

**SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO POR MEDIO DE
TRATAMIENTO DE IMÁGENES PARA EL DILATÓMETRO DE CARBÓN
AUDIBERT-ARNU**

NOHORA VIVIANA BONILLA MURIEL

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

2005

**SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO POR MEDIO DE
TRATAMIENTO DE IMÁGENES PARA EL DILATÓMETRO DE CARBÓN
AUDIBERT-ARNU**

NOHORA VIVIANA BONILLA MURIEL

**Plan de Proyecto de Grado para optar la título de
Ingeniero Electrónico**

Director

Msc. JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ

Codirectores

PhD. OSCAR GUALDRÓN GONZÁLEZ

MI(c). JUAN CARLOS RAMIREZ ROJAS

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

2005

A mi familia, que tanto amo.

A Dios, que está siempre a mi lado y que me ha rodeado de personas maravillosas que me han ayudado y apoyado a lo largo del camino.

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa sus agradecimientos a:

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, por financiar este trabajo y por el apoyo constante de su gente.

Jaime Guillermo Barrero Pérez, Director del proyecto, por su valiosa orientación y consejos.

Oscar Gualdrón Gonzalez y Juan Carlos Ramirez Rojas, Codirectores del proyecto, por su gran ayuda.

A todas las personas que me ayudaron en la realización de este trabajo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	2
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.1.1. GENERALES	2
1.1.2. ESPECÍFICOS	2
1.2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	2
2. DILATÓMETRO DE CARBÓN AUDIBERT-ARNU.....	5
2.1. MARCO TEÓRICO	5
2.1.1. Dilatometría.....	5
2.1.2. Dilatómetro Audibert-Arnu.....	5
2.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	8
3. MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO.....	12
3.1. REQUERIMIENTOS DE LA APLICACIÓN	14
3.2. REQUISITOS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	15
3.3. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.....	15
3.3.1. LENTE.....	17
3.3.2. FRAME GRABBER	18
3.3.3. ILUMINACIÓN.....	19
3.3.3.1. Lámparas Fluorescentes.....	23
3.3.3.2. Ambiente controlado para fotografía	24
4. ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES.....	26
4.1. ADQUISICIÓN	26
4.2. CALIBRACIÓN.....	26
4.2.1. Proceso de Calibración	27
4.2.2. Sistema de coordenadas.....	28
4.3. TRATAMIENTO	31
5. CONTROL DE TEMPERATURA.....	34

5.1.	PLANTA.....	34
5.2.	ACTUADOR.....	41
5.3.	CONTROLADOR	45
5.3.1.	Acciones básicas de control.....	45
5.3.1.1.	Control de dos posiciones.....	46
5.3.1.2.	Control PID.....	46
5.3.1.3.	Control con lógica fuzzy.....	46
5.3.2.	Estructura del PID	47
5.3.2.1.	P: acción de control proporcional	47
5.3.2.2.	I: acción de control integral	47
5.3.2.3.	PI: acción de control proporcional-integral	47
5.3.2.4.	PD: acción de control proporcional-derivativa	48
5.3.2.5.	PID: acción de control proporcional-integral-derivativa	48
5.3.3.	Ajuste de las ganancias del controlador.....	48
5.4.	SENSOR.....	51
5.5.	ACONDICIONADOR.....	52
5.6.	SIMULACIÓN Y CONTROL.....	54
6.	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	58
6.1.	MÓDULO ANALÓGICO	58
6.1.1.	Filtro	58
6.1.2.	Convertor Analógico-Digital	61
6.2.	MODULO DIGITAL	62
6.2.1.	Microcontrolador.....	62
6.2.2.	Potenciómetro digital	63
6.2.3.	Max232.....	63
6.2.4.	Relé.....	64
6.3.	MODULO DE ALIMENTACIÓN	64
7.	IMPLEMENTACIÓN.....	66
7.1.	SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO.....	66

7.2.	SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA.....	67
7.3.	PRUEBAS.....	71
7.3.1.	Sistema de medición de desplazamiento.....	71
7.3.2.	Sistema de control de temperatura	77
8.	OBSERVACIONES	79
9.	CONCLUSIONES	82
10.	RECOMENDACIONES	84
	BIBLIOGRAFÍA	86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Elementos originales constituyentes del equipo y estado inicial	9
Tabla 2	Parámetros de diferentes tipos de Sensores de desplazamiento.....	13
Tabla 3	Costos LVDTs	14
Tabla 4	Algunas características de la cámara.....	16
Tabla 5	Características Lente Varifocal NT57-675.....	18
Tabla 6	Características del Frame Grabber DFG/LC1	19
Tabla 7	Patrón de Iluminación.....	25
Tabla 8	Constantes del Ajuste de 2 ^{ndo} Orden.....	35
Tabla 9	Constantes del Ajuste de 1 ^{er} Orden.....	36
Tabla 10	Valores promedio de las Constantes del Ajuste	36
Tabla 11	Resistencia y Capacitancia Equivalentes por curva	39
Tabla 12	Resistencia y Capacitancia promedio.....	39
Tabla 13	Parámetros del controlador	57
Tabla 14	Tabla filtro Butterworth	59
Tabla 15	Parámetros del Filtro pasa-bajas implementado	60
Tabla 16	Características en consideración del OP27EP0141	61
Tabla 17	Constantes del modelo.....	68
Tabla 18	Parámetros de sintonización de la curva de inflexión.....	70
Tabla 19	Regla de sintonización Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta.....	71
Tabla 20	Constantes de sintonización.....	71
Tabla 21	Promedio separación entre puntos del patrón de calibración.....	74
Tabla 22	Longitud de las barras patrones empleadas en el experimento	75
Tabla 23	Orden de experimentación	76
Tabla 24	Error promedio por tubo dilatométrico	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama de Bloques del Sistema	3
Figura 2	Curva Dilatómica Típica	6
Figura 3	Esquema Simplificado del Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu	8
Figura 4	Revestimiento Fabricado.....	10
Figura 5	Estado Inicial del Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu	11
Figura 6	Elementos sobre los cuales se debe medir el desplazamiento	15
Figura 7	Esquema Iluminación Difusa Frontal.....	21
Figura 8	Esquema Iluminación Difusa Axial	22
Figura 9	Esquema del ambiente controlado para fotografía.....	24
Figura 10	Imagen original e imagen con las marcas segmentadas.	32
Figura 11	Diagrama de flujo del algoritmo de tratamiento digital de Imágenes	33
Figura 12	Elementos del Sistema	34
Figura 13	Curvas de Caracterización Sistema Calefactor	35
Figura 14	Ajuste de la Curva 2.....	37
Figura 15	Modelo equivalente del Sistema	37
Figura 16	Respuesta al Escalón de la Función de Transferencia del Sistema Calefactor.....	41
Figura 17	Tensión Aplicada a la carga para un ángulo de disparo de $\sim 80^\circ$	43
Figura 18	Circuito de Disparo del TRIAC.....	44
Figura 19	Pulsos de disparo del TRIAC.....	45
Figura 20	Lazo cerrado solo con ganancia proporcional	48
Figura 21	Gráfica del Lugar geométrico de las Raíces	50
Figura 22	Gráfica del lugar geométrico de las raíces.....	51
Figura 23	Diagrama de bloques del AD595.....	53
Figura 24	Circuito de acondicionamiento implementado	54
Figura 25	VI Transfer Function (PID)	55
Figura 26	Modelo matemático del Actuador	55

Figura 27	Controlador	56
Figura 28	VI PID Setpoint Profile	56
Figura 29	Respuesta del sistema al setpoint con el controlador	57
Figura 30	Filtro pasa-bajas implementado.....	59
Figura 31	Diagrama de bloques funcional del AD974.....	62
Figura 32	Diagrama de bloques funcional del AD5231	63
Figura 33	Esquema del módulo de alimentación	64
Figura 34	Esquema del módulo analógico y digital.....	65
Figura 35	Sistema de Adquisición de Imágenes Implementado	66
Figura 36	Caracterización final.....	68
Figura 37	Curva característica sistema calefactor	69
Figura 38	Curva de respuesta del sistema	70
Figura 39	Recorrido para la medición de la distancia horizontal y vertical del patrón de calibración.....	73
Figura 40	Comportamiento del sistema de control de temperatura	78

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	Comportamiento térmico del carbón	90
ANEXO B	Procedimiento estándar para el ensayo al dilatómetro Audibert-Arnu de los carbones.....	104
ANEXO C	Parámetros fundamentales de un sistema de imágenes	122
ANEXO D	Caracterización sistema calefactor	132
ANEXO E	Especificaciones	140
ANEXO F	Pruebas	160

RESUMEN

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

AUTORA: **Nohora Viviana Bonilla Muriel** **

PALABRAS CLAVE: Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu, coque metalúrgico, Sistema de Adquisición de Imágenes, frame grabber, Sistemas de Control, IMAQ Vision, LabVIEW®, PID Control Toolset.

DESCRIPCIÓN:

En este proyecto se desarrolló un sistema de registro de datos de desplazamiento, y 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 empleados 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, éste consta de un ambiente de iluminación controlada, un lente, una cámara de video y un frame grabber. 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 y la calibración de las imágenes.

* Trabajo de Grado

** Facultad Físico-Mecánicas. Ing. Electrónica. Jaime Guillermo Barrero Pérez.

La adquisición de temperatura se realiza por medio de una termocupla tipo K y la Tarjeta de Adquisición de Datos, la cual se implementó usando un microcontrolador de la familia Motorola, un conversor análogo digital y un potenciómetro digital. La comunicación con el computador se realiza de forma bidireccional por medio de la interfaz RS-232.

El control se realiza por PC con la librería PID Control Toolset de LabVIEW, el cual proporciona un nivel de tensión que es transmitido por medio de la Tarjeta de Adquisición de Datos a la etapa de potencia, éste determina el ángulo de disparo de un Control AC de Línea monofásico.

ABSTRACT

TITLE: System of displacement measurement by means of treatment of images for the dilatometer of coal Audibert-Arnu.*

AUTHOR: Nohora Viviana Bonilla Muriel **

KEY WORDS: Dilatometer of coal Audibert-Arnu, coke metallurgist, System of Acquisition of Images, frame grabber, Systems of Control, IMAQ Vision, LabVIEW ®, PID Control Toolset.

DESCRIPTION:

In this project a system of registration of displacement data was developed, 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

** Facultad Físico-Mecánicas. Ing. Electrónica. Jaime Guillermo Barrero Pérez.

The acquisition of temperature is carried out by means of a termocupla type K and the Card of Acquisition of Data, which was implemented using a 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 control is carried out for PC with the bookstore PID Control Toolset of LabVIEW, which provides a level of tension that is transmitted by means of the Card of Acquisition of Data to the stage of power; this determines the angle of shot of a Control AC of Line monophasic.

INTRODUCCIÓN

La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales en los últimos años ha venido realizando proyectos con la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones para restaurar y mejorar sus equipos de laboratorio. Dentro de este contexto se ha querido restaurar un Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu para el cual se realizó un prototipo de medición y control de temperatura y registro de datos de desplazamiento.

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

La Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales se encontraba sin equipos en funcionamiento que le permitieran hacer esta caracterización. Dicha escuela contaba con varios equipos, un Plastómetro el cual fue dado de baja hace algunos años y el Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu que estuvo dañado durante más de 15 años.

La restauración de dicho equipo permitirá su uso en las prácticas de laboratorio de la asignatura Metalurgia Extractiva I.

En el presente documento se presentara una breve reseña de algunos conceptos de Dilatometría y del Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu y posteriormente se presentará una descripción del trabajo realizado.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. GENERALES

Realizar un prototipo de adquisición y control de temperatura y registro de desplazamiento para el dilatómetro de carbón AUDIBERT-ARNU de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica.

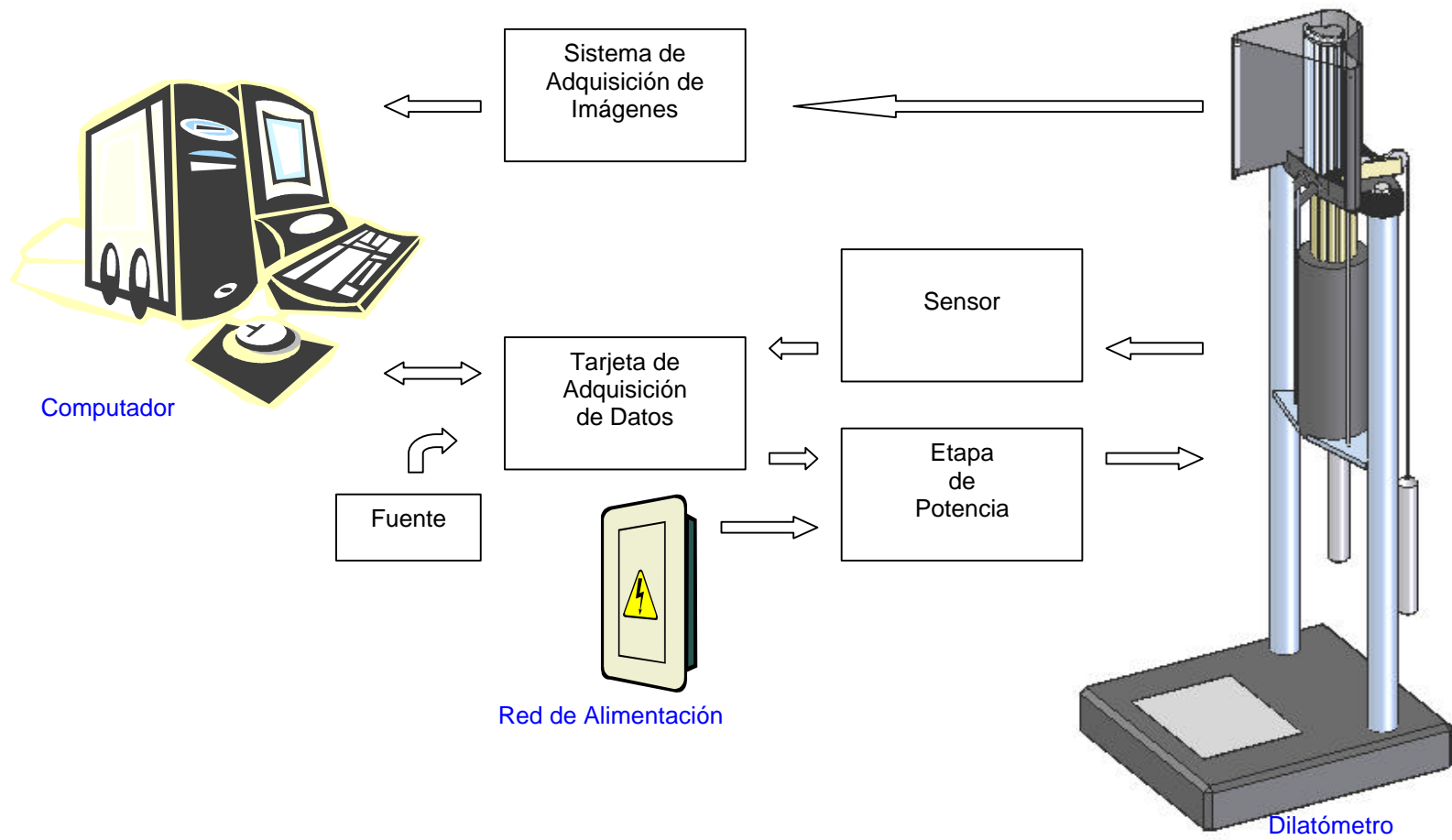
1.1.2. ESPECÍFICOS

- Diseñar e implementar un prototipo para la adquisición del registro de desplazamiento que corresponde a la contracción y dilatación de muestras de carbón con una resolución cercana a 1mm.
- Diseñar e implementar un prototipo para la adquisición y control de la señal de temperatura que diferencie variaciones de temperatura de aproximadamente 3°C en un rango aproximado de 300°C hasta 600°C.
- Visualización en línea de las señales de desplazamiento y temperatura en un computador.

