
|       | 30,00  | 31,60  | - 1,60          | 5,33      |
|       | 30,00  | 29,00  | 1,00            | 3,33      |
|       | 30,00  | 30,90  | - 0,90          | 3,00      |
|       | Error promedio por marca                             |  |                 |           |
| 5     | 30,00  | 33,50  | - 3,50          | 11,67     |
|       | 30,00  | 28,00  | 2,00            | 6,67      |
|       | 30,00  | 30,00  | -               | -         |
|       | 30,00  | 28,50  | 1,50            | 5,00      |



| Marca       | Distancia en el tiempo medida con el calibrador (mm) | Distancia de en el tiempo medida con el sistema (mm) | Diferencia (mm) | Error (%) |
|-------------|--|--|-----------------|-----------|
|             | 30,00  | 27,60  | 2,40            | 8,00      |
|             | Error promedio por marca                             |  |                 | 6,27      |
| 6           | 30,00  | 30,30  | - 0,30          | 1,00      |
|             | 30,00  | 28,50  | 1,50            | 5,00      |
|             | 30,00  | 29,10  | 0,90            | 3,00      |
|             | 30,00  | 28,20  | 1,80            | 6,00      |
|             | 30,00  | 32,80  | - 2,80          | 9,33      |
|             | Error promedio por marca                             |  |                 | 4,87      |
| Error total |  |  |                 | 4,94      |

Fuente: Diseñador del sistema

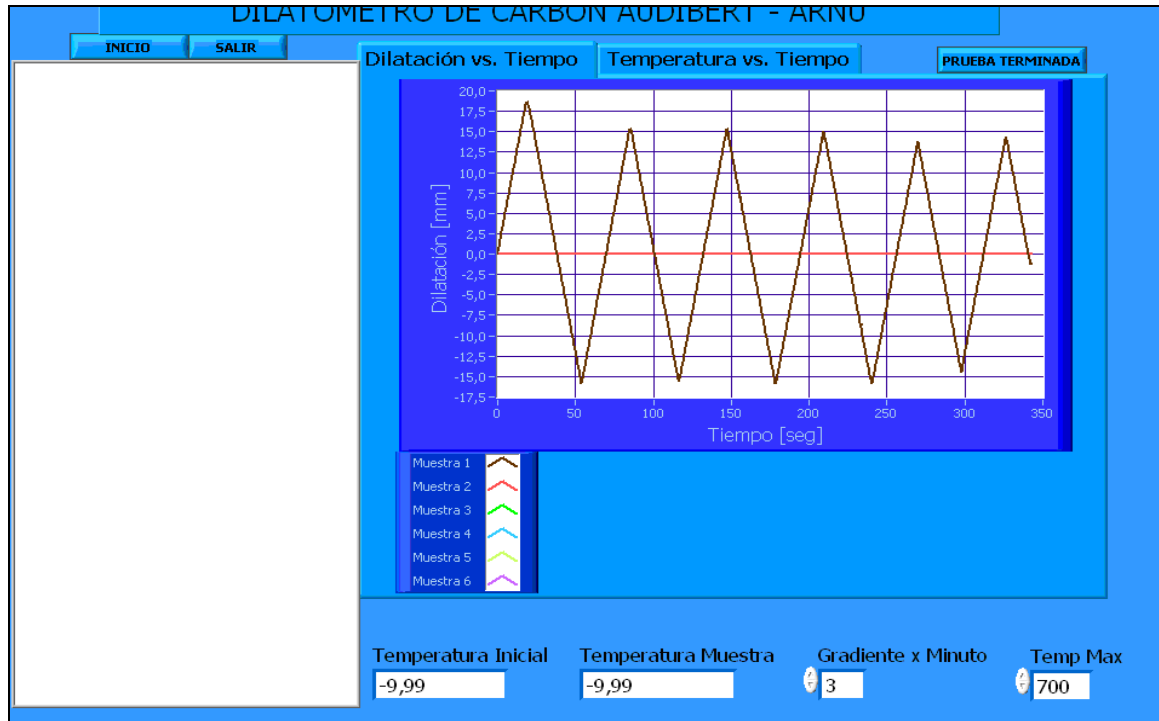
Para el análisis de los resultados se deben tener en cuenta los errores correspondientes de cualquier proceso de medición.

#### 4.4.4. Medición de desplazamiento en tiempo real

Esta prueba consiste en medir el movimiento de una marca con centro de masa conocida adherida al segundero de un reloj. Esto nos permite conocer el desempeño del sistema a desplazamientos pequeños (del orden de las milésimas de milímetro) de las marcas, además de medir la respuesta en tiempo para el despliegue las graficas.

A continuación se muestra el resultado de la prueba y el análisis de los mismos

Figura 45. Resultados de la prueba del reloj



Fuente: diseñador del sistema

Los resultados que dio el sistema se compararon con los que se obtienen del seno de la distancia del centro de área de la marca al centro del reloj.

Obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 11. Resultados de la prueba con el reloj

| Angulo             | Distancia medida matemáticamente | Distancia medida por el sistema | Error (%)  |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------|
| 30                 | 8,2500175                        | 8,100                           | 1,81839003 |
| 60                 | 14,2894394                       | 13,800                          | 3,42518242 |
| 90                 | 16,5                             | 15,300                          | 7,27272727 |
| 120                | 14,2893788                       | 14,100                          | 1,32531134 |
| 150                | 8,24991252                       | 8,100                           | 1,81714072 |
| 180                | -0,00012122                      | 0,000                           | 9,25273052 |
| 210                | -8,25012247                      | -8,100                          | 1,81963931 |
| 240                | -14,2895                         | -13,800                         | 3,42559203 |
| 270                | 16,5                             | -15,300                         | 7,27272727 |
| 300                | -14,2893181                      | -13,800                         | 3,42436317 |
| 330                | -8,24980754                      | -8,100                          | 1,81589137 |
| Error de la prueba |                                  |                                 | 3,87906322 |

Fuente: Diseñador del sistema



## 5. OBSERVACIONES

La primera etapa del proyecto consistió en una consulta bibliográfica con el fin de obtener información sobre la dilatometría en carbones, los equipos que se usan para las caracterizaciones plásticas de los mismos, y determinar las características del prototipo de la Escuela de Metalúrgica y Ciencia de Materiales y las actividades realizadas en el anterior proyecto. Esta etapa permitió obtener criterios, herramientas y requisitos para la repotenciación del equipo y la realización del manual de usuario. La documentación continuó con una evaluación del sistema antes implementado, el cual, después de analizar las fortalezas y debilidades, se sometió a cambios en donde se considero necesario. Para el caso se considero necesaria la realización de un nuevo VI de tratamiento de imágenes con fines de la medición de desplazamiento de las muestras. Una vez elaborada esta evaluación, se hizo un proceso de profundización en los conceptos de los elementos del sistema y se estudió el software IMAQ Vision de LabVIEW. Luego se tomaron fotos preliminares para desarrollar el software de tratamiento de imágenes que permitiera medir la ubicación de los pistones.