1.2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En este proyecto se desarrolló un sistema de medición de desplazamiento, y de adquisición y control de temperatura para el Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu; éste equipo permite hacer una caracterización del carbón.

Figura 1 Diagrama de Bloques del Sistema



Fuente: Autora del proyecto

El sistema está compuesto de varios bloques interconectados entre sí como se puede apreciar en la Figura 1.

La medición de desplazamiento fue implementada con el sistema de Adquisición de imágenes, éste consta de un ambiente de iluminación controlada, un lente, una cámara de video y un **frame grabber**. El tratamiento digital de imágenes se realiza con IMAQ Vision de LabVIEW ®.

La adquisición de temperatura se realiza por medio de una termocupla tipo K y la Tarjeta de Adquisición de Datos, la cual se implementó usando un microcontrolador de la familia Motorola. La comunicación con el computador se realiza de forma bidireccional.

El control se realiza por PC con la librería **PID Control Toolset** de LabVIEW, el cual proporciona un nivel de tensión que es transmitido por medio de la Tarjeta de Adquisición de Datos a la etapa de potencia, éste determina el ángulo de disparo de un Control AC de Línea monofásico.

2. DILATÓMETRO DE CARBÓN AUDIBERT-ARNU

2.1. MARCO TEÓRICO

En esta sección se presenta una breve descripción de algunos conceptos de Dilatometría en la caracterización de carbones y del Dilatómetro Audibert-Arnu.

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°C/min desde 300°C hasta 700°C, el carbón se coloca en un recipiente cilíndrico cerrado por un pistón, cuyos desplazamientos son seguidos por medio de un dispositivo de medición.

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.

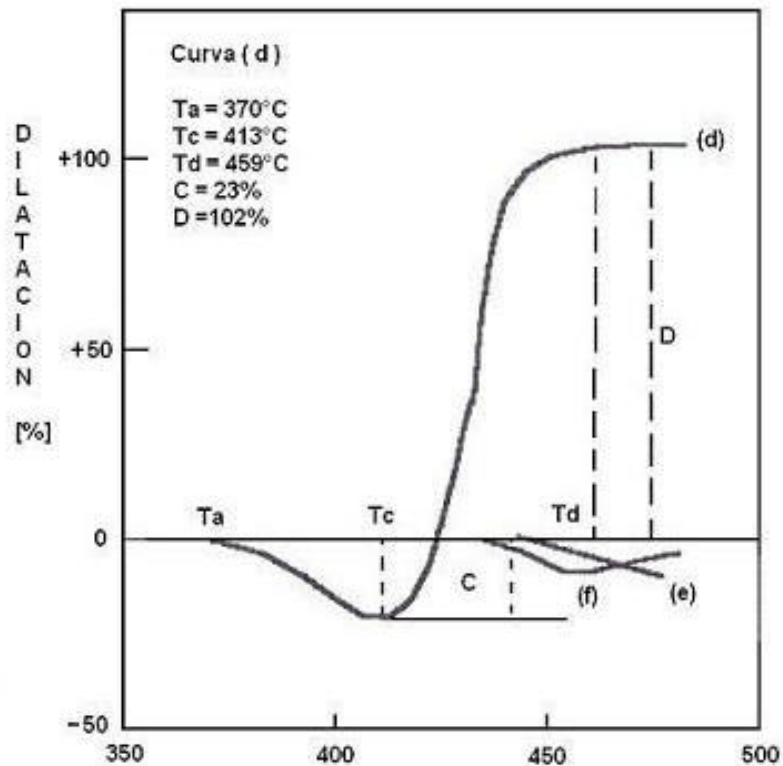
De origen francés, ha sido normalizado en el plan internacional con la norma ISO 349 (1975), y los datos obtenidos con este dilatómetro sirven para la clasificación internacional de los carbones. El resultado de la prueba es la Curva Dilatométrica

*Más información en el ANEXO A Comportamiento térmico del carbón

(Figura 2), de donde se pueden deducir los siguientes parámetros:

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

Figura 2 Curva Dilatómétrica 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.

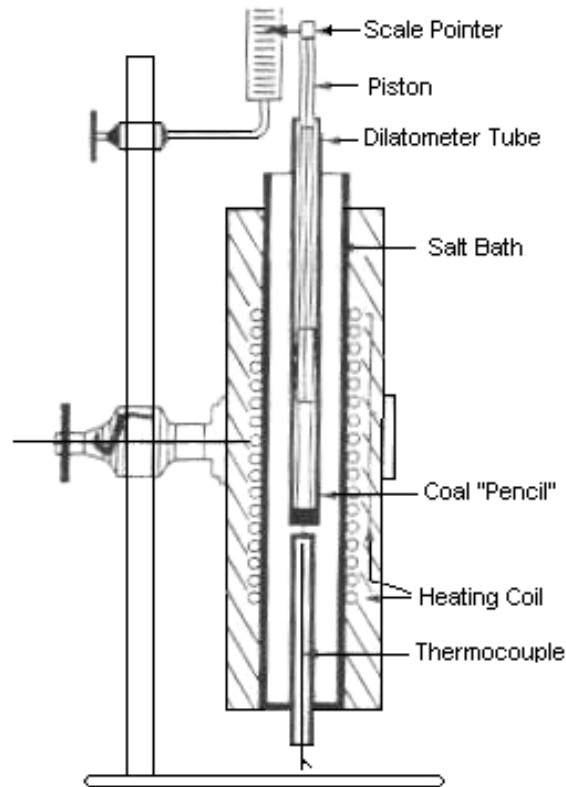
Contemporáneamente al ablandamiento comienzan a desprenderse gases en forma de burbujas que tienden a hinchar la masa fundida; cuando este efecto prevalece sobre el primero, la contracción cesa y empieza la expansión, ésta ocurre cuando las partículas de carbón están bien soldadas para ofrecer resistencia 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 3 se puede observar un esquema simplificado de este dilatómetro*.

*Para una descripción más amplia del comportamiento térmico del carbón remitirse al Anexo A.

Figura 3 Esquema Simplificado del Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu



Fuente: *An introduction to coal technology*

2.2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

A continuación se presentan los elementos que conformaban el Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu según el procedimiento de la prueba expuesta en el manual de laboratorio de carbones de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales y el estado inicial de los mismos*.

*En el Anexo B se presenta el procedimiento original de la prueba y se describen cada uno de los elementos del equipo.

Tabla 1 Elementos originales constituyentes del equipo y estado inicial

Elemento		Estado Inicial
Horno eléctrico vertical de forma cilíndrica	Bloque de metal, provisto de una cavidad cilíndrica para alojar los siete tubos dilatométricos y el tubo para la termocupla de control.	A
	Resistencia metálica, debidamente aislada.	R
	Contrapesos calibrados para subir y bajar fácilmente el horno.	A
Aparatos de regulación y control de la temperatura.	Sistema que impone y mantiene una rata de calentamiento constante de 3°C/min.	N.E.
	Termocupla de control Pt/Pt-Rh 10%	N.E.
	Potenciómetro que se conecta a la termocupla de control para leer la temperatura.	N.E.
8 Tubos dilatométricos		A
7 Pistones		R
Tubo para introducir suavemente la muestra en los tubos dilatométricos.		N.E.
Plumillas para registrar los desplazamientos verticales.		N.E.
Movimiento eléctrico de relojería y cilindro registrador.		N.E.

Fuente: Autora del proyecto

A Aceptable

R Regular

N.E. No existente

La resistencia metálica se encontró en un estado aceptable, pero no su aislamiento. Éste consta de un revestimiento, lana de vidrio y en los extremos del horno de unas láminas de asbesto. El revestimiento estaba partido por lo cual fue necesario fabricarlo con cristobalita, en proporción 1:1.

Figura 4 Revestimiento Fabricado



Fuente: Autora del proyecto

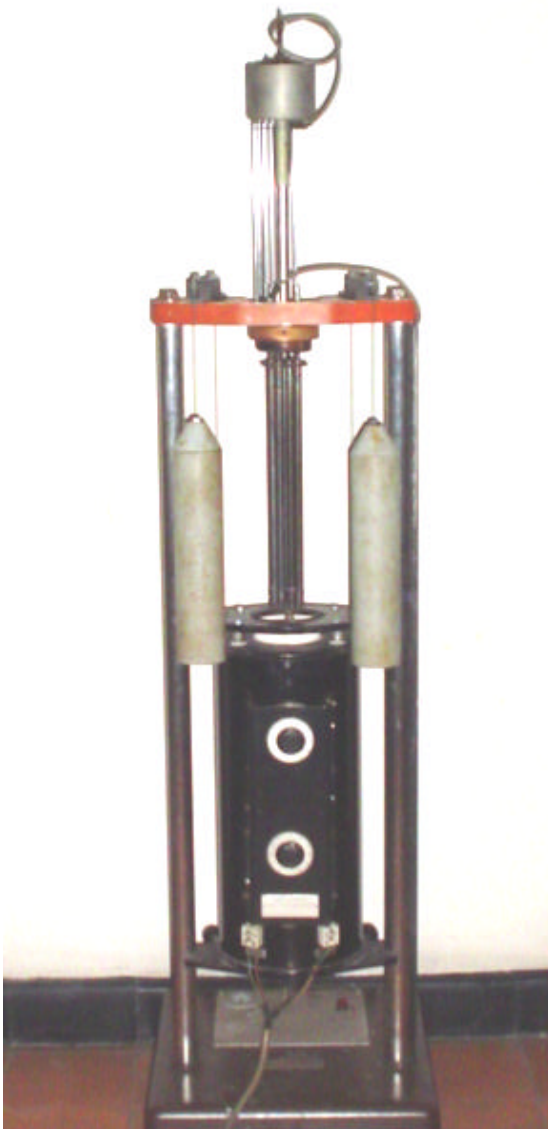
El empaque de asbesto superior estaba deshecho por lo que fue necesario cambiarlo. El original es de asbesto térmico y como no hay fabricante en la ciudad de empaques en este material, se elaboró en asbesto corriente, que proporciona características de aislamiento suficientes.

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 dilatómetricas. 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.

El registro de temperatura se realizaba vigilando el aumento de la temperatura de las muestras, indicada por el potenciómetro conectado a la termocupla de control. Cada 10 °C el usuario debía tirar una bola negra para marcar una raya vertical sobre las curvas, y de esta manera, algunas rayas verticales coinciden con las abscisas correspondientes a múltiplos de 10 min del papel de registro.

A continuación se presenta una fotografía del equipo con los elementos existentes en el momento de iniciar este proyecto.

Figura 5 Estado Inicial del Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu



Fuente: Autora del proyecto

3. MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO

Como se mencionó anteriormente el sistema de medición de desplazamiento se encontraba en muy mal estado y además el registro se hacía en papel, por lo que se propuso cambiar todo el sistema. Para esto se revisaron los diferentes sensores de desplazamiento.

En esta prueba se necesita realizar una medición de desplazamiento, en un rango mínimo de 0-180 mm, lo cual está dado por la máxima contracción y la máxima dilatación observada en curvas dilatométricas que se tomaron con dicho equipo cuando se encontraba en funcionamiento y las que se encontraron en algunos estudios¹, y máximo de 0-220 mm, lo cual está dado por el papel de registro del equipo. Además es importante tener en cuenta que el sensor elegido no debe producir carga adicional a los pistones para no alterar la prueba.

Otra consideración importante es que los elementos que se desplazan, son los pistones, que son 7, y que ellos se encuentran sometidos al mismo calentamiento que el horno, es decir que alcanzan temperaturas de hasta 700°C.

¹CONTRERAS SÁNCHEZ Omar, VILLAMIZAR GARCÍA Libardo, ESTUDIO DEL YACIMIENTO CARBONÍFERO "LA QUIRACHA" (NORTE DE SANTANDER) PARA PRODUCCIÓN DE COQUE METALÚRGICO.

Primer Seminario Internacional sobre la utilización integral del carbón, Tomo I, 1974. RODRÍGUEZ MAZUERA, Jose, ENSAYOS DE COQUIZACIÓN EN CARBONES DEL VALLE DEL CAUCA, Cooperativa Huilera de Occidente Ltda. Cali, Colombia, 1974.

Entre los diferentes sensores de desplazamiento se encuentran sensores resistivos, inductivos, capacitivos, por láser, por ultrasonido, con encoders, por mencionar algunos². A continuación se presenta una tabla con diferentes sensores de desplazamiento.

Tabla 2 Parámetros de diferentes tipos de Sensores de desplazamiento

Sensor	Rango de desplazamiento	Resolución	T
Resistivo	4mm-8m	50µm	x
Inductivo	1mm-5m	± 1mm	
Capacitivo	1mm-10mm	± 1µm	
Por láser	140mm	160nm	x
Ultrasonido	1m-10m	± 0.1m	x
Encoders	30mm-60m ³	0.05µm-18mm	x

Fuente: Autora del proyecto

T: Es afectado por la temperatura

Debido al rango de desplazamiento necesario, la necesidad de no adicionar carga, su comportamiento respecto a la temperatura y para no afectar la estética del equipo, el sensor más conveniente es el sensor inductivo LVDT. Sin embargo, el sensor LVDT, que es el empleado en algunos dilatómetros, fue descartado por su costo. A continuación se presenta el costo de algunos LVDT cotizados.

²BENAVIDES OJEDA, Luz Eliana. TRANSDUCTORES DE PROXIMIDAD. 2000.
PALLAS ARENY Ramón. SENSORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL. Alfaomega Marcombo, Barcelona España, Tercera Edición. 2001.

³Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook CRCnetBase 1999. Capitulo 6, Displacement Measurement, Linear and Angular

Tabla 3 Costos LVDTs

Fabricante	Características	Costo (7 un)
RDP Electronics Ltd.	Rango: $\pm 75\text{mm}$ Linealidad: 0.5%	£1,693.00*
OMEGA	Rango: $\pm 150\text{mm}$ Linealidad: 0.25%	US\$2,415
OMEGA	Rango: $\pm 150\text{mm}$ Alta Precisión	US\$4,585

Fuente: Autora del proyecto

* Incluye gastos de envío.

Por esto, fue necesario cambiar los sensores de desplazamiento tradicionales por la medición de desplazamiento por medio de tratamiento digital de imágenes. 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. A continuación se detalla este sistema.

3.1. 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 dichos pistones.

Figura 6 Elementos sobre los cuales se debe medir el desplazamiento



Fuente: Autora del proyecto

Como se observa en la imagen no todas las guías se encuentran en el mismo plano, además el espacio reservado para el sistema de adquisición de imágenes no debe exceder la base del equipo en más de 15 cm.

3.2. REQUISITOS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

Distancia de Trabajo:	<450 mm
Campo de vista horizontal:	220 mm
Resolución:	~1mm
Profundidad de campo:	~35mm*

3.3. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

Además de los requisitos del sistema, para la selección de los componentes es importante tomar en consideración los elementos ya existentes. La Escuela de

*Para información sobre estos conceptos remítase al Anexo C

Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales tenía una cámara de video CCD que no estaba en uso y, por lo tanto, fue destinada a este proyecto. Las principales características son las siguientes*:

Tabla 4 Algunas características de la cámara

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

Fuente: Autora del proyecto

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.

Usando algunas ecuaciones básicas, se puede verificar que las condiciones del sistema se cumplan.

$$Res.Horiz.Cámara(lp/mm) = \frac{LíneaTVHoriz.x1.333}{2xTamañoSensor(Horiz.)} = \frac{380x1.333}{2x4.82} \approx 52.54(lp/mm) \quad (1)$$

$$Res.Cámara(mm) = \frac{1000}{Res.Cámara(lp/mm)} = \frac{1000}{52.54} \approx 19.03(mm) \quad (2)$$

*Las especificaciones completas se encuentran en el Anexo E.

$$PMAG = \frac{\text{TamañoSensor(Horiz, mm)}}{\text{FOV (Horiz, mm)}} = \frac{4.82}{220} = 0.0219 \quad (3)$$

A partir de estas ecuaciones se obtiene que,

$$\text{Res.Sistema(mm)} = \frac{\text{Res.Camara(mm)}}{PMAG} = \frac{2 \times 1000 \times \text{FOV (Horiz, mm)}}{\text{LíneaTVHoriz} \times 1.333} = 868.64(\text{mm}) \quad (4)$$

3.3.1. LENTE

El primer elemento en consideración es el lente. Si un lente necesita ser acoplado a una cámara pre-seleccionada, se necesitan las especificaciones del tamaño del sensor y el tipo de montura.

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.

El sistema de adquisición debe crear la calidad de la imagen suficiente para permitir extraer de la imagen la información deseada sobre el objeto. Hay varios factores que contribuyen a la calidad de la imagen, como la resolución, el contraste, la profundidad de campo, los errores de perspectiva, y los errores geométricos (distorsión).

Como se necesita inspeccionar objetos a diferentes distancias se debe elegir un lente que pueda 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 buscó un lente con capacidad de enfoque e iris ajustable.

El fabricante del lente seleccionado en el presente trabajo es **Edmund Industrial Optics**. En su guía de selección de lente hay varios parámetros que ayudan a escoger 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 debe ser más grande o igual al de la cámara, es decir mayor o igual que 1/3", la distancia de trabajo debe ser menor de 450mm y el costo debe ser menor a US\$200.

Con estos criterios el lente de este proveedor que ofrece la mejor relación Beneficio-Costo es el Lente de video Varifocal NT57-675, cuyas principales características son las siguientes.

Tabla 5 Características Lente Varifocal NT57-675

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

Fuente: Edmund Industrial Optics

3.3.2. FRAME GRABBER

El segundo elemento en consideración es la tarjeta digitalizadora de imágenes. La tarjeta digitalizadora permite usar la señal de salida de la cámara en un

computador para su posterior análisis. Se busco una tarjeta de bajo costo que manejara señales de video estándar, además que sus librerías fuesen abiertas para que la captura de imágenes se pueda hacer por software. La tarjeta DFG/LC1 de **The Imaging Source** es la que mejor satisface estos requerimientos*.

Tabla 6 Características del Frame Grabber DFG/LC1

Formatos de video	PAL/NTSC/SECAM, RS-170/CCIR, composite (CVBS), Y/C (S-VHS)
Resolución Max de video	768x576 at 50Hz (PAL/CCIR), 640x480 at 60Hz (NTSC/RS170)
Entradas Analogas	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: **The Imaging Source**

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.

3.3.3. ILUMINACIÓN

El tercer 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. De hecho, la

* En el Anexo E se encuentran las especificaciones completas.

calidad de la imagen deseada puede encontrarse mejorando el esquema de iluminación del sistema en lugar de invertir en cámaras de resolución más alta, lentes y software. La iluminación es la clave para el éxito en el procesamiento de la imagen.

La iluminación correcta es crítica en un sistema de imágenes y una iluminación deficiente puede causar una variedad de problemas haciendo más difícil la interpretación de un objeto en una escena. Además, las sombras también pueden causar cálculos de borde falsos, produciendo medidas inexactas. La iluminación pobre también puede producir una relación señal-a-ruido baja. La iluminación no-uniforme, en particular, puede dañar relaciones de señal-a-ruido y hacer tareas como la umbralización más difícil.

Cada componente afecta la cantidad de luz incidente en el sensor y, por consiguiente, la calidad de la imagen del sistema. La abertura ($f / \#$) 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 (es decir más alto $f / \#$). 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 recomendada es Difusa frontal o Difusa Axial⁴.

⁴Edmund Industrial Optics

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.

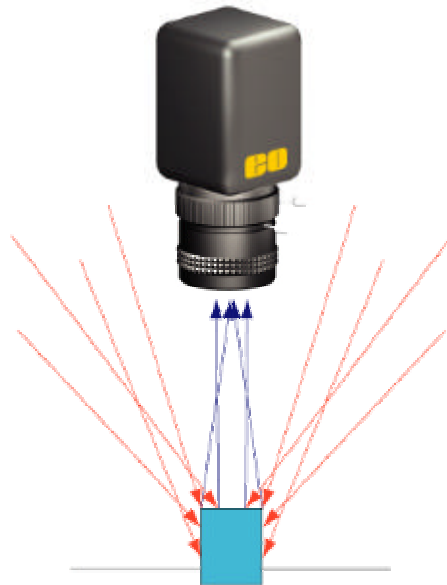
Pros: Reduce brillo, proporciona iluminación homogénea y minimiza sombras y reflexiones especulares.

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 7 Esquema Iluminación Difusa Frontal



Fuente: *Edmund Industrial Optics*

Iluminación difusa axial

Luz difusa en-línea con los rayos ópticos. El lente se ubica al frente de un **beamsplitter** que refleja la luz hacia el objeto. La iluminación es coaxial al acceso del sistema de imágenes.

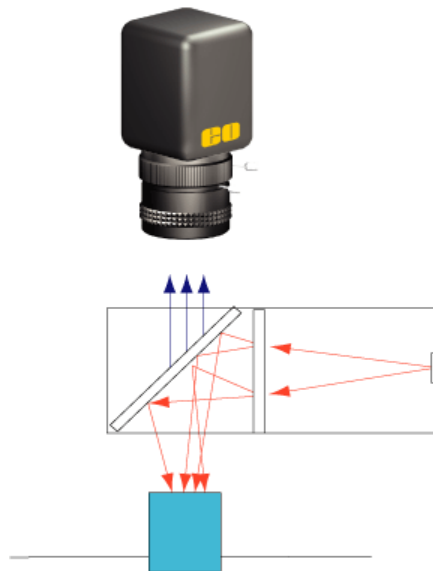
Pros: Muy uniforme y difusa; reduce el sombreado; muy pocos brillos, luz intensa pequeña.

Contras: Grande y difícil montar. Más baja intensidad a través del **beamsplitter** interior, afecta FOV y WD.

Tipo: Fibra óptica axial difusa. Iluminadores simples o múltiples de fibra óptica. LED iluminador axial difuso.

Aplicaciones: Medidas e inspección de objetos brillantes.

Figura 8 Esquema 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.

3.3.3.1. Lámparas Fluorescentes

Debido a las áreas de superficie relativamente largas, la luz producida por las lámparas fluorescentes es más difusa y mucho menos direccional que los “recursos puntuales” como los focos incandescentes, lámparas halógenas y HID.

Las lámparas fluorescentes tienen un bajo consumo eléctrico y una mayor vida útil. En estas lámparas, la energía recibida se convierte directamente en radiación lumínica, sin desarrollo apreciable de calor.

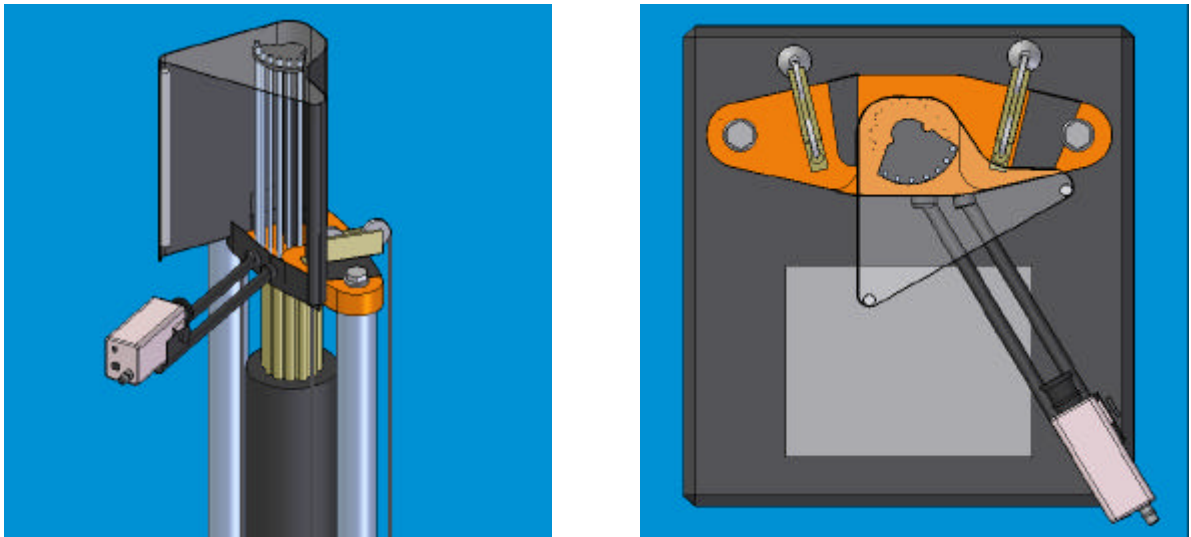
Además posee una característica de resistencia negativa, pues la caída de tensión en la lámpara disminuye con el aumento de la corriente. Por ello, estas fuentes de luz requieren para su funcionamiento la instalación de una impedancia o balasto que limite la intensidad absorbida para lograr una operación estable.

La curva espectral de un fluorescente típico, no es una curva suave como la de incandescencia, sino una sucesión de picos, valles y crestas. En concreto, los tubos fluorescentes de uso doméstico y comercial tienen un profundo valle en la zona de rojo rosado, es decir no emiten luz en esa zona y en cambio emiten grandes proporciones de verde y azul, por lo que en la foto aparecerá con un tinte verde azulado. Sin embargo, no todos los fluorescentes tienen la misma curva de emisión, ya sea por su modelo, por la composición de su gas o por el desgaste que implica su uso.

3.3.3.2. 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 fue necesario, implementar un sistema de ambiente controlado para la adquisición de las imágenes. El sistema implementado es el siguiente:

Figura 9 Esquema del ambiente controlado para fotografía



Fuente: Diseñador del sistema

Las lámparas fluorescentes seleccionadas son de 8 W, delgadas y de 36 cm. La distribución espectral y de potencia de la lámpara no se pudo conseguir con el proveedor, por lo que se realizó una caracterización de la lámpara. Con ayuda de un luxómetro se tomó un patrón de iluminación a 15 cm, que es la distancia del fluorescente al lente en el sistema propuesto. 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 lux medida a esa distancia es:

Tabla 7 Patrón de Iluminación

Máxima (Centro)	3500 Lux
Mínima (Extremos)	1800 Lux

Fuente: Autora del Proyecto

Está cantidad de luz es alta, sin embargo esto ayuda a mejorar el contraste de la imagen.

Una vez configurado el sistema se realiza la adquisición y el tratamiento de imágenes por medio del frame grabber y el software de medición. En el capítulo siguiente se hará una descripción de esta etapa.

4. ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES

En el presente trabajo, se trabajó 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.

4.1. ADQUISICIÓN

La extensión IC LabVIEW consiste en un juego de VIs y DLLs que permiten usar todas las funciones de IC Imaging Control en LabVIEW. Este software realiza la adquisición de imágenes del frame grabber. De manera que con unos pocos VIs se selecciona el dispositivo de captura, el tipo de imagen, el formato de video y se graban imágenes.

4.2. CALIBRACIÓN

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

La calibración espacial es el proceso de transformación del pixel 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 para mostrar la imagen y hacer mediciones.

Las herramientas de calibración de IMAQ Visión 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.

4.2.1. 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. 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.

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.

4.2.2. 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 es fijada a indirecta. Esto alinea el eje y a la columna mas a la izquierda de los puntos en la cuadrícula.

4.2.3. 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 de perspectiva 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 sus puntos. Se puede 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.

4.2.4. 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.

4.2.5. 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.

4.2.6. 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.

4.2.7. 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 para hacer las mediciones.

4.3. TRATAMIENTO

La estrategia elegida para la medición del desplazamiento en la presente aplicación 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.

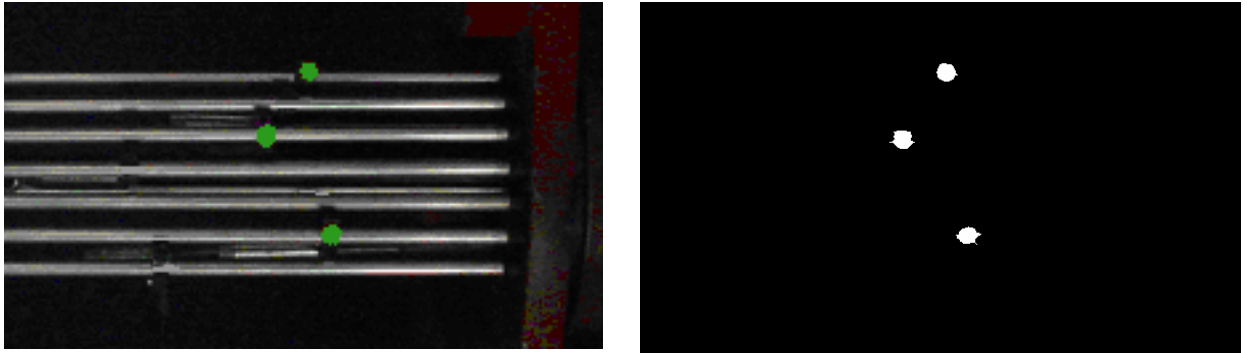
El color elegido para las marcas, buscando obtener el máximo contraste, es el verde, debido a que como se mencionó anteriormente la iluminación con fluorescentes presenta una coloración verde azul. La forma de las marcas es rectangular debido a que la naturaleza de la medición es de nivel.

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.

Una vez se obtiene esta imagen es conveniente realizar un filtrado para eliminar el posible ruido presente en la imagen y posteriormente determinar el centro de masa de las marcas. Con ayuda del *VI IMAQ Count Objects* se puede realizar esto en un solo paso. Este VI 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. Otra opción permite rechazar los objetos que toquen los bordes del área de búsqueda e ignorar los

agujeros que en el proceso de segmentación puedan crearse en los objetos. En la siguiente figura se observa una imagen con las marcas segmentadas.