Se continuó la documentación, con los elementos faltantes del sistema de adquisición de imágenes, es decir, el lente, la tarjeta de video, la cámara y la iluminación.

Se pusieron en marcha las tarjetas de adquisición de datos y de potencia y se realizaron pruebas de las mismas. Además se ejecutó el software de adquisición y control de temperatura en LabVIEW con la librería PID Control Toolset.

Se integraron todas las etapas, y se realizaron pruebas hasta obtener una adecuada segmentación de las marcas para la medición de desplazamiento para cada uno de los pistones. Finalmente se realizó el manual de usuario con base en la experiencia adquirida a través del desarrollo del trabajo, los



documentos realizados en el anterior proyecto, las sugerencias de las personas involucradas y las necesidades del laboratorista y el estudiante usuario final.

Del trabajo realizado se destaca:

1. Se repotencio el prototipo que permitirá realizar pruebas de dilatometría de carbones, conformado de:
  - Sistema de adquisición y tratamiento de imágenes, el cual consta de una cámara, un lente, un frame grabber, un ambiente controlado de iluminación y un software implementado con LabVIEW.
  - Un manual de usuario para la instalación y puesta en marcha de la herramienta, ejecución de la prueba paso a paso y observación de los resultados. Así como diagnostico de algunas de las fallas.



## 6. CONCLUSIONES

1. LabVIEW es un lenguaje gráfico que permite realizar fácilmente tratamiento de imágenes y control de procesos desde el computador. Con este software, se repotencio la aplicación que posee una interfaz de usuario “amigable”, en la cual se pueden visualizar los datos de dilatación y temperatura “en línea”.
2. Se desarrolló un sistema de medición de desplazamiento por medio de adquisición y tratamiento de imágenes, que permite realizar mediciones en un rango de [0-200mm] con un error promedio menor al 5% y una menor a 0,8 mm.
3. La iluminación y el enfoque son parámetros determinantes en el resultado de sistemas de medición, a partir del tratamiento de imágenes. Así mismo, la calibración adecuada y precisa del sistema es fundamental para el éxito de las mediciones.
4. El Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu es un equipo de valor. Aunque solo se consiguió el costo de un equipo y sus características no estaban disponibles, vale la pena mencionar que su costo era de 48.100 dolares y el costo del sistema implementado es de aproximadamente de tres millones de pesos (\$ 3.000.000).
5. Las herramientas virtuales representan una herramienta poderosa para análisis de laboratorio, por su versatilidad, (para el caso se crearon dos herramientas, termómetro, medidor de desplazamiento,) precisión, y facilidades para el usuario para la ejecución (con unos cuantos “clicks”) y análisis (los resultados en esta aplicación son desplegados en Excel con todo lo que representa esta herramienta)



## 7. RECOMENDACIONES

Después de la realización del presente trabajo, se presentan las siguientes ideas para optimizar el sistema desarrollado.

- · Adicionar tres termocupla para asegurar la uniformidad en la temperatura a lo largo de los tubos dilatométricos.
- · Cambiar la cámara por una de mayor resolución para obtener una mejor exactitud en el sistema de medición de desplazamiento.
- · Cambiar el sistema de iluminación por lámparas de encendido electrónico para disminuir cambios en la iluminación por el inadecuado comportamiento de los starters.
- · Implementar la comunicación entre el equipo y el PC por medio del puerto USB ya que el puerto serie no se encuentra disponible en todos los computadores que se consiguen en la actualidad.
- Implementar a través de Software o Hardware un sistema de control de brillo de las imágenes capturadas debido a que este representa un factor crítico dentro del desarrollo de la medición de desplazamiento.



## BIBLIOGRAFIA

1. BONILLA MURIEL Viviana, Sistema de medición de desplazamiento por medio de tratamiento digital de imágenes para el dilatómetro Audibert Arnu. 2005
2. BERKOWITZ Norbert, AN INTRODUCTION TO COAL TECHNOLOGY, Academic Press, New York, Primera Edición, 1979. Capítulo 6, Behavior at Elevated Temperatures: Decomposition and Carbonization, Sección 6.3, The Plastic Properties of Coal, Pág. 142-153.
3. BENAVIDES OJEDA, Luz Eliana. TRANSDUCTORES DE PROXIMIDAD.2000.
4. CONTRERAS SÁNCHEZ Omar, VILLAMIZAR GARCÍA Libardo, ESTUDIO DEL YACIMIENTO CARBONÍFERO “LA QUIRACHA” (NORTE DESANTANDER) PARA PRODUCCIÓN DE COQUE METALÚRGICO.
5. Edmund Industrial Optics.
6. GONZÁLEZ Rafael C., TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES, Addison-Wesley, Estados Unidos de América, Primera Edición, 1992. Capítulo 1, Introducción, Secciones 1, 2, 3, y 4, Pág. 1-19. Capítulo 2, Fundamentos de la imagen digital, Sección 5, Geometría de la imagen, Pág. 56-77.
7. IMAQ Vision Concepts Manual. National Instruments. Capítulo 3, System Setup and Calibration, Pág. 48-65.
8. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook CRCnetBase 1999. Capítulo 6, Displacement Measurement, Linear and Angular
9. MUHAMMAD H. RASHID, Electrónica de potencia, Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Pearson Education, México, Segunda Edición, 1995. Capítulo 6, Controladores de voltaje CA, Secciones 4 y 5, 195-201.
10. PALLAS ARENY Ramón. SENSORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL. Alfaomega Marcombo, Barcelona España, Tercera Edición. 2001.
11. TIBADUIZA BURGOS Diego Alexander, LÁZARO MELÉNDEZ David Alberto, FUENTES PARADA Pedro Javier, MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UN PROCESO DE DESTILACIÓN DE AGUA QUE UTILIZA MICROONDAS COMO MEDIO DE CALENTAMIENTO.



## ANEXO 1. MANUAL DE USUARIO DEL SISTEMA IMPLEMENTADO



MANUAL DE USUARIO DEL DILATOMETRO AUDIBERT ARNU DE LA  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

RICARDO RUEDA SALAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÍCA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA

2009



Este manual tiene como fin ser guía para la instalación, puesta en funcionamiento y finalmente despliegue de resultados del Dilatómetro de carbón Audibert-Arnu perteneciente a la escuela de Ingeniería Metalúrgica.

De esta manera el manual de usuario se divide en:

- manual de laboratorista, enfocado a la manera en que se hará la instalación y puesta en marcha, la administración y el mantenimiento del equipo.
- Manual de estudiante, orientado a la manera en que el estudiante hará las pruebas con el equipo y obtendrá los respectivos resultados.

## 8. MANUAL DEL LABORATORISTA

### 8.1. Requerimientos del equipo

#### 8.1.1. Requerimientos de hardware

- Dilatómetro Audibert-Arnu en buen estado como el que tiene la escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Figura 46. Dilatómetro de escuela de ingeniería Metalúrgica y ciencia de Materiales



Fuente: Diseñador de proyecto

- Cámara de video como la que se encuentra en la escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Figura 47. Cámara del sistema



Fuente: Diseñador de proyecto

- Grilla de puntos para calibración como el que se encuentra en la escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Figura 48. Grilla de puntos



Fuente: Diseñador de proyecto

- Tarjeta digitalizadora de imágenes, como la que se encuentra en la escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Figura 49. Tarjeta de video



Fuente: Diseñador de proyecto

- Equipo de cómputo con requerimientos mínimos de capacidad de memoria, velocidad de procesador, y sistema operativo.