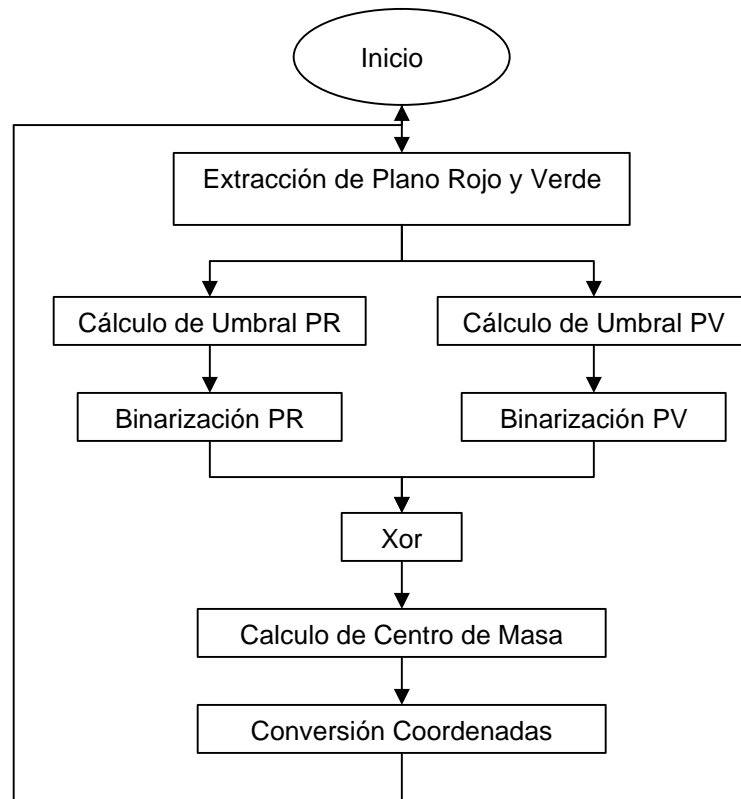
Figura 10 Imagen original e imagen con las marcas segmentadas.



Fuente: Autora del proyecto

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

Figura 11 Diagrama de flujo del algoritmo de tratamiento digital de Imágenes

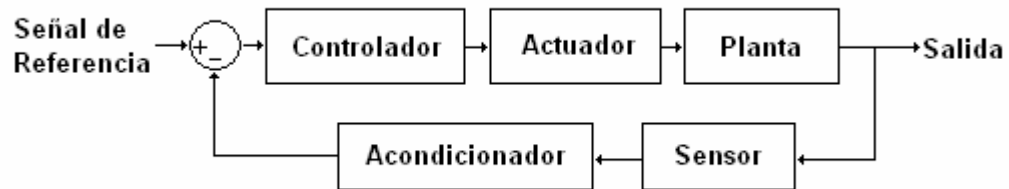


Fuente: Autora del proyecto

5. CONTROL DE TEMPERATURA

En el sistema de control se pueden distinguir los siguientes elementos:

Figura 12 Elementos del Sistema



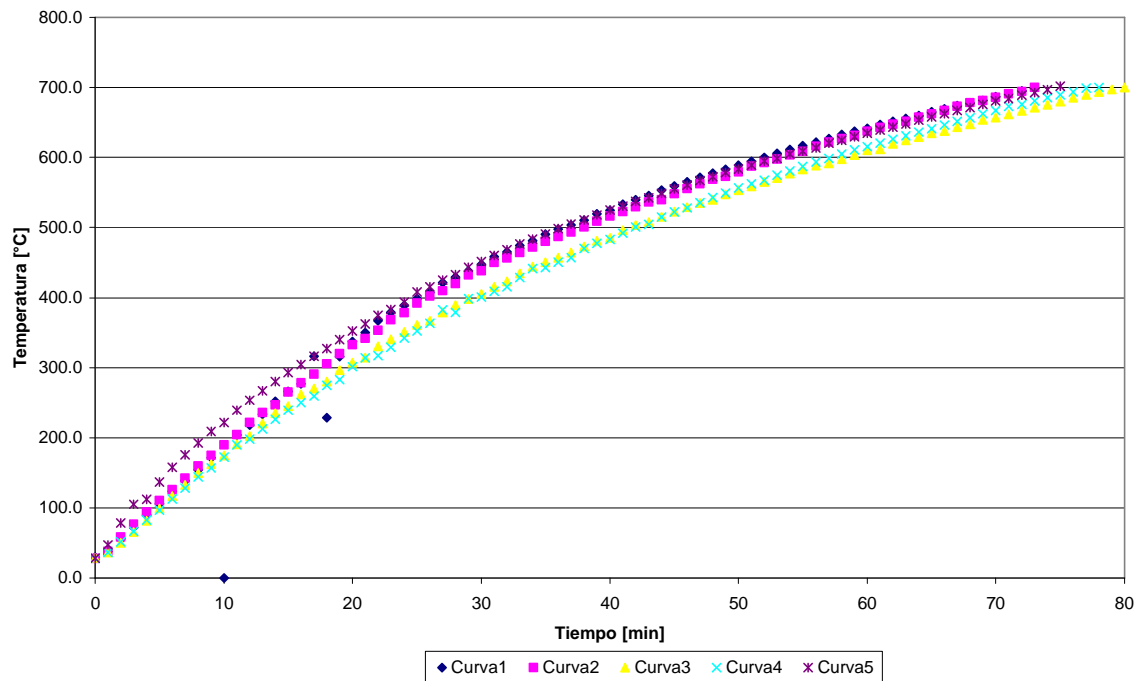
Fuente: Autora del proyecto

5.1. PLANTA

La base del diseño del sistema de control es el conocimiento de la planta, a partir de allí se pueden definir los elementos adicionales. Como primer paso, se realizó una caracterización aproximada y preliminar del horno. El procedimiento empleado fue realizar curvas de temperatura vs. tiempo, aplicando al sistema 220 VAC. La medición de temperatura se realizó con un termómetro Fluke y un periodo de muestreo de 1 minuto. Se tomaron 5 curvas desde temperatura ambiente hasta 700°C. La temperatura ambiente promedio fue de 28.48°C y la corriente promedio consumida por el equipo es de 7,0 Amperes AC. En la Figura 13 se presentan las curvas obtenidas*.

*Los datos se presentan en el ANEXO D.

Figura 13 Curvas de Caracterización Sistema Calefactor



Fuente: Autora del proyecto

Con cada una de estas curvas se realizó un ajuste de segundo grado, el cual se presenta a continuación:

$$Y = k_1 + k_2 e^{-\frac{t}{t_2}} + k_3 e^{-\frac{t}{t_3}} \quad (5)$$

Tabla 8 Constantes del Ajuste de 2^{ndo} Orden

Curva	k_1	k_2	t_2	k_3	t_3
1	3193,5	-777,4	38,7	-2403,6	7690,2
2	6440,4	-530,8	29,8	-5893,2	2161,5
3	5743,2	-557,6	34,9	-5168,7	2269,0
4	5890,2	-633,4	41,8	-5237,6	2730,4
5	6051,1	-398,1	20,8	-5621,3	1456,5

Fuente: Autora del proyecto

Como la constante de tiempo τ_3 es mucho mayor que τ_2 se concluye que un ajuste de primer orden es suficiente para representar el sistema.

$$Y = k_1 + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (6)$$

Tabla 9 Constantes del Ajuste de 1^{er} Orden

Curva	k_1	k_2	τ_2
1	825.6576	-812.6194	40.0703
2	839.4618	-817.0102	42.7565
3	839.6269	-818.8271	47.1562
4	900.8589	-879.1710	53.2566
5	792.1903	-746.4175	38.3693

Fuente: Autora del proyecto

Donde sus valores promedio son:

Tabla 10 Valores promedio de las Constantes del Ajuste

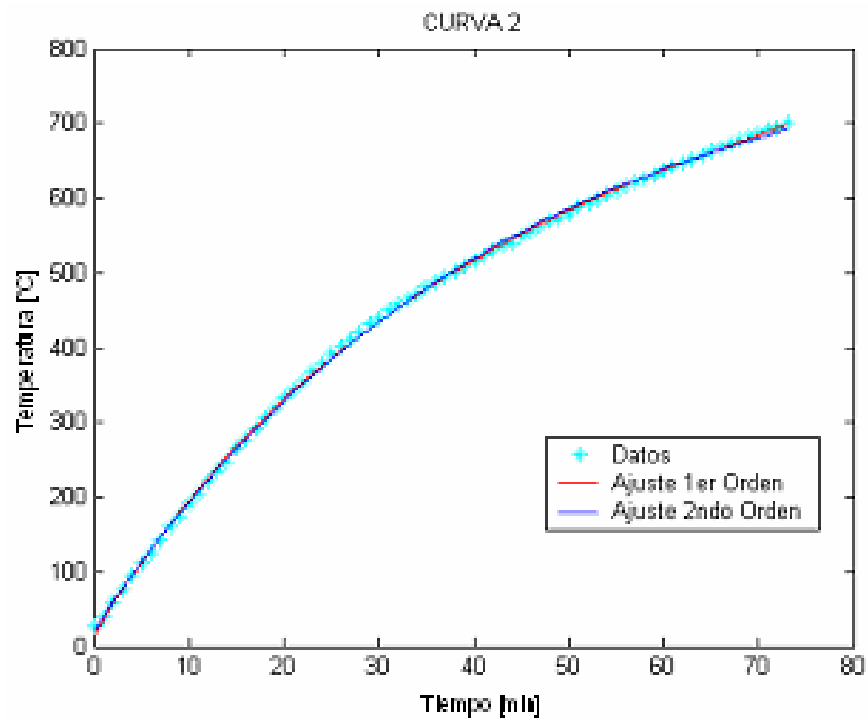
k_1	k_2	τ_2
839.5591	-814.8090	44.3218

Fuente: Autora del proyecto

A continuación se presenta una de las gráficas de los ajustes de 1^{er} y 2^{ndo} orden*.

*En el ANEXO D se presentan las gráficas de los ajustes de todas las curvas.

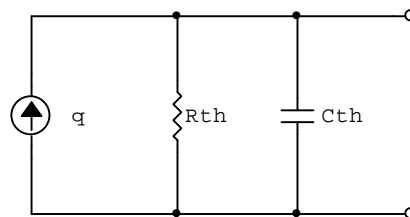
Figura 14 Ajuste de la Curva 2



Fuente: Autora del proyecto

Los sistemas térmicos se pueden modelar en términos de resistencia y capacitancia⁵. A continuación se presenta el modelo de parámetros concentrados equivalente:

Figura 15 Modelo equivalente del Sistema



Fuente: Autora del proyecto

⁵OGATA Katsuhiko, INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA, Prentice Hall, México, 3a. Edición, 1998. Capítulo 3, Modelado matemático de sistemas dinámicos. p.96

Para la transferencia de calor por conducción o convección,

$$q = K\Delta\theta \quad (7)$$

En donde: $q =$ flujo de calor; kcal/seg

$\Delta\theta =$ diferencia de temperatura, °C

$K =$ coeficiente, kcal/seg°C

Como el elemento calefactor es una resistencia, el flujo de calor generado corresponde a,

$$P = RI^2 \quad (8)$$

$$q = i^2 R = (7)^2(34,3) = 1680,7W = 0,4015kcal / seg \quad (9)$$

En esta ecuación se tomo el valor de corriente registrado en la caracterización del sistema y la resistencia calefactora medida.

$$q_i = qR_{th} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] + q_0 \quad (10)$$

$$qR_{th} = k_2 \Rightarrow R_{th} = -\frac{k_2}{q} \quad (11)$$

$$t_2 = R_{th} C_{th} \Rightarrow C_{th} = \frac{t_2}{R_{th}} \quad (12)$$

Tabla 11 Resistencia y Capacitancia Equivalentes por curva

Curva	R_{th}	C_{th}
1	0.4835	4972.5
2	0.4861	5277.4
3	0.4872	5807.5
4	0.5231	6108.6
5	0.4441	5183.7

Fuente: Autora del proyecto

Donde sus valores medios son:

Tabla 12 Resistencia y Capacitancia promedio

$\overline{R_{th}}$	$\overline{C_{th}}$
0.4848	5469.9

Fuente: Autora del proyecto

A partir del ajuste de primer orden se puede sacar la función de transferencia del sistema calefactor. Este ajuste corresponde a la respuesta del sistema a una entrada senoidal cuyo valor eficaz corresponde a 220 V. Como la constante de tiempo τ_2 es muy grande si se compara con la frecuencia de la senoidal, se puede asumir que la entrada al sistema es un escalón de amplitud de 220, cuya transformada de Laplace es:

$$X(s) = \frac{A}{s} \quad (13)$$

Tomando la transformada de Laplace en la ecuación (6) se tiene que,

$$Y(s) = \frac{k_1}{s} + \frac{k_2}{s + \frac{1}{t_2}} \quad (14)$$

$$Y(s) = \frac{k_1 s + \frac{k_1}{t_2} + k_2 s}{s + \frac{1}{t_2}} \frac{1}{s} \quad (15)$$

Por lo tanto,

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k_1 s + \frac{k_1}{t_2} + k_2 s}{s + \frac{1}{t_2}} \frac{1}{A} \quad (16)$$

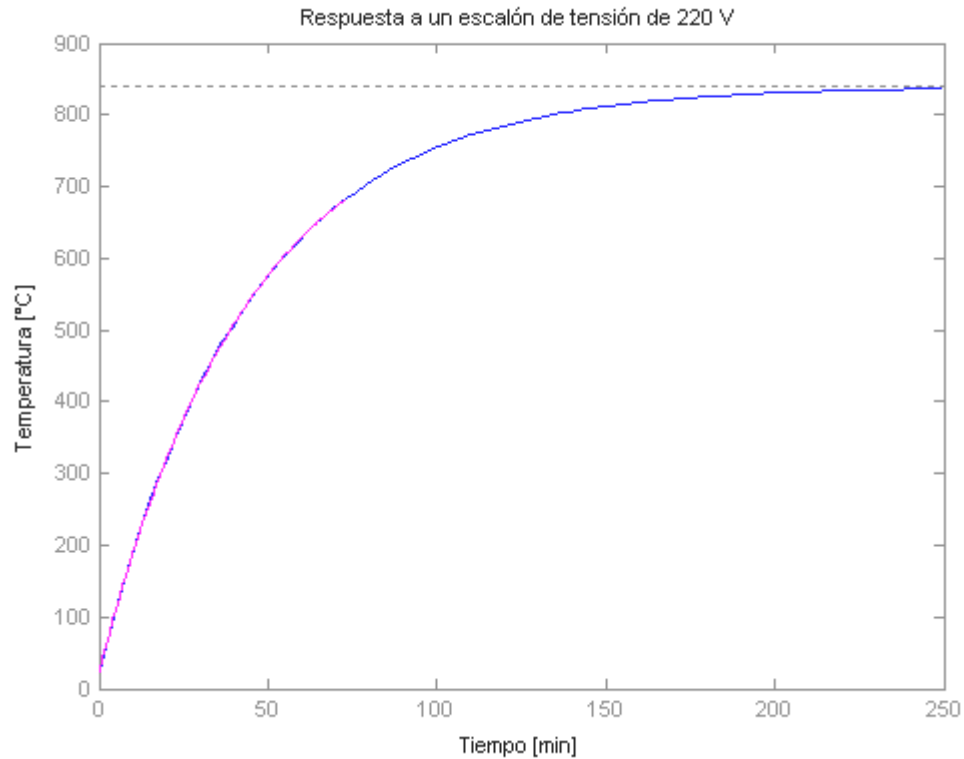
Organizando,

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{(k_1 + k_2)t_2 s + \frac{k_1}{A}}{t_2 s + 1} \frac{1}{A} \quad (17)$$

$$H(s) = \frac{4.9862s + 3.8162}{44.3218s + 1} \quad (18)$$

A continuación se presenta la gráfica de la respuesta del sistema a una entrada escalón.