Tabla 12. Especificaciones mínimas del PC

|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| Velocidad de procesador  | 2,71 GHz     |
| Capacidad de memoria RAM | 512 MB       |
| Capacidad de disco duro  | 40 GB        |
| Sistema operativo        | Windows XP ® |

Fuente: Diseñador del sistema

Figura 50. Equipo de cómputo usado



Fuente: Diseñador de proyecto

- Hardware de adquisición y control de temperatura como el que se encuentra en la escuela de Ingeniería Metalúrgica.

Figura 51. Control de temperatura



Fuente: Diseñador de proyecto



### 8.1.2. Requerimientos de software

- Sistema operativo.
- Controlador Imaging control para la tarjeta digitalizadora de imágenes que se encuentra en el disco compacto de Imaging Control
- Extensión de LabView que se encuentra en el disco compacto de Imaging Control
- LabView 7.1 que se encuentra en el instalador que se entregara con el proyecto
- Imaq Vision que se encuentra con los discos compactos que se entregaran con el proyecto
- Imaq Vision Builder que se encuentra con los discos compactos que se entregaran con el proyecto
- Extensión de LabView de control que se encuentra con los discos compactos que se entregaran con el proyecto
- Vi's y SubVi's del dilatómetro para el procesamiento de datos de temperatura, imágenes y despliegue de resultados, que se encuentra en los discos compactos que se entregaran con el proyecto.

## 8.2. Instalación

### 8.2.1. Hardware

Para la instalación del dilatómetro, por favor remitirse al documento "Medición de desplazamiento por medio de tratamiento digital de imágenes para el dilatómetro de carbón Audibert-Arnu"<sup>1</sup>.

- Para la instalación de la cámara de video se cuenta con una base con tres rangos de movilidad. Como se muestra en la figura.

---

<sup>1</sup> BONILLA MURIEL Viviana, Sistema de medición de desplazamiento por medio de tratamiento digital de imágenes para el dilatómetro Audibert Arnu. 2005

Figura 52. Base de ubicación de la cámara



Fuente: Diseñador de proyecto

Para la alimentación de la cámara se cuenta con un adaptador con cuatro valores diferentes de salida de voltaje: 6, 9, 12. Y se conecta de la siguiente manera a la cámara como se muestra en la

Figura 53. Adaptador usado en el sistema



Fuente: Diseñador de proyecto

- La grilla de puntos cuenta en el revés con tres sujetadores que se unirán al pistón central del dilatómetro cuando se requiera en el proceso.

- En la figura se muestra la tarjeta digitalizadora que se usa, es una tarjeta que se conecta en alguna de las ranuras para tarjetas PCI que se encuentran en el equipo destinado para el dilatómetro. Además se necesita el controlador para este hardware. Su instalación se mostrara mas adelante en instalación de software.

Figura 54. Conexión de la tarjeta de video



Fuente: Diseñador de proyecto

- El equipo de computo usado para el dilatómetro es el que se muestra en la y que se dan las especificaciones en la tabla
- El hardware de adquisición y control de temperatura se muestra a continuación, además de la conexión de sus diferentes partes. El hardware es especificado con sus diferentes etapas en el documento del proyecto. El hardware de adquisición y control se comunica vía puerto RS-232 con el equipo de computo, se alimenta directamente a la red a 110 VAC, se conecta el horno del dilatómetro, y a 220 VAC y se muestra a continuación en la siguiente

Figura 55. Conexión del control de temperatura

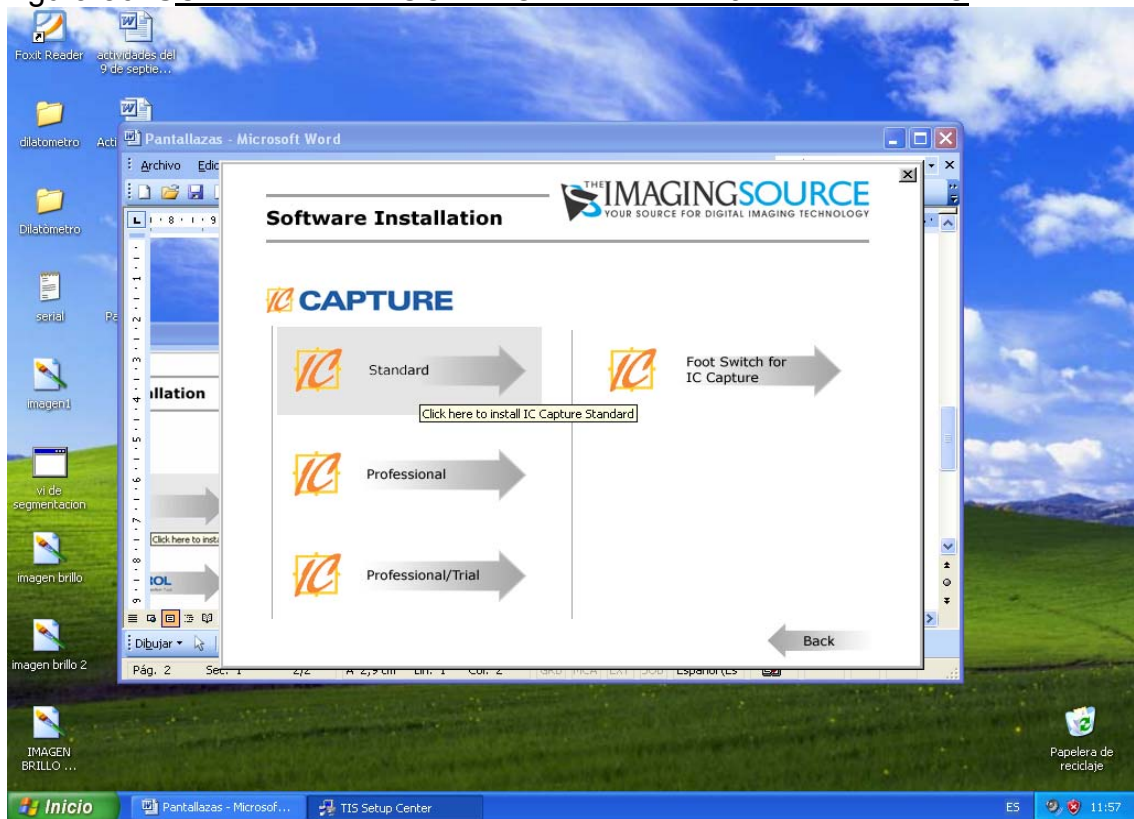


Fuente: Diseñador de proyecto

### 8.2.2. Software

- El sistema operativo con el que se cuenta es Windows XP
- La instalación del controlador para la tarjeta de video se lleva a cabo con la ayuda del CD de Imaging Control.

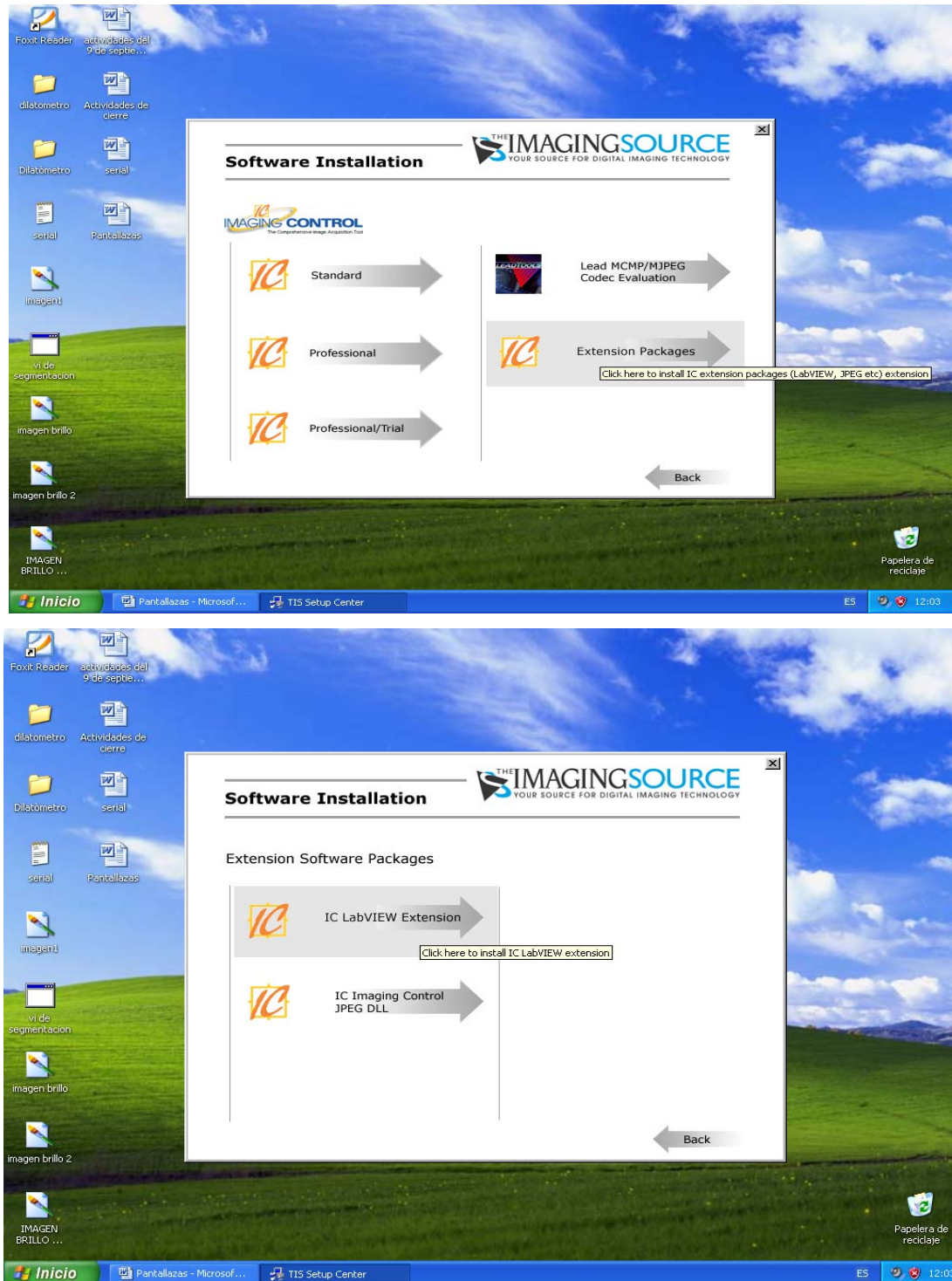
Figura 56. SOFTWARE DE CONTROL DE LA TARJETA DE VIDEO



Fuente: *The Imaging source*

- La instalación de la extensión de LabView para Imaging Control se lleva a cabo con la ayuda del CD de Imaging Control:

Figura 57. EXTENSION DE LABVIEW



Fuente: *The Imaging source*

- La instalación de LabView se lleva a cabo con la ayuda del instalador.