Figura 16 Respuesta al Escalón de la Función de Transferencia del Sistema Calefactor



Fuente: Autora del proyecto

5.2. ACTUADOR

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

$$\Delta tem = kI^2 \quad (19)$$

$$I = \frac{V_{eff}}{R} \quad (20)$$

Por lo tanto para controlar la temperatura del horno se debe controlar la tensión eficaz aplicada a la resistencia. Para hacerlo, se implementó un controlador bidireccional monofásico de onda completa⁶, por medio de un TRIAC. Como se trabaja con una tensión de 220 Volts y una corriente de 7 amperes se eligió un TRIAC Q8040, que es de 800 Volts y 40 Amperios*.

En este caso, si el voltaje de entrada es,

$$v_s = \sqrt{2}V_s \text{Sen}wt \quad (21)$$

para un ángulo de disparo a el voltaje rms de salida esta dado por:

$$V_o = V_s \left[\frac{1}{p} \left(p - a + \frac{\text{sen}2a}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (22)$$

El circuito de disparo se implemento 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 Vc, se produce un pulso de tensión desplazado en el tiempo un ángulo a con respecto del paso por cero de la señal senoidal. El ángulo de disparo del TRIAC esta dado por:

⁶ MUHAMMAD H. RASHID, Electrónica de potencia, Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Pearson Education, México, Segunda Edición, 1995. Capitulo 6, Controladores de voltaje CA, Pág. 195.

*Ver ANEXO E.

**Idem.

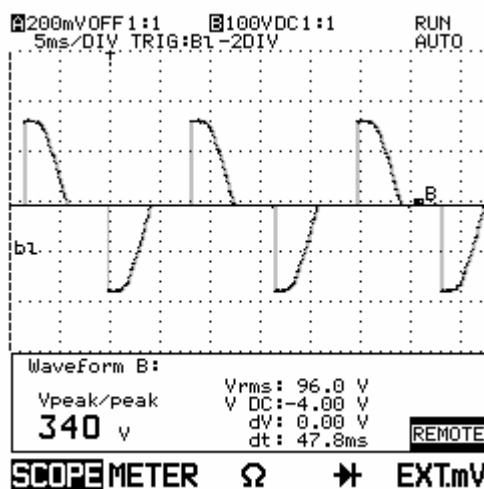
$$a(seg) = \frac{V_{control} R_9 C_{10}}{1.1 V_{ref}} \quad (23)$$

Donde V_{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 gran potencia, se debe realizar 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 unidireccional. En la Figura 18 se presenta el circuito de disparo implementado.

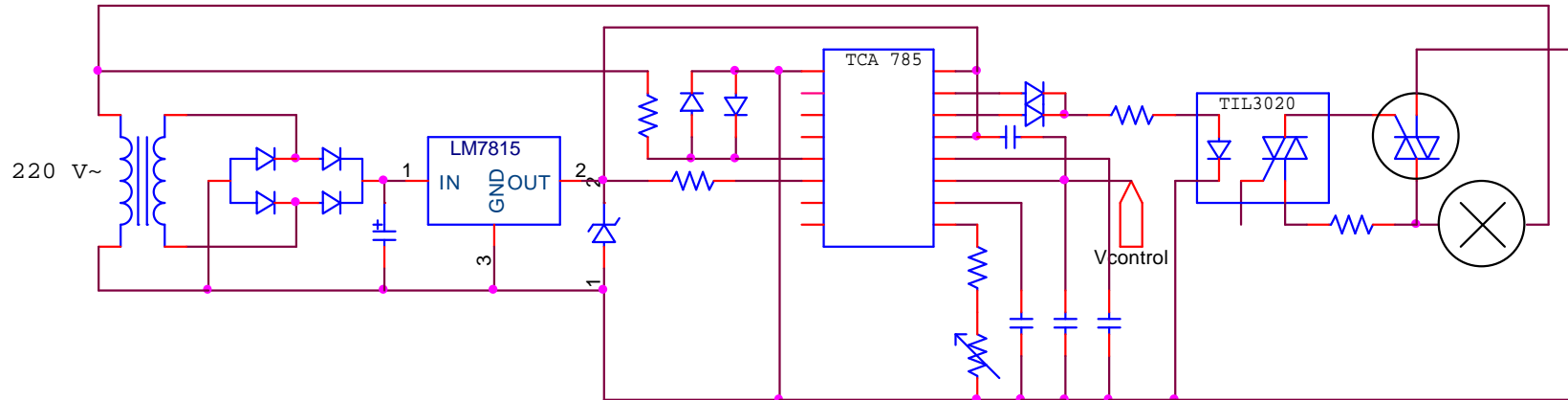
Para verificar el correcto funcionamiento de este circuito se reemplazó el horno por un bombillo y el nivel de la señal de control se varió con un potenciómetro. La señal que se obtuvo en los terminales del bombillo se presenta a continuación.

Figura 17 Tensión Aplicada a la carga para un ángulo de disparo de $\sim 80^\circ$



Fuente: Autora del proyecto

Figura 18 Circuito de Disparo del TRIAC



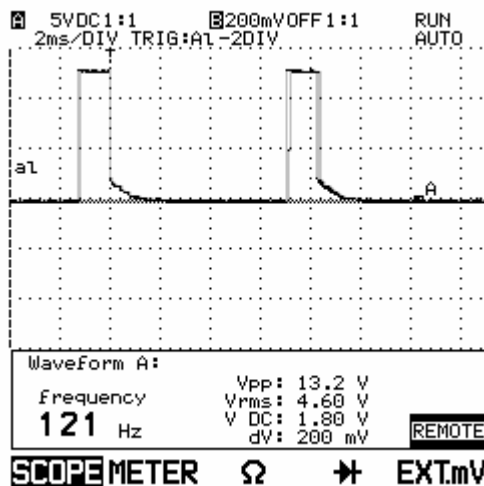
Fuente: Autora del proyecto

El TCA785 permite controlar el ancho de los pulsos de disparo variando la capacitancia conectada al pin 12, o ampliarlos hasta 180° conectando dicho pin a 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 disparara correctamente. El ancho de pulso esta dado por:

$$t_p(\text{ms}) = \frac{C_{12}(\text{pF})}{2} + 30 \quad (24)$$

A continuación se presenta una gráfica de los pulsos de disparo:

Figura 19 Pulsos de disparo del TRIAC



Fuente: Autora del proyecto

5.3. CONTROLADOR

5.3.1. Acciones básicas de control

Para la descripción del controlador empleado en el presente proyecto, es conveniente clasificar los controladores industriales de acuerdo con sus acciones de control de la siguiente manera:

1. Control de dos posiciones o de encendido y apagado (on/off)
2. Control PID
3. Control con lógica Fuzzy

El tipo de controlador debe seleccionarse con base en la naturaleza de la planta y las condiciones operacionales. A continuación se da una breve descripción de estos controladores.

5.3.1.1. Control de dos posiciones.

Es la forma más simple de controlar. En estos sistemas de control, el actuador solo tiene dos posiciones, que generalmente son encendido y apagado.

5.3.1.2. Control PID.

Actualmente, es el algoritmo de control más usado en la industria. A menudo, se usa control PID en procesos que incluyen sistemas de calefacción y enfriamiento, monitoreo de nivel de un líquido, control de flujo, y control de presión.

5.3.1.3. Control con lógica fuzzy.

Ha surgido para responder al control de sistemas y procesos industriales complejos. Los controladores fuzzy son capaces de adaptarse a medios ruidosos, perturbados y donde puedan existir variaciones en los parámetros de la planta. En ellos la decisión o acción final de control esta fundamentada en la intuición, conocimiento y experiencia humana, permitiendo obtener controles semi-inteligentes.

Dado que el sistema se caracterizó de manera satisfactoria y no presenta perturbaciones ni variaciones, y además es estable, se escogió el Control PID.

5.3.2. Estructura del PID

Los miembros de la familia de controladores PID, incluyen tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Estos controladores son los denominados P, I, PI, PD y PID.

5.3.2.1. P: acción de control proporcional

Da una salida del controlador que es proporcional al error. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (off-set).

5.3.2.2. I: acción de control integral

Da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de controlar lento. La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

5.3.2.3. PI: acción de control proporcional-integral

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta de cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre dará una acción de control creciente, y si fuera negativo, la señal de control será decreciente. Muchos controladores industriales tienen solo acción PI. Virginia Mazzone dice: "Se puede demostrar que un control PI es adecuado para todos los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden"⁷.

⁷MAZZONE, Virginia. Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes. 2002. p.3.

5.3.2.4. PD: acción de control proporcional-derivativa

Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. Cuando una acción de control derivativa se agrega a un controlador proporcional, permite obtener un controlador de alta sensibilidad.

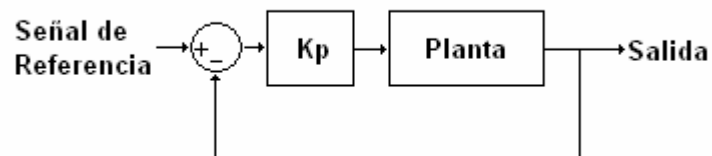
5.3.2.5. PID: acción de control proporcional-integral-derivativa

Esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales.

5.3.3. Ajuste de las ganancias del controlador

Existen dos métodos denominados reglas de sintonización de Ziegler-Nichols. En el primer método, es necesario que la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario exhiba una curva con forma de S, lo cual no se presenta en este caso. En el segundo método, utilizando sólo control proporcional, se registra la ganancia crítica del controlador $K_p = K_c$ y el período de oscilación, P_c .

Figura 20 Lazo cerrado solo con ganancia proporcional



Fuente: Autora del proyecto

Dado que la función de transferencia de la planta es,

$$H(s) = \frac{4.9862s + 3.8162}{44.3218s + 1} \quad (25)$$

entonces, la ecuación característica en lazo cerrado correspondiente esta dada por:

$$44.3218s + 1 + K_p(4.9862s + 3.8162) = 0 \quad (26)$$

$$(44.3218 + 4.9862K_p)s + 1 + 3.8162K_p = 0 \quad (27)$$

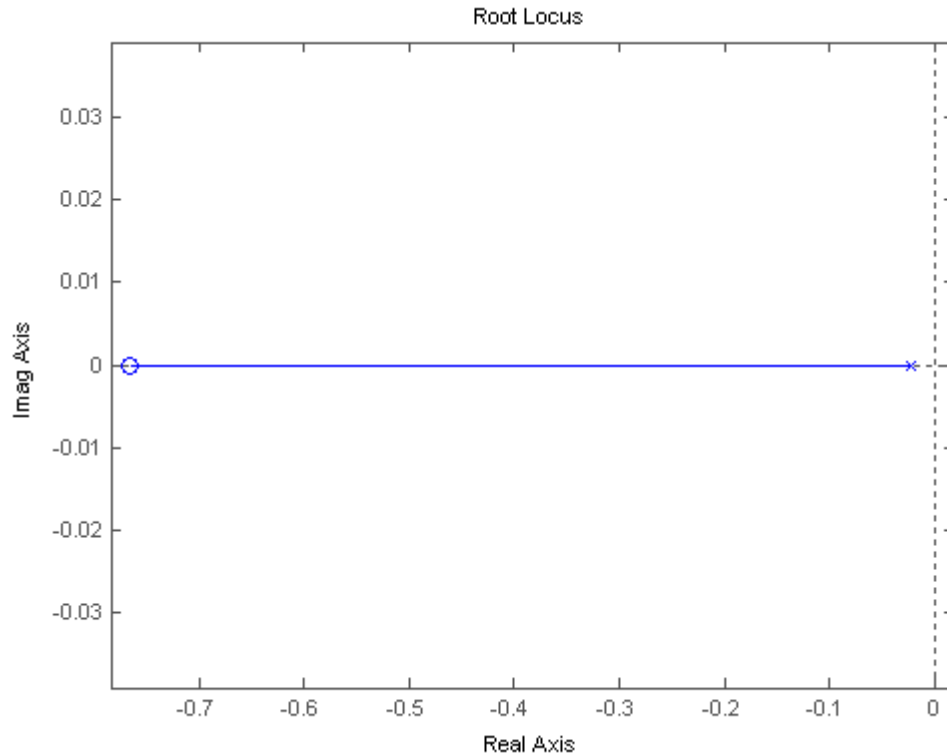
y el arreglo de Routh se convierte en:

$$\begin{array}{l} s^1 \quad 44.3218 + 4.9862K_p \\ s^0 \quad 1 + 3.8162K_p \end{array} \quad (28)$$

Los valores de la columna son positivos para todos los valores de K_p positivos, por lo tanto el sistema en lazo cerrado no exhibirá oscilaciones sostenidas, para K_p positivos. Por lo tanto, para ajustar las ganancias del controlador no se pueden emplear los métodos aproximados.

Como la respuesta transitoria de un sistema en lazo cerrado se relaciona con la ubicación de los polos en lazo cerrado, observar la gráfica del lugar geométrico de las raíces puede ayudar a sintonizar el sistema.