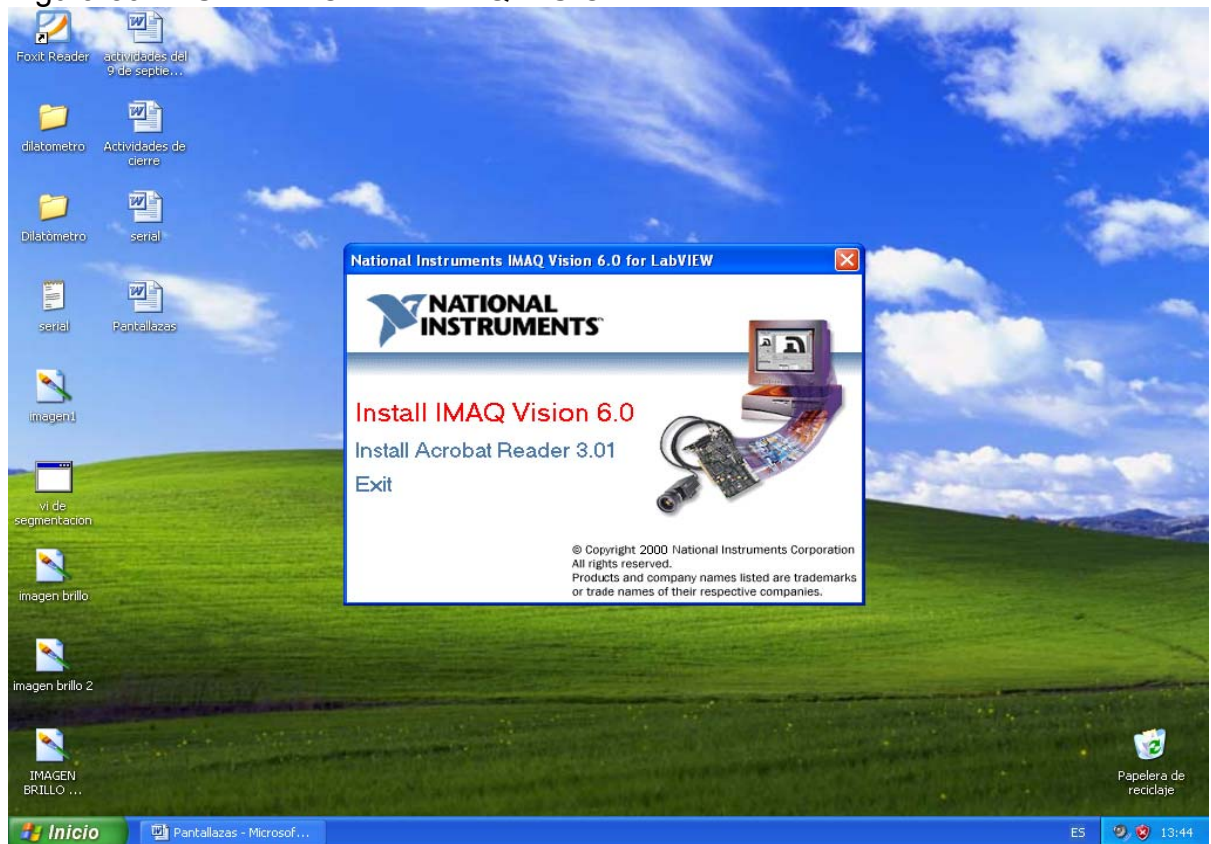
Figura 58. INSTALADOR DE LABVIEW 7.1



Fuente: *National Instruments*

- La instalación Imaq Vision se lleva acabo con la ayuda del instalador

Figura 59. INSTALADOR DE IMAQ VISION



Fuente: *National Instrumets*

- Los VI's y subVI's necesarios para correr el programa del dilatómetro se encuentran en el disco compacto del proyecto, estos VI's se encuentran en una carpeta llamada dilatometría.



## MANUAL DEL ESTUDIANTE

Después de la instalación y la puesta en marcha del aparato se puede proceder a llevar acabo la prueba, para hacerla solicite ayuda del laboratorista:

### 8.3. Iniciar el programa

Abrir el programa con el acceso directo que se encuentra en el escritorio, como lo muestra la siguiente figura

Figura 60. INTERFASE PRINCIPAL



Fuente: Diseñador del sistema

Iniciar el programa picando el botón RUN como lo muestra la figura esta interfase permite acceder a tres VI's que componen la configuración del sistema, calibración y el desarrollo de la prueba.

#### 8.4. Configuración del sistema

Habiendo accedido a la interfase principal se procede a picar el botón con el nombre configuración del sistema. De esta manera se despliega la interfase que nos permite configurar el enfoque de la imagen con ayuda del iris variable de la cámara, y la base en donde se encuentra ubicada, así como centrar la imagen como se muestra en la figura

Figura 61. INTERFASE DE CONFIGURACION DEL SISTEMA DE ADQUISICION



Fuente: Diseñador del sistema

Una vez concluida la configuración, teniendo unas condiciones de captura de imagen apropiada para el proceso posterior, se cierra la interfase picando el botón de salir. De esta manera volveremos automáticamente a la interfase principal.

### 8.5. Calibración de imagen

Estando ahí se picara el siguiente botón que corresponde a la calibración de la imagen. Este botón despliega la interfase en donde se realizara la calibración de la imagen, con ayuda de la grilla de puntos, de esta manera se hace necesario que en el paso previo de configuración del sistema se haya obtenido una imagen de la grilla con buenas condiciones de enfoque y brillo.

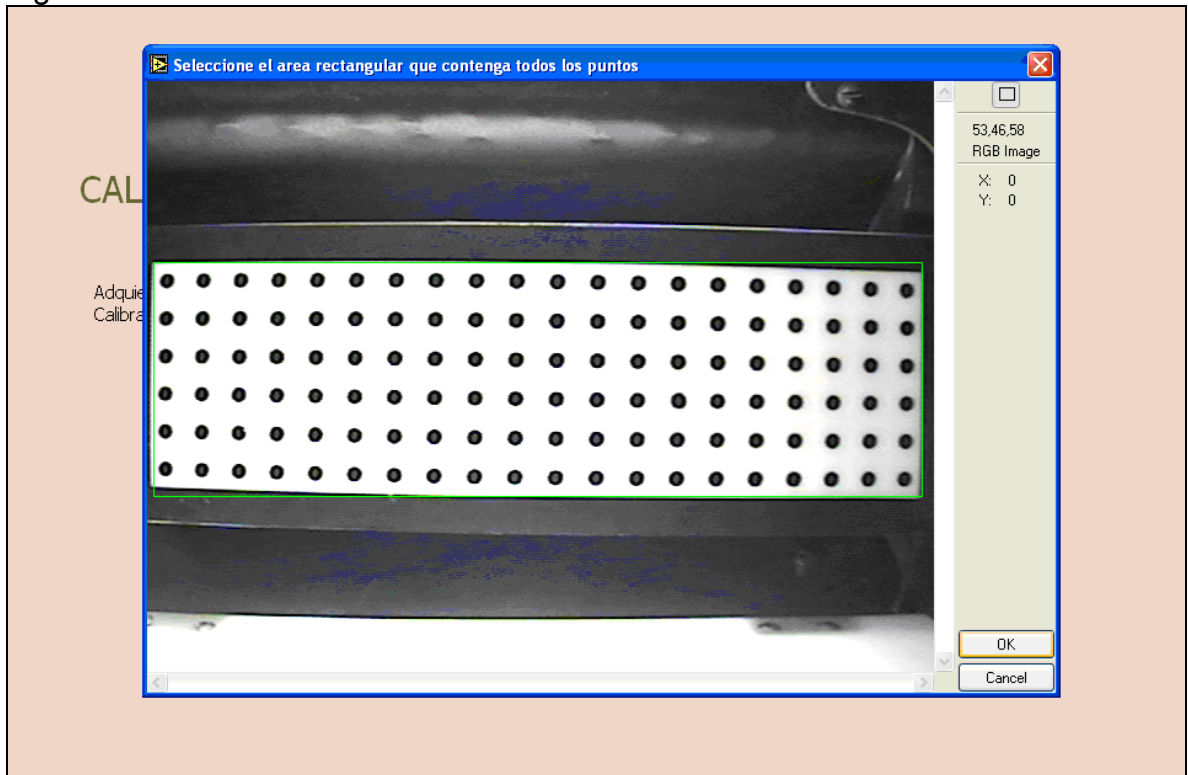
Figura 62. INTERFASE DE CALIBRACION DEL SISTEMA



Fuente: Diseñador del sistema

Una vez en la interfase de calibración se picara el botón cuyo nombre es adquirir patrón como lo muestra la Figura 17 y que desplegara una imagen de la grilla en donde se determinara la región de interés que corresponde al área alrededor de los puntos como lo muestra la figura 18 para la cual se tienen datos de calibración.

Figura 63. INTERFASE DE SELECCIÓN DE LA REGION DE INTERES



Fuente: Diseñador del sistema

Una vez terminado este procedimiento se oprimirá el botón de salir, que nos permitirá volver a la interfase principal.

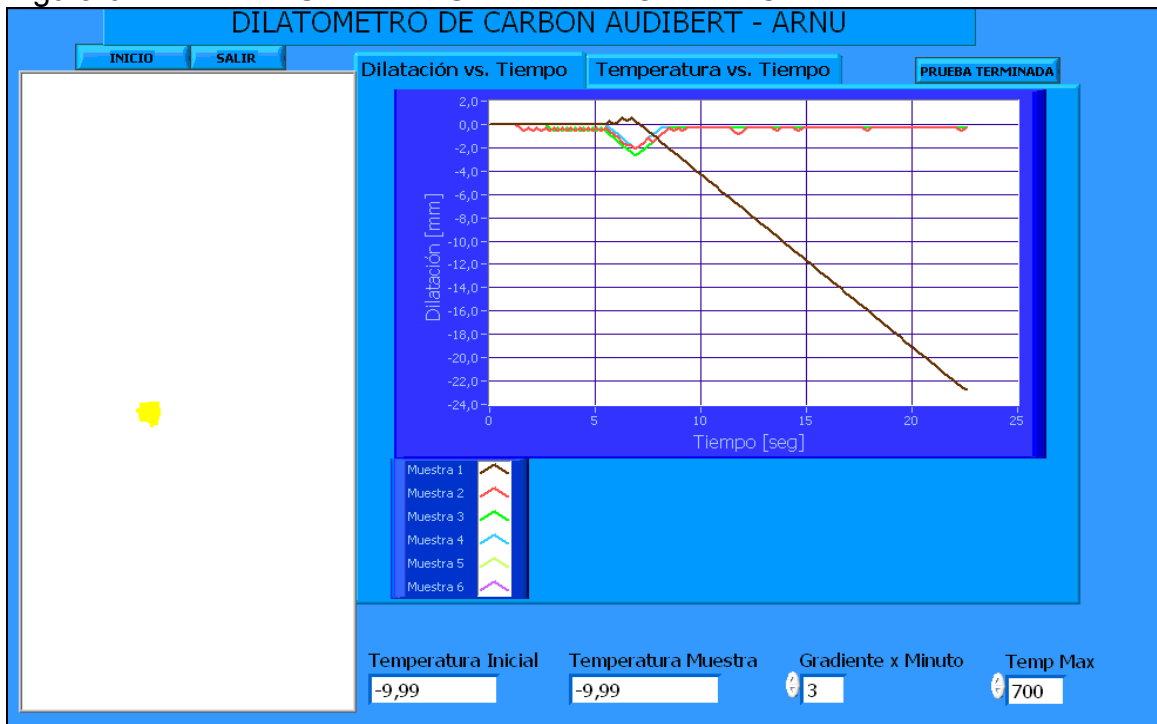
#### 8.6. Prueba dilatométrica

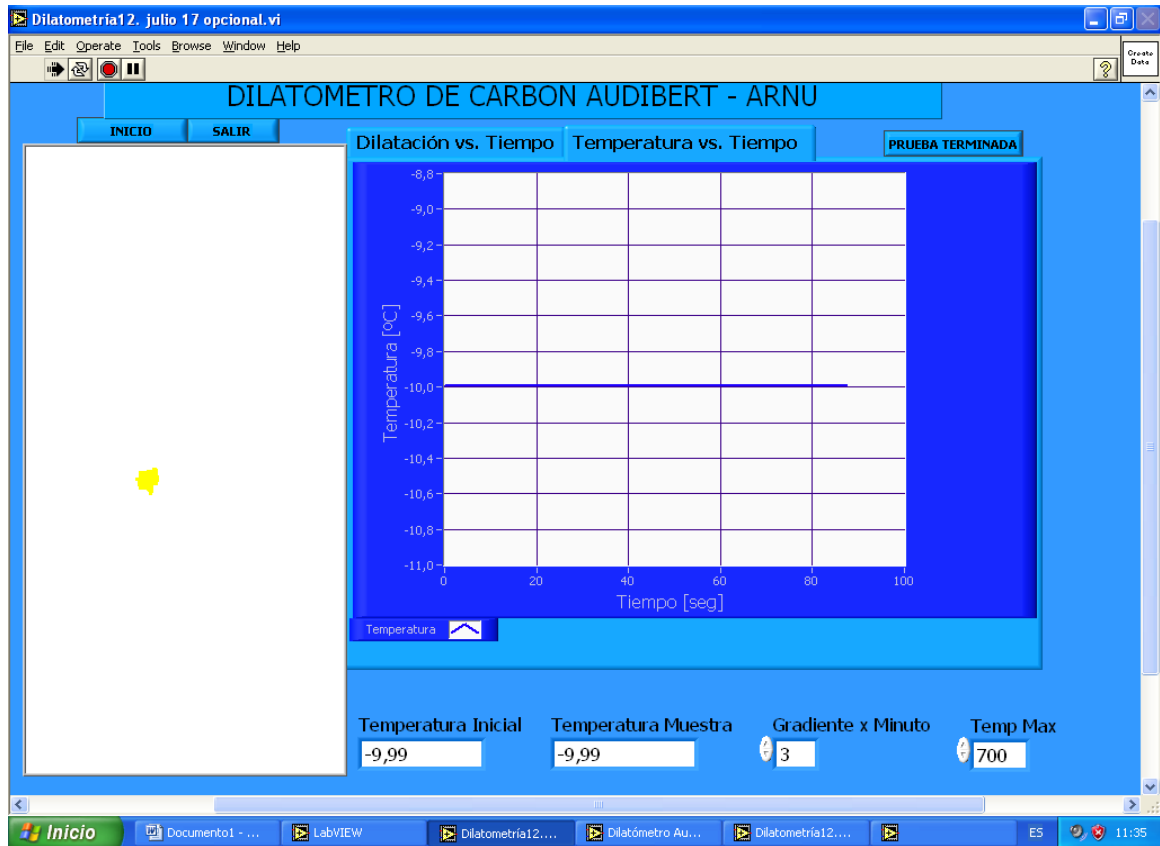
Ahí procederemos acceder a la interfase de la prueba dilatométrica.

Una vez en la interfase de prueba dilatométrica oprimimos el botón de inicio, esta interfase permitirá desplegar los resultados en tiempo real de dilatación de las muestras de carbón, temperatura del horno y una imagen segmentada de las marcas como lo muestra la Figura 9.



Figura 64. INTERFASE DE PRUEBA DILATOMETRICA





Fuente: Diseñador del sistema

Una vez terminada la prueba se procederá a oprimir el botón de prueba terminada, esto nos permitirá ver los resultados tanto de temperatura, dilatación y tiempo de toda la prueba en una tabla de Excel para el análisis del estudiante (Figura 10). Una vez terminada la prueba y analizados los datos se oprime el botón de salir y se regresa a la interfase principal en donde cierra el VI oprimiendo el botón de de salir.