Figura 21 Gráfica del Lugar geométrico de las Raíces



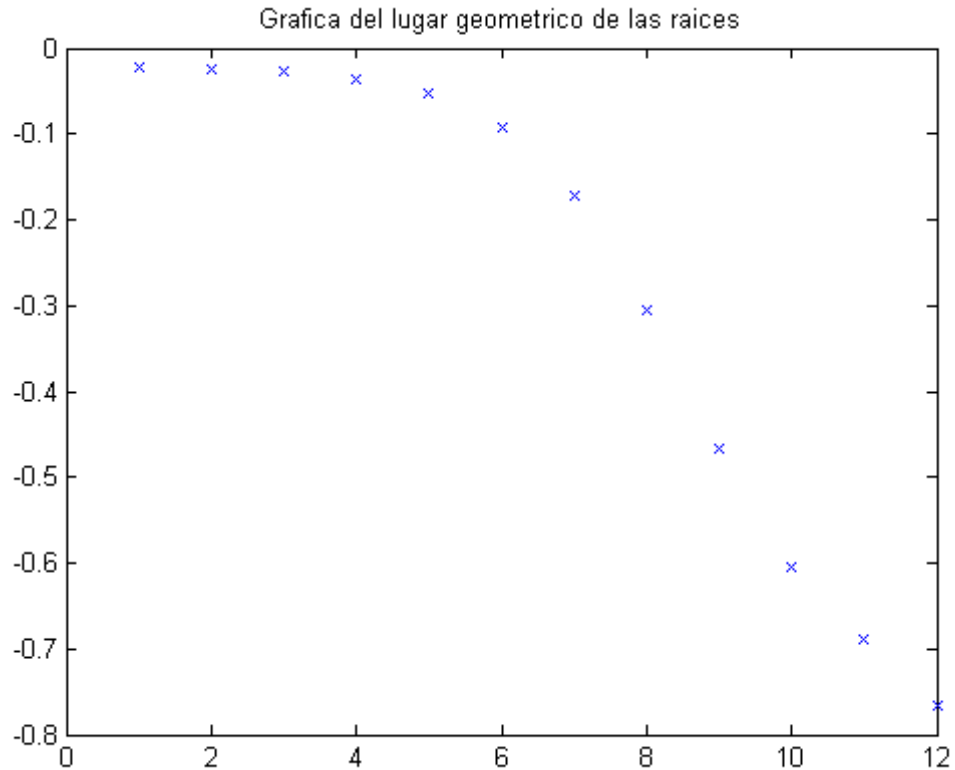
Fuente: Autora del proyecto

En la Figura 21 se puede observar que el sistema siempre es estable. Dado que $H(s)$ es una cantidad compleja la ecuación (27) implica dos condiciones, condición de ángulo y condición de magnitud. El lugar geométrico de las raíces es una gráfica de los puntos del plano complejo que sólo satisfacen la condición de ángulo. Con ayuda del comando $[r,k] = rlocus(num,den)$ se puede encontrar un grupo de constantes y la respectiva ubicación de las raíces que satisfacen la condición de magnitud.

$$K = [0 \quad 0.0269 \quad 0.0652 \quad 0.1580 \quad 0.3827 \quad 0.9272 \quad 2.2464 \quad 5.4421 \quad 13.1842 \quad 31.9403 \quad 77.3793 \quad Inf]$$

$$r = [-0.0226 \quad -0.0248 \quad -0.0280 \quad -0.0355 \quad -0.0532 \quad -0.0927 \quad -0.1724 \quad -0.3046 \quad -0.4662 \quad -0.6036 \quad -0.6888 \quad -0.7653]$$

Figura 22 Gráfica del lugar geométrico de las raíces



Fuente: Autora del proyecto

Por lo tanto, el parámetro inicial de sintonización elegido es $K_p=0.0269$.

5.4. SENSOR

El Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu originalmente tenía una termocupla de control tipo S, además cuenta un tubo dilatométrico adicional para alojarla. El diámetro interno de dicho tubo es de $8\pm 0.05\text{mm}$. Como se observa en el ANEXO B uno de los controles establecidos en la norma original, es hacer una verificación de la uniformidad de la temperatura en los tubos dilatométricos, en ella, se presenta un procedimiento de verificación en el cual se deben tomar lecturas de la temperatura en la mitad inferior del tubo dilatométrico a 60, 120 y 180mm del fondo del tubo. Para llevar a cabo esta verificación, es conveniente disponer tres

termocuplas en dicho tubo a diferentes alturas*. Por lo tanto el primer factor en consideración es que la termocupla elegida debe ser de diámetro inferior a 8/3mm. El segundo factor en consideración es que el revestimiento de la termocupla debe soportar hasta 800°C.

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. Por lo tanto se mando a fabricar 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. La termocupla tipo S no la fabrican con este tipo de revestimiento, por lo que no se pudo conservar el tipo de termocupla original.

5.5. ACONDICIONADOR

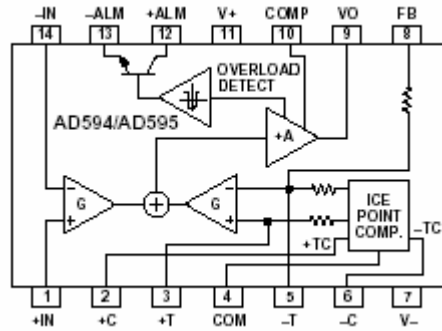
El principal inconveniente de las termocuplas es su necesidad de "compensación de cero". Esto se debe a que en algún punto, se empalman los cables de la termocupla con un conductor normal. Para esto, se utilizó el circuito integrado AD595C que combina una referencia de punto frío con un amplificador precalibrado para producir 10mV/°C. En la ecuación (29) se presenta la función de transferencia que puede usarse para determinar el voltaje de salida del integrado.

$$V_{out_{AD595}} = (\text{VoltajeSalidaK} + 11\text{mV}) * 247.3 \quad (29)$$

El diagrama de bloques del integrado se presenta a continuación.

*Aunque el sistema solo se implementa con una, en todas las consideraciones del diseño se contarán las tres. El uso de tres termocuplas se deja como recomendación para una etapa posterior.

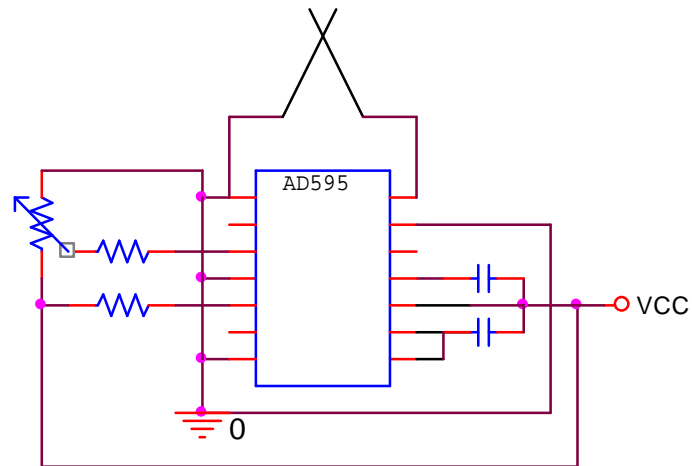
Figura 23 Diagrama de bloques del AD595



Fuente: Analog Devices

Se pueden agregar condensadores de compensación entre los pines 9-10 y 10-11 para minimizar la amplificación del ruido de alta frecuencia recogido por la termocupla. Para anular cualquier error de calibración se puede añadir una resistencia al pin 5 y con un potenciómetro al pin 3 ajustar el cero. En la Figura 24 se muestra en circuito implementado para el acondicionamiento de la señal de temperatura.

Figura 24 Circuito de acondicionamiento implementado



Fuente: Autora del proyecto

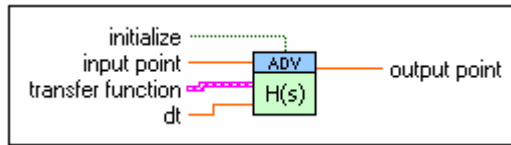
5.6. SIMULACIÓN Y CONTROL

El modelaje y simulación es una herramienta para el diseño, análisis y optimización de sistemas, por lo tanto, para minimizar el ensayo y error, predecir el resultado de las acciones de control que se ejercen sobre el sistema, y posteriormente realizar el control por PC se usó la librería de LabVIEW PID Control Toolset⁸.

Como se cuenta con un modelo matemático de la planta, el primer paso es utilizar el *VI Transfer Function (PID)*, que calcula la salida de un sistema cuando se da la función de transferencia y la entrada. La función de transferencia se describe por los polinomios del numerador(s) y del denominador(s).

⁸En el anexo G se describen los VIs de la librería empleados en esta aplicación.

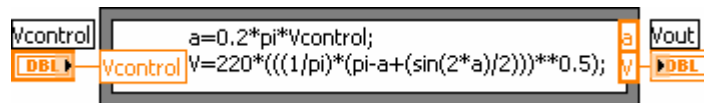
Figura 25 VI Transfer Function (PID)



Fuente: LabVIEW ®

El segundo paso es realizar un subVI con el modelo del actuador. Como se describe en la respectiva sección, el actuador se puede modelar por medio de las ecuaciones (23) y (22). Por lo tanto, con ayuda del *VI Script Node* se puede modelar el actuador.

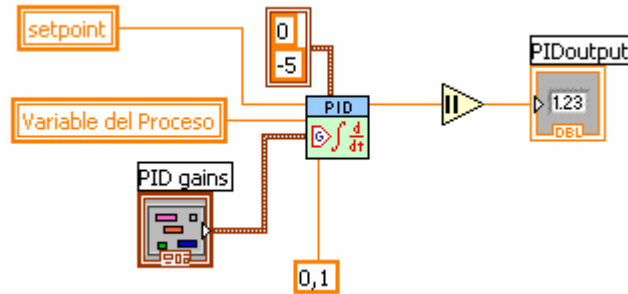
Figura 26 Modelo matemático del Actuador



Fuente: Autora del proyecto

El tercer paso es el controlador. El *VI PID* implementa un algoritmo PID básico, cuyas entradas son el valor deseado, la variable del proceso, y las constantes PID. Entre las entradas adicionales que ofrece, están el valor máximo y mínimo de la variable del proceso y el valor máximo y mínimo de la salida de control. En este caso, la salida de control debe disminuir si la entrada es menor que el valor deseado; como el funcionamiento del VI no lo permite, el rango seleccionado para la salida de control es de $[-5,0]$, y para conectar el controlador y el actuador se añade el bloque aritmético de valor absoluto.

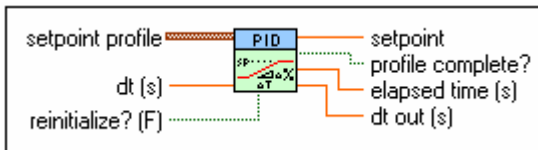
Figura 27 Controlador



Fuente: Autora del proyecto

El último elemento del sistema de control es el valor deseado. Para esto se emplea *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.

Figura 28 VI PID Setpoint Profile



Fuente: LabVIEW ®

Con estos VIs se sintonizó el lazo de control a partir del lugar geométrico de las raíces, para que la transición del modelo/simulación hacia el sistema final implementado sea rápida.

Como se expone en la sección de ajuste de ganancias del controlador, el control puede ser Proporcional, sin embargo, con este control el resultado de la simulación del sistema presenta un error de offset por lo que fue necesario implementar un sistema PI. Las constantes fueron ajustadas a prueba y error hasta que la respuesta del controlador diseñado fue satisfactoria siguiendo muy de

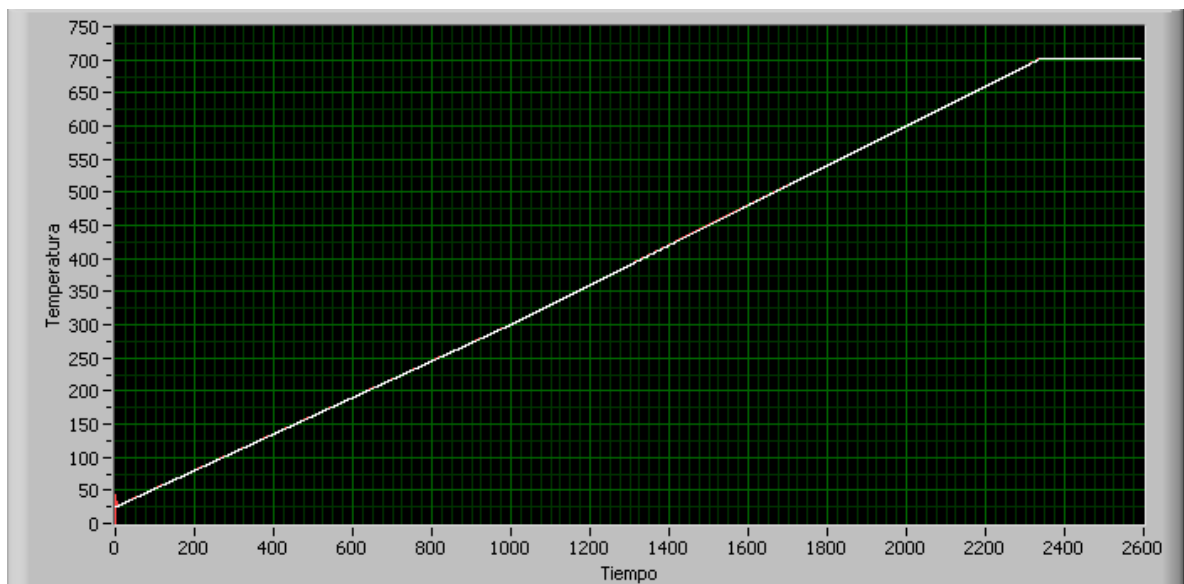
cerca al valor deseado. A continuación se presentan los parámetros del controlador y la gráfica del setpoint y de la respuesta del sistema de control.

Tabla 13 Parámetros del controlador

P	I
0.08	0.01

Fuente: Autora del proyecto

Figura 29 Respuesta del sistema al setpoint con el controlador



Fuente: Autora del proyecto

Una vez realizada la simulación con el modelo matemático utilizando señales simuladas, se sustituyen las señales simuladas por señales reales para evaluar el comportamiento del controlador ante señales reales, de manera que pueda ser optimizado y ajustado. En el capítulo siguiente se hace una descripción de la tarjeta de adquisición diseñada.

6. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

6.1. MÓDULO ANALÓGICO

6.1.1. Filtro

El problema de las termocupas es que suministran un voltaje muy bajo y susceptible a recibir interferencias eléctricas. Por lo tanto, se implementó un filtro de paso bajo con frecuencia de corte de 10Hz para limitar el ancho de banda. El tipo de filtro elegido es “Butterworth” ya que brinda una respuesta máximamente plana y de cuarto orden para obtener una alta pendiente de atenuación. Para construir el filtro de orden superior se implementaron dos filtros de paso bajo de segundo orden en cascada, cuya función de transferencia esta dada por:

$$T(s) = \frac{a_0}{s^2 + s \frac{w_0}{Q} + w_0^2} \quad (30)$$

$$Ganancia_{CD} = \frac{a_0}{w_0^2} \quad (31)$$

Debido a la sencillez y a que solo utiliza un amplificador se trabajo con la topología Sallen-Key. Esta topología es recomendada cuando la ganancia del filtro es unitaria y $Q < 3^9$. Para la construcción de filtros existen tablas para ajustar los

⁹Application Report SBFA001A - FilterPro MFB and Sallen-Key Low-Pass Filter Design Program. Texas Instruments.

parámetros. A continuación se presenta una tabla para la construcción de filtros Butterworth.

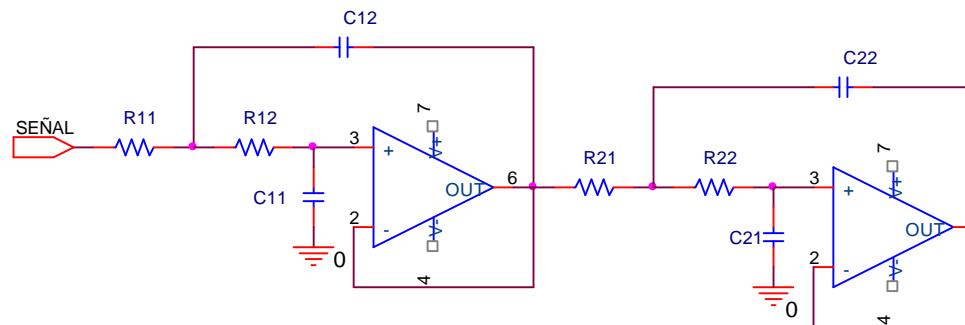
Tabla 14 Tabla filtro Butterworth

FILTER ORDER	Stage 1		Stage 2		Stage 3		Stage 4		Stage 5	
	FSF	Q	FSF	Q	FSF	Q	FSF	Q	FSF	Q
2	1.000	0.7071								
3	1.000	1.0000	1.000							
4	1.000	0.5412	1.000	1.3065						
5	1.000	0.6180	1.000	1.6181	1.000					
6	1.000	0.5177	1.000	0.7071	1.000	1.9320				
7	1.000	0.5549	1.000	0.8019	1.000	2.2472	1.000			
8	1.000	0.5098	1.000	0.6013	1.000	0.8999	1.000	2.5628		
9	1.000	0.5321	1.000	0.6527	1.000	1.0000	1.000	2.8802	1.000	
10	1.000	0.5062	1.000	0.5812	1.000	0.7071	1.000	1.1013	1.000	3.1869

Fuente: Application Report SLOA049B - Active Low-Pass Filter Design – Texas Instruments

En la Figura 30 se presenta la implementación Sallen-Key del filtro Butterworth de cuarto orden.