Figura 65. RESULTADOS DE LA PRUEBA EN EXCEL

|    | A          | B          | C          | D        | E          | F          | G          | H          | I          | J          | K | L |
|----|------------|------------|------------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---|---|
| 36 | 7.297.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 0,600000   | -0,600000  | -0,600000  | -0,600000  | -0,600000  | -0,600000  |   |   |
| 37 | 7.516.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 0,900000   | -0,900000  | -0,900000  | -0,900000  | -0,900000  | -0,900000  |   |   |
| 38 | 7.766.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 1.200.000  | -1.200.000 | -1.200.000 | -1.200.000 | -1.200.000 | -1.200.000 |   |   |
| 39 | 7.969.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 1.500.000  | -1.500.000 | -1.500.000 | -1.500.000 | -1.500.000 | -1.500.000 |   |   |
| 40 | 8.219.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 1.800.000  | -1.800.000 | -1.800.000 | -1.800.000 | -1.800.000 | -1.800.000 |   |   |
| 41 | 8.422.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 2.100.000  | -2.100.000 | -2.100.000 | -2.100.000 | -2.100.000 | -2.100.000 |   |   |
| 42 | 8.641.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 2.400.000  | -2.400.000 | -2.400.000 | -2.400.000 | -2.400.000 | -2.400.000 |   |   |
| 43 | 8.860.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 2.700.000  | -2.700.000 | -2.700.000 | -2.100.000 | -2.100.000 | -1.500.000 |   |   |
| 44 | 9.047.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 3.000.000  | -3.000.000 | -2.400.000 | -1.800.000 | -1.800.000 | -1.200.000 |   |   |
| 45 | 9.219.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 3.300.000  | -2.700.000 | -2.100.000 | -1.500.000 | -1.500.000 | -0,900000  |   |   |
| 46 | 9.407.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 3.600.000  | -3.000.000 | -1.800.000 | -1.200.000 | -1.200.000 | -0,600000  |   |   |
| 47 | 9.610.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 3.900.000  | -2.700.000 | -1.500.000 | -0,900000  | -0,900000  | -0,300000  |   |   |
| 48 | 9.828.000  | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 4.200.000  | -2.400.000 | -1.200.000 | -0,600000  | -0,600000  | -0,300000  |   |   |
| 49 | 10.047.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 4.500.000  | -2.100.000 | -0,900000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 50 | 10.266.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 4.800.000  | -1.800.000 | -0,600000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 51 | 10.453.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 5.100.000  | -1.500.000 | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 52 | 10.641.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 5.400.000  | -1.200.000 | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 53 | 10.813.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 5.700.000  | -0,900000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 54 | 11.016.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 6.000.000  | -0,600000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 55 | 11.219.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 6.300.000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 56 | 11.391.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 6.600.000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 57 | 11.563.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 6.900.000  | -0,600000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 58 | 11.750.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 7.200.000  | -0,900000  | -0,600000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 59 | 11.985.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 7.500.000  | -0,600000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 60 | 12.172.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 7.800.000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 61 | 12.375.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 8.100.000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 62 | 12.593.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | NaN      | 8.400.000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 63 | 12.765.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 8.700.000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 64 | 12.953.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 9.000.000  | -0,600000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 65 | 13.171.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 9.300.000  | -0,900000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 66 | 13.406.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 9.600.000  | -0,600000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 67 | 13.578.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 9.900.000  | -0,900000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 68 | 13.750.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 10.200.000 | -0,600000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 69 | 13.938.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 10.500.000 | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |
| 70 | 14.156.000 | -9.990.000 | -9.990.000 | 0,000000 | 10.800.000 | -0,600000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  | -0,300000  |   |   |

Fuente: Diseñador del sistema



## ANEXO 2. PROGRAMAS DE MICROCONTROLADOR



```

***** CONVERSOR A/D Y
TRANSMISION AL COMPUTADOR *****

$include 'Gp20regs.inc'
ORIGEN    EQU    $A000
RESET     EQU    $FFFE
NUMER     EQU    $FB2B
INTERSCI  EQU    $FFE4

*****
SCTE      EQU    7    ;Bandera de transferencia completa
IMASK     EQU    1    ;Bit de enmascaramiento de interrupción
MODE1     EQU    0    ;Bit de configuración de interrupción
M         EQU    4    ;Bit de longitud de caracter
PEN       EQU    1    ;Bit habilitador de paridad
PTY       EQU    0    ;Bit de tipo de paridad)
SCRIF     EQU    5    ;Bit indicador de recepción completa
SCRIF     EQU    5    ;Bit para habilitar interrupcion por SCI (Recepcion)
SBK       EQU    0    ;Bit de envio de ruptura del SCI
*****
CS        EQU    3
RC        EQU    6
DATA     EQU    4
DATACLK  EQU    5
BUSY     EQU    2
A0       EQU    0
A1       EQU    1 ;0110 1011 #$6B
*****
CSP      EQU    4

    ORG    ORIGEN
REINICIO: RSP
    JSR    CONFIPUER
    JSR    CONFIRAM
    MOV    #$31,CONFIG1    ;habilita el COP y deshabilita el LVI
    Mov    #$2,CONFIG2    ;deshabilita el oscilador interno para el SCI
*****Configurar pantalla*****
    jsr    cfg_SCI
    JMP    COMIENZO
***** PROGRAMA PRINCIPAL *****
*****
*****
COMIENZO MOV    #$02,DATABYTE1

```



```
MOV    #$00,DATABYTE0
CLC
BRA    PROGRAMA
```

\*\*\*\*\*

```
PROGRAMA    LDA    #$FF
             STA    COPCTL
PROGRAMA2   JSR    DATO
             JSR    RETARDOG
             JSR    POTEN
             JSR    CONMUTE
             ;BRA   CANAL1
             ;BRA   CANAL2
             BRA    CANAL3
             ;BRA   CANAL4
             BRA    PROGRAMA
CANAL4      BSET   A0,PORTB
             BSET   A1,PORTB
             BRA    PROGRAMA
CANAL3      BCLR   A0,PORTB
             BSET   A1,PORTB
             BRA    PROGRAMA
CANAL2      BSET   A0,PORTB
             BCLR   A1,PORTB
             BRA    PROGRAMA
CANAL1      BCLR   A0,PORTB
             BCLR   A1,PORTB
             BRA    PROGRAMA

CONMUTE     BRSET  5,PORTD,APAG
             BRA    PREN

APAG        BCLR   5,PORTD
             RTS

PREN        BSET   5,PORTD
             RTS
```