Figura 30 Filtro pasa-bajas implementado.



Fuente: Autora del proyecto

La función de transferencia para cada etapa es:

$$T(s) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \frac{1}{s^2 + s \frac{C_1 (R_1 + R_2)}{R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (32)$$

Por lo tanto,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (33)$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_1 (R_1 + R_2)} \quad (34)$$

A partir de la Tabla 14 y para $f_0 = 10$ Hz se obtienen los siguientes parámetros:

Tabla 15 Parámetros del Filtro pasa-bajas implementado

Etapa 1	R11	4.652 kO
	R12	24.77 kO
	C11	1 μ F
	C12	2.2 μ F
Etapa 2	R21	10.96 kO
	R22	14.998 kO
	C21	0.47 μ F
	C22	3.3 μ F

Fuente: Autora del proyecto

El filtro se implementó con el amplificador operacional OP27 de MAXIM debido a sus características de bajo ruido. Las características tenidas en cuenta para su elección se presentan a continuación:

Tabla 16 Características en consideración del OP27EP0141

Vos	25 [uV]
VosDrift	0.6[uV/°C]
Ibias	40 [nA]
Ios	35 [nA]
A _{ol} en DC	145 [dB]
Fu	8 [MHz]
A10Hz	145 [dB]
RuidoV (0.1Hz a 10Hz)	0.18 [uV]
RuidoI (0.1Hz a 10Hz)	4 [pA]

Fuente: Maxim

6.1.2. Conversor Analógico-Digital

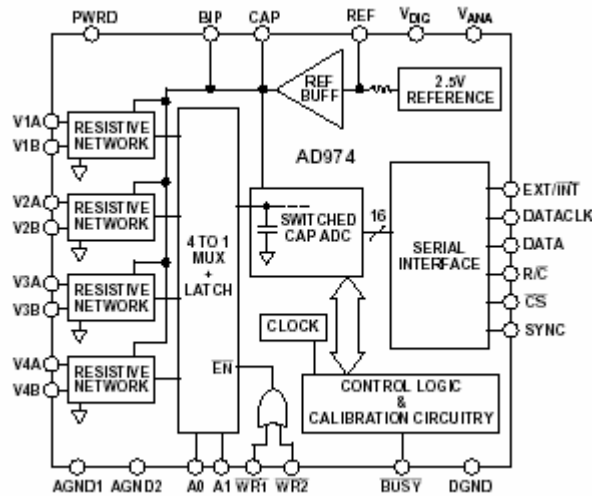
Uno de los objetivos del presente trabajo es realizar control del gradiente de temperatura de 3°C/min. A pesar de que la norma no da ninguna tolerancia, la dada en otras pruebas plásticas* de gradiente constante es de 0.1 °C, y se adoptó para el presente trabajo. Por lo tanto, la resolución mínima del sistema es 0.05°C, y el número de bits necesarios es:

$$n = \log_2 \left(\frac{800}{0.05} + 1 \right) \cong 13.96 \quad (35)$$

El conversor análogo-digital entonces debe ser de 14 bits y tres canales. El seleccionado es el AD974 de Analog Devices®, fabricante líder en el mercado en esta clase de dispositivos, que es de 16 bits, rango de ± 10V y cuatro canales. A continuación se presenta el diagrama de bloques funcional.

*Ver ANEXO A Comportamiento térmico del carbón

Figura 31 Diagrama de bloques funcional del AD974



Fuente Analog Devices ®

Este conversor opera con una sola fuente de 5 volts, tiene interfaz serial y puede manejarse con unas pocas líneas.

6.2. MODULO DIGITAL

El parámetro fundamental para determinar los elementos de este módulo es el tipo de interfaz con el computador. La interfaz seleccionada 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.

6.2.1. Microcontrolador

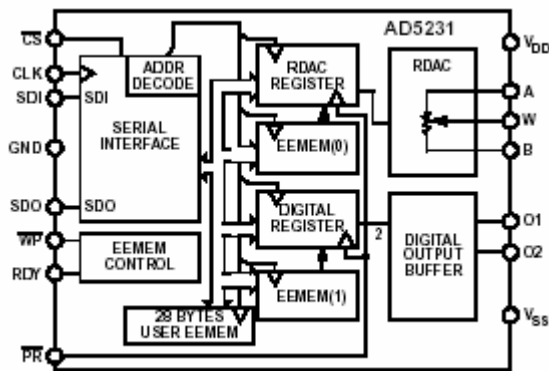
La función del microcontrolador en la presente tarjeta es interconectar los diferentes elementos con el computador, ya que, como se describe en la sección 5.6. SIMULACIÓN Y CONTROL, el control se hace por PC. A partir de la elección

del tipo de interfaz se busco un microcontrolador Motorola que contará con dicha interfaz. El seleccionado es el MC68HC908GP32, que además cuenta con interfaz SPI que permite manejar periféricos fácilmente.

6.2.2. Potenciómetro digital

El potenciómetro digital permite enviar la señal de control del PC al actuador descrito anteriormente. El potenciómetro seleccionado 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 32 Diagrama de bloques funcional del AD5231



Fuente: Analog Devices

6.2.3. 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.

6.2.4. Relé

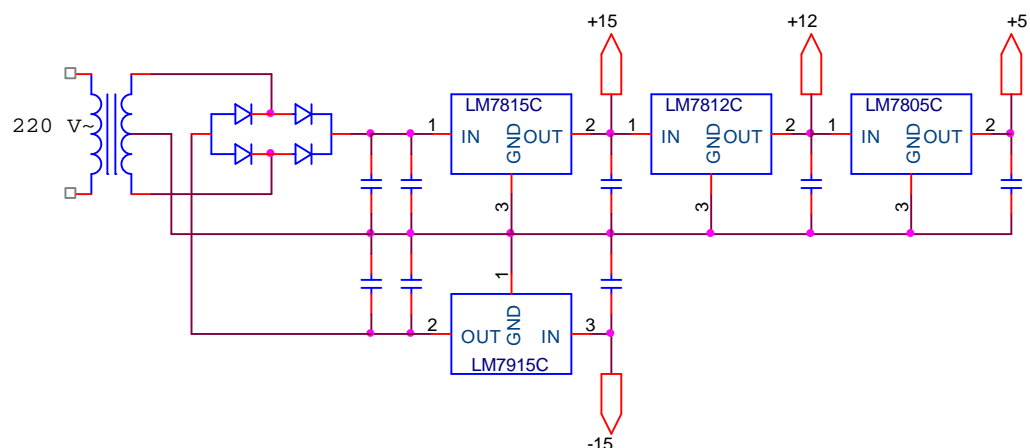
Como la zona plástica de los carbones inicia por encima de 300°C, el registro de datos de desplazamiento debe hacerse a partir de esta temperatura. Por esto, las lámparas fluorescentes para toma de fotografía se habilitan desde el microcontrolador una vez se a alcanzado esta temperatura.

En la Figura 34 se presenta el esquema del módulo analógico y digital de la tarjeta implementada.

6.3. MODULO DE ALIMENTACIÓN

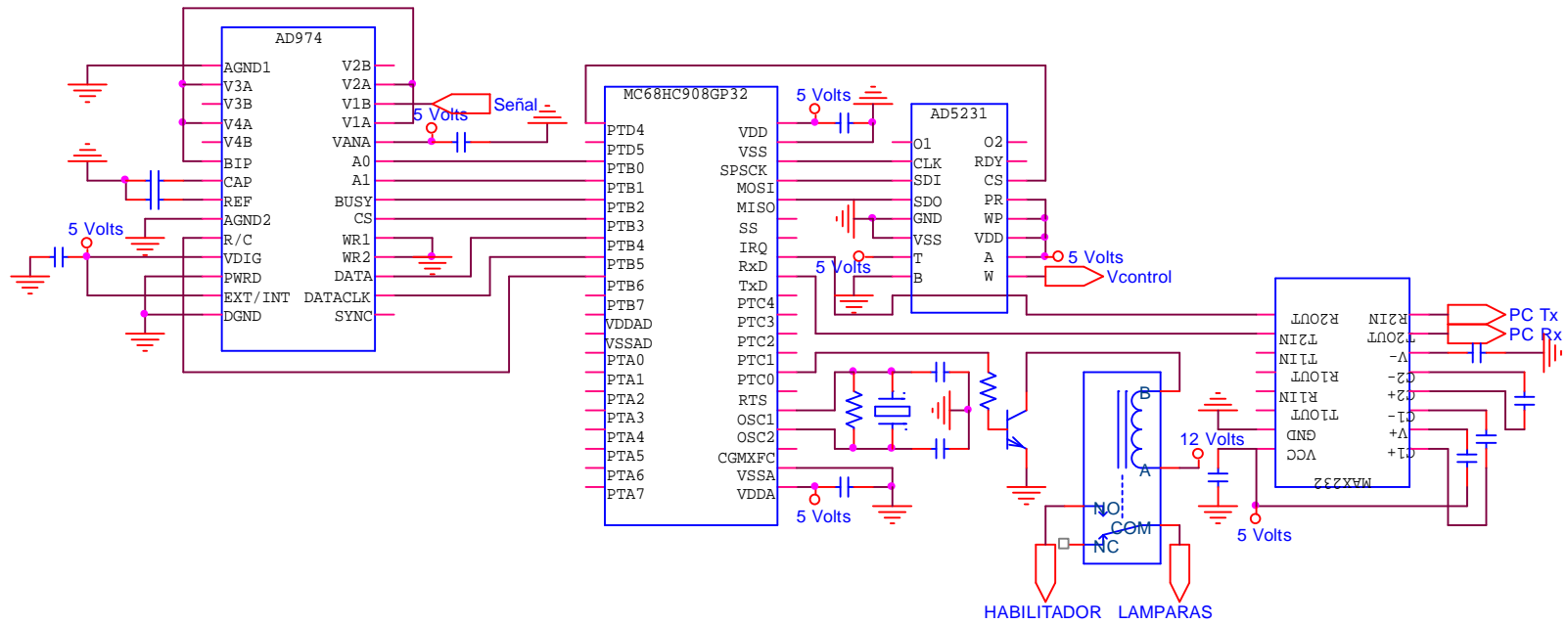
Este módulo es el encargado de suministrar energía a los demás módulos. En la Figura 33 se muestra el circuito, cuyas funciones son rectificar, filtrar y regular las tensiones necesarias para el funcionamiento de los CI. El circuito genera cuatro tensiones de alimentación en corriente continua de +5V, +12V, +15V y -15V.

Figura 33 Esquema del módulo de alimentación



Fuente: Autora del proyecto

Figura 34 Esquema del módulo analógico y digital



Fuente: Autora del proyecto

7. IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se hará una descripción de los ajustes y las condiciones finales del sistema implementado.

7.1. SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO

En la siguiente figura se observa parte del sistema de adquisición de imágenes implementado. De él se puede destacar lo siguiente:

Figura 35 Sistema de Adquisición de Imágenes Implementado



Fuente: Autora del proyecto

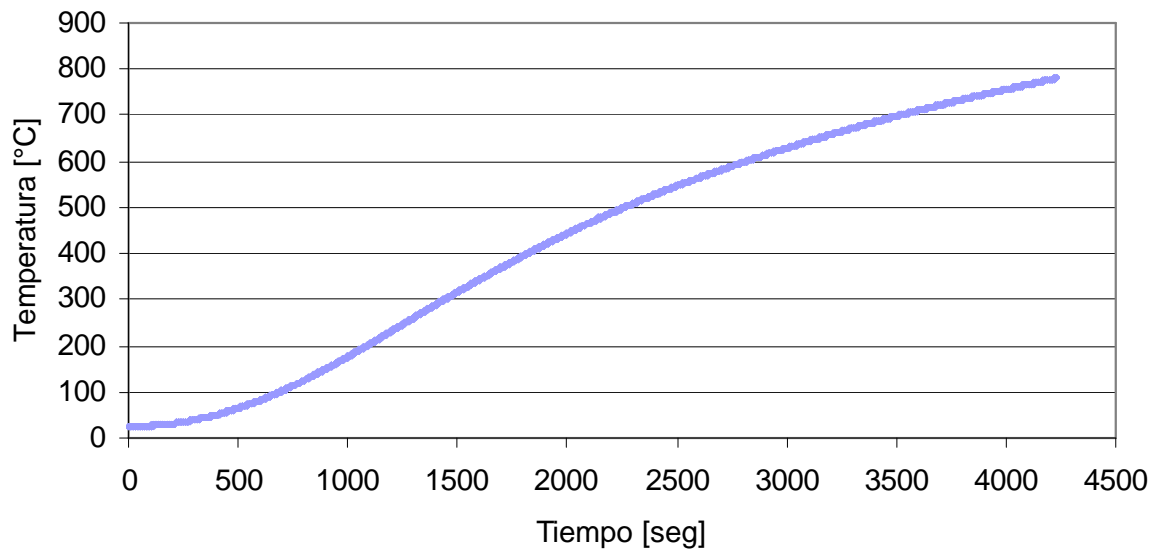
- **Marcas:** Debido a que no fue posible conseguir marcas de color con característica mate, se probaron diferentes materiales y pinturas, y los mejores resultados en la segmentación de las marcas se obtuvieron con marcas verdes de “contac”.

- **Filtros:** Para el ajuste final en la iluminación de la escena, fue necesario introducir dos placas de acrílico blanco de 2.5 mm, una frente a cada lámpara, para evitar la saturación de la imagen. El ajuste del iris del lente por si solo, no satisfizo los requisitos de contraste, para la adecuada segmentación, y de visualización de los pistones en la interfaz del usuario.
- **Protector del Lente:** Como el lente tiene parámetros ajustables, se protege con una pieza adicional, de manera que el usuario no cambie las condiciones del sistema durante la prueba.
- **Libertad:** Para permitir cambiar de cámara, se dejo la libertad de ajustar su ubicación por medio de 4 grados de libertad en el conjunto de piezas que la sostienen.
- **Patrón de Calibración:** Se puede ubicar fácilmente en el pistón central por medio de 3 sujetadores, además, le facilita la calibración al usuario demarcando el área de interés con un recuadro negro.

7.2. SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

Con la tarjeta de adquisición de datos implementada, se realizó una nueva caracterización del horno, con un periodo de muestreo de 1 seg, la cual se presenta en la Figura 36.

Figura 36 Caracterización final



Fuente: Autora del Proyecto

En esta caracterización se presenta un comportamiento diferente al modelo preliminar y aproximado que se planteo en la sección 5.1. La curva obtenida se puede modelar con la ecuación planteada a continuación.