\*\*\*\*\*

```
DATO        JSR    CONVERDATO
             JSR    ENVIARDATO ;BYTEALTO:BYTEBAJO
             LDA    BYTEALTO
             JSR    ENVIARPC  ;ENVIA NUMERO DE 000 A 255
```



```
LDA  BYTEBAJO
JSR  ENVIARPC
JSR  RETARDOG
JSR  RETARDOG
RTS
*****
POTEN  MOV  INSTRUC11,COMMANDBYTE
      JSR  Cfg_SPI
      BCLR CSP,PORTD
      JSR  RETARDOPP
      LDA  COMMANDBYTE
      JSR  TX_SPI
      JSR  RETARDOPP
      LDA  DATABYTE1
      JSR  TX_SPI
      JSR  RETARDOPP
      LDA  DATABYTE0
      JSR  TX_SPI
      JSR  RETARDOPP
      BSET CSP,PORTD
      RTS
*****
CONVERDATO  BSET  CS,DDRB
            BSET  RC,DDRB
            BCLR  BUSY,DDRB
            BSET  CS,PORTB
            BSET  RC,PORTB
            BCLR  CS,PORTB
            NOP
            NOP
            BCLR  RC,PORTB
LEERDATO2  BRCLR  BUSY,PORTB,ESPERARCONVV
            BRA   LEERDATO2

ESPERARCONVV  NOP
            BSET  CS,PORTB
            BSET  RC,PORTB
ESPERARCONV  BRSET  BUSY,PORTB,YACONV
            BRA   ESPERARCONV

YACONV      NOP
            RTS
*****
ENVIARDATO  MOV  #2,BYTEBAN
```



```
LDX #8T
CLR BYTEGEN
BSET DATACLK,DDRB
BCLR DATA,DDRB
BCLR DATACLK,PORTB
BCLR CS,PORTB
BSET RC,PORTB

PULSO      BSET DATACLK,PORTB
NOP
NOP
NOP
BCLR DATACLK,PORTB
NOP
NOP
NOP

GUARBIT    BRCLR DATA,PORTB,GUARBITBAJO
BRA GUARBITALTO

GUARBITALTO SEC
ROL BYTEGEN
DBNZX GUARBITALTO2
DBNZ BYTEBAN,CAMBIARBYTE1
JMP CAMBIARBYTE2
GUARBITALTO2 BRA PULSO

GUARBITBAJO CLC
ROL BYTEGEN
DBNZX GUARBITBAJO2
DBNZ BYTEBAN,CAMBIARBYTE1
BRA CAMBIARBYTE2
GUARBITBAJO2 JMP PULSO

CAMBIARBYTE1 MOV BYTEGEN,BYTEALTO
LDX #8T
CLR BYTEGEN
CAMBIARBYTE11 JMP PULSO

CAMBIARBYTE2 MOV BYTEGEN,BYTEBAJO
BSET CS,PORTB
BCLR RC,PORTB
RTS
```



```
*****Trasmision *****
TX_Ch  Brclr  SCTE,SCS1,*  ;Espera a que la bandera de transmision completa se
active
      Sta  SCDR          ;para enviar un caracter por el puerto serie del PC
      RTS
*****Trasmision *****
TX_SPI  STA  SPDR
WAIT  BRCLR  7,SPSCR,WAIT
      RTS
*****Trasmision *****
RX_Ch  LDA  SCS1
      LDA  SCDR          ;para enviar un caracter por el puerto serie del PC
      STA  DATOPC
      DBNZ  CONTAPC,RX1
      MOV  DATOPC,DATABYTE1
      MOV  #$02,CONTAPC
      CLI
      RTI
RX1    MOV  DATOPC,DATABYTE0
      CLI
      RTI
*****
ENVIARPC  STA  MIRAR
          JSR  DAT_000255

          LDX  PRIMERO
          LDA  MENSAJES2,X
          JSR  TX_Ch

          LDX  SEGUNDO
          LDA  MENSAJES2,X
          JSR  TX_Ch

          LDX  TERCERO
          LDA  MENSAJES2,X
          JSR  TX_Ch
*****
      RTS
DAT_000255  CLRH
          LDA  MIRAR
          LDX  #100T
          DIV
          STA  PRIMERO
          PSHH
```



```
PULA
LDX #10T
CLR H
DIV
STA SEGUNDO
PSHH
PULA
STA TERCERO
CLR X
CLR H
CLR A
RTS

*****CONFIGURACION*****

*****Configura el SCI*****
Cfg_SCI Bclr M,SCC1 ;Longitud de caracteres de 8 bits sin paridad
        Bclr PEN,SCC1 ;Un bit de inicio y un bit de parada
        Bclr PTY,SCC1 ;Establece que no hay paridad
        Lda #$03 ;Determina la velocidad de tranmision del SCI
        Sta SCBR ;Configura la velocidad
        Mov #%01000000,SCC1 ;Enciende el SCI
        Mov #%00101100,SCC2 ;Habilita transmision, recepci3n y deshabilita
interrupciones
        Rts

*****Configura el SPI*****
Cfg_SPI LDA #$02
        STA SPSCR
        LDA #$22
        STA SPCR
        Rts

Cfg_SPI2 LDA #$20
        STA SPCR
        Rts

*****
CONFIPUER MOV #$3C,DDRD ;POTENCIOMETRO 00111100
        MOV #$6B,DDRB ;0110 1011 #$6B
        MOV #$FF,DDRE ;TRANSMISI3N SERIAL
        MOV #$FF,DDRC ;TRANSMISI3N SERIAL
        MOV #$00,DDRA ;TRANSMISI3N SERIAL
        CLR PORTE
        CLR PORTA
        CLR PORTB
```



\*\*\*\*\*Valores iniciales del Conversor\*\*\*\*\*

```
BCLR CS,PORTB
BSET RC,PORTB
BSET CSP,PORTD
BSET CSP,DDRD
BSET A0,DDRB
BSET A1,DDRB
BCLR 3,PORTD
BCLR 4,PORTC
RTS
```

\*\*\*\*\*

```
CONFIRAM CLRX
INCX
CLRRAM CLR RAMINIC,X
INCX
CBEQX #$BE,CLRRAM2
LDA #$FF
STA COPCTL
BRA CLRRAM
```

```
CLRRAM2 CLRX
CLRA
CLRH
CLI
MOV #$B0,INSTRUC11
MOV #$02,CONTAPC
CLC
RTS
```

```
RAMINIC EQU $40
PRIMERO EQU $40
SEGUNDO EQU $41
TERCERO EQU $42
CONRET EQU $43
MIRAR EQU $44
ASCII EQU $45
```

\*\*\*\*\*VARIABLES CONVERSOR\*\*\*\*\*

```
BYTEALTO EQU $46
BYTEBAJO EQU $47
BYTEGEN EQU $48
BYTEBAN EQU $49
BYTEMAX EQU $4A
BYTEMIN EQU $4B
```



\*\*\*\*\*VARIABLES POTENCIOMETRO\*\*\*\*\*

```
COMMANDBYTE EQU    $4C
DATABYTE1    EQU    $4D
DATABYTE0    EQU    $4E
INSTRUC11    EQU    $4F
DATOPC       EQU    $50
CONTAPC      EQU    $51
```

\*\*\*RETARDOS\*\*\*

```
RETA  lda    #255T
```

```
RE    deca
      bne    RE
      LDA    #$FF
      STA    COPCTL
      dec   CONRET
      bne    RETA
      rts
```

```
RETARDO mov    #200T,CONRET
```

```
      LDA    #$FF
      STA    COPCTL
      bsr    RETA
      nop
      rts
```

```
RETARDOG mov    #255T,CONRET
```

```
      bsr    RETA
      nop
      rts
```

```
RETARDOP mov    #1T,CONRET
```

```
      bsr    RETA
      nop
      rts
```

```
RETARDOPP lda    #150T
```

```
REPP  deca
      bne    REPP
      LDA    #$FF
      STA    COPCTL
      rts
```

```
ORG    NUMER
```



MENSAJES2 Db '0123456789C.º:' ;HASTA 13

MENSAJES Db 'AD974 ;' ;mensaje1  
Db 'D=;' ;mensaje2  
org reset  
DW REINICIO  
ORG INTERSCI  
DW RX\_Ch