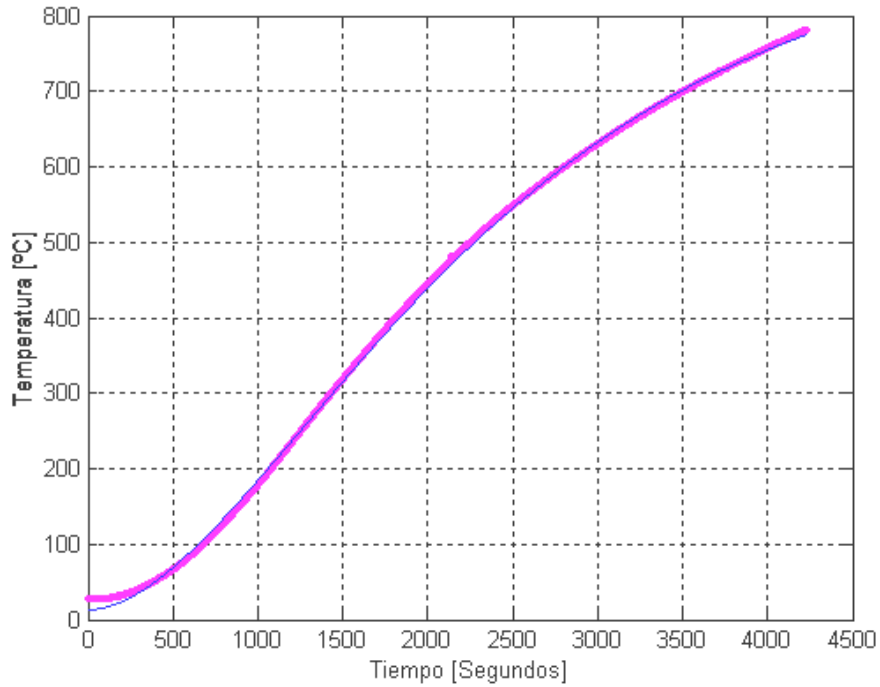
$$y(t) = K(1 - \frac{1}{t} e^{-\frac{t}{\tau}} - e^{-\frac{t}{\tau}} + k_2) \quad (36)$$

Tabla 17 Constantes del modelo

K	?	k₂
825.6576	40.0703	-812.6194

Fuente: Autora del proyecto

Figura 37 Curva característica sistema calefactor



Fuente: Autora del proyecto

La función de transferencia de esta ecuación es,

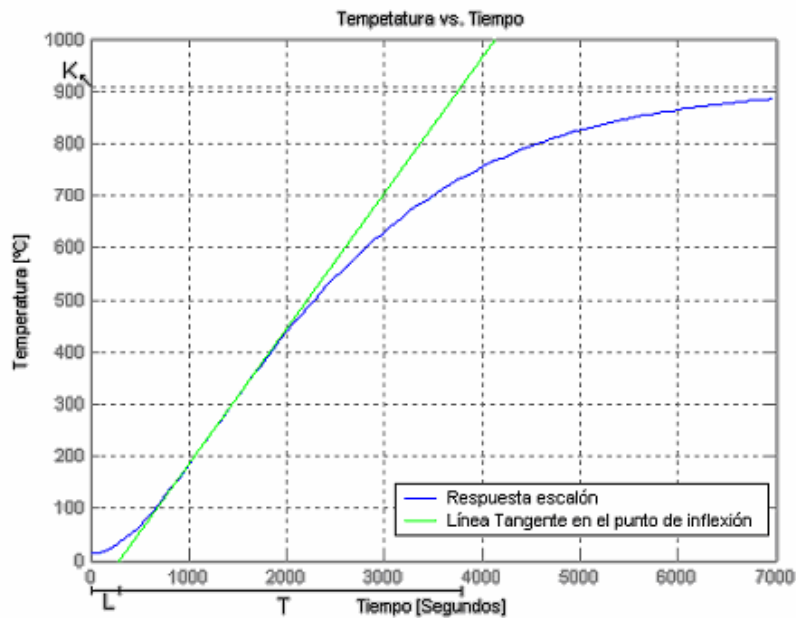
$$Y(s) = \frac{K}{s} \left(\frac{k_2 s^2 + 2 \frac{1}{t} k_2 s + \left(\frac{1}{t}\right)^2 (k_2 + 1)}{s^2 + 2 \frac{1}{t} s + \left(\frac{1}{t}\right)^2} \right) \quad (37)$$

Y asumiendo la misma entrada al sistema cuya función de transferencia esta dada por la ecuación (13),

$$Y(s) = \frac{0.0599s^2 + 9.5855e-005s + 2.6385e-006}{s^2 + 0.0016s + 6.3939e-007} \quad (38)$$

Para sintonizar el lazo de control fue necesario recalculer las constantes, y como en este caso se puede observar punto de inflexión en la curva, se puede usar el método de sintonización aproximado basado en la respuesta de la planta a una entrada escalón¹⁰, en el cual se debe trazar la línea tangente en el punto de inflexión. A continuación se presenta la curva de respuesta del sistema.

Figura 38 Curva de respuesta del sistema



Fuente: Autora del proyecto

En donde,

Tabla 18 Parámetros de sintonización de la curva de inflexión

L	T	K
288.461	3491.703	907.8427

Fuente: Autora del proyecto

¹⁰OGATA, Op. cit., Capítulo 10, Controles PID e introducción al control robusto, p 669.

La regla de sintonización se presenta a continuación,

Tabla 19 Regla de sintonización Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: Ingeniería de Control Moderna

Tabla 20 Constantes de sintonización

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
PI	10.894	16.0256	0

Fuente: Autora del proyecto

7.3. PRUEBAS

A continuación se presenta la metodología empleada en el desarrollo de las pruebas para la verificación del sistema implementado.

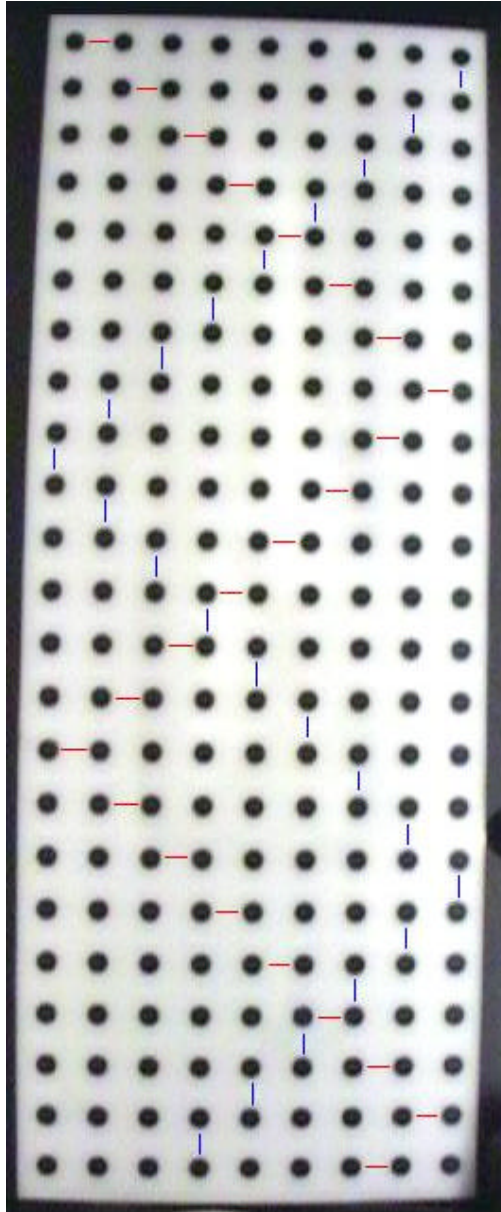
7.3.1. Sistema de medición de desplazamiento

Se quiso determinar la exactitud del Sistema de adquisición y tratamiento de imágenes para la medición de desplazamiento, comparándolo con un calibrador digital Mitutoyo con resolución de 0.01mm.

Las variables que pueden influir en el funcionamiento del sistema, entre otros, son: la iluminación, las marcas utilizadas, la posición de la cámara, los ajustes del lente, el tubo dilatométrico en consideración, la ubicación del pistón y la referencia suministrada al software de la separación entre puntos del patrón de calibración.

De los anteriores factores se dejaron fijos la iluminación, las marcas utilizadas, la posición de la cámara y los ajustes del lente, ya que, el análisis su variación fue objeto de la etapa de ajustes del sistema, y en ésta, se encontró un punto de equilibrio entre ellos para obtener una adecuada segmentación de las marcas. Otro factor fijo es la referencia suministrada al software de la separación entre puntos del patrón de calibración, la cual se determinó sacando el promedio de tres mediciones de la separación horizontal y vertical de los puntos del patrón de calibración recorriendo diagonales de extremo a extremo hasta completar todas sus filas y columnas como se muestra a continuación.

Figura 39 Recorrido para la medición de la distancia horizontal y vertical del patrón de calibración



Fuente: Autora del proyecto

El valor promedio obtenido se presenta a continuación:

Tabla 21 Promedio separación entre puntos del patrón de calibración

PROMEDIO DISTANCIA HORIZONTAL	9.74 mm
PROMEDIO DISTANCIA VERTICAL	9.76 mm

Fuente: Autora del proyecto

Esta medición se realizó con el calibrador digital Mitutoyo*.

En consecuencia los factores que se consideran para el experimento son: el tubo dilatométrico en consideración (A) y la ubicación del pistón (B).

El número de tubos dilatométricos son seis (6), ya que como se menciona en la sección 2.2 faltaba uno de los pistones. Para la ubicación del pistón se emplearon 32 barras de tamaño conocido, nombrados del 1 al 32, y 6 adicionales para la posición inicial de cada uno de los pistones, nombrados como PI 1, PI 2, PI 4, PI 5, PI 6, PI 7. En la Tabla 22 se presenta la longitud de cada una de ellas.

* En el ANEXO F se presentan los datos completos.

Tabla 22 Longitud de las barras patrones empleadas en el experimento

BARRA	MEDIDA 1	MEDIDA 2	MEDIDA 3	PROMEDIO
PI 1	59.15	59.29	59.53	59.32
PI 2	59.13	59.15	59.09	59.12
PI 4	59.91	59.72	59.94	59.86
PI 5	58.88	58.61	59.01	58.83
PI 6	59.15	59.02	58.87	59.01
PI 7	59.18	59.43	59.46	59.36
1	200.65	200.22	200.17	200.35
2	179.04	178.70	178.87	178.87
3	174.05	173.81	173.93	173.93
4	171.97	172.10	172.28	172.12
5	155.66	155.60	155.72	155.66
6	152.01	151.89	152.34	152.08
7	149.83	149.89	149.83	149.85
8	145.34	145.39	145.44	145.39
9	130.53	130.59	130.61	130.58
10	129.08	129.11	129.11	129.10
11	126.46	126.54	126.52	126.51
12	121.15	120.85	121.16	121.05
13	115.91	116.32	116.31	116.18
14	105.58	105.74	105.61	105.64
15	105.81	105.72	105.69	105.74
16	93.67	93.72	93.39	93.59
17	90.07	89.91	89.89	89.96
18	85.73	86.06	85.75	85.85
19	80.49	80.39	80.16	80.35
20	76.40	76.31	76.29	76.33
21	72.18	71.96	72.07	72.07
22	71.14	71.24	71.21	71.20
23	61.55	61.66	61.72	61.64
24	61.35	61.19	61.37	61.30
25	56.68	56.72	56.70	56.70
26	52.70	53.09	53.21	53.00
27	52.02	52.15	52.14	52.10
28	45.26	45.26	45.12	45.21
29	41.24	41.10	41.06	41.13
30	37.40	37.28	37.39	37.36
31	34.29	34.45	34.68	34.47
32	31.40	31.95	31.48	31.61

Fuente: Autora del proyecto

Estas barras patrón se midieron con el calibrador digital tres veces para disminuir el riesgo de una mala medición y el valor empleado para el análisis es el promedio de dichas mediciones.

Como la medición en todos los tubos dilatométricos se puede realizar al tiempo, el número de condiciones experimentales es 32. El número de replicaciones del experimento es 3, es decir, se tomaron 96 mediciones de la variable, y se consideran suficientes para medir la exactitud del sistema. El orden de experimentación no fue necesario tenerlo en cuenta pues no afecta el resultado, por lo tanto se tomaron mediciones de las barras en orden ascendente de la siguiente manera.

Tabla 23 Orden de experimentación

T.D. 1	T.D. 2	T.D. 4	T.D. 5	T.D. 6	T.D. 7
Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6
Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6	Barra 7
Barra 3	Barra 4	Barra 5	Barra 6	Barra 7	Barra 8
Barra 4	Barra 5	Barra 6	Barra 7	Barra 8	Barra 9
Barra 5	Barra 6	Barra 7	Barra 8	Barra 9	Barra 10
Barra 6	Barra 7	Barra 8	Barra 9	Barra 10	Barra 11
Barra 7	Barra 8	Barra 9	Barra 10	Barra 11	Barra 12
Barra 8	Barra 9	Barra 10	Barra 11	Barra 12	Barra 13
Barra 9	Barra 10	Barra 11	Barra 12	Barra 13	Barra 14
Barra 10	Barra 11	Barra 12	Barra 13	Barra 14	Barra 15
Barra 11	Barra 12	Barra 13	Barra 14	Barra 15	Barra 16
Barra 12	Barra 13	Barra 14	Barra 15	Barra 16	Barra 17
Barra 13	Barra 14	Barra 15	Barra 16	Barra 17	Barra 18
Barra 14	Barra 15	Barra 16	Barra 17	Barra 18	Barra 19
Barra 15	Barra 16	Barra 17	Barra 18	Barra 19	Barra 20
Barra 16	Barra 17	Barra 18	Barra 19	Barra 20	Barra 21
Barra 17	Barra 18	Barra 19	Barra 20	Barra 21	Barra 22
Barra 18	Barra 19	Barra 20	Barra 21	Barra 22	Barra 23
Barra 19	Barra 20	Barra 21	Barra 22	Barra 23	Barra 24
Barra 20	Barra 21	Barra 22	Barra 23	Barra 24	Barra 25
Barra 21	Barra 22	Barra 23	Barra 24	Barra 25	Barra 26
Barra 22	Barra 23	Barra 24	Barra 25	Barra 26	Barra 27
Barra 23	Barra 24	Barra 25	Barra 26	Barra 27	Barra 28

T.D. 1	T.D. 2	T.D. 4	T.D. 5	T.D. 6	T.D. 7
Barra 24	Barra 25	Barra 26	Barra 27	Barra 28	Barra 29
Barra 25	Barra 26	Barra 27	Barra 28	Barra 29	Barra 30
Barra 26	Barra 27	Barra 28	Barra 29	Barra 30	Barra 31
Barra 27	Barra 28	Barra 29	Barra 30	Barra 31	Barra 32
Barra 28	Barra 29	Barra 30	Barra 31	Barra 32	Barra 1
Barra 29	Barra 30	Barra 31	Barra 32	Barra 1	Barra 2
Barra 30	Barra 31	Barra 32	Barra 1	Barra 2	Barra 3
Barra 31	Barra 32	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4
Barra 32	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Barra 5

Fuente: Autora del proyecto

El error promedio por tubo dilatométrico se presenta a continuación.

Tabla 24 Error promedio por tubo dilatométrico

T.D. 1	6.67%
T.D. 2	4.47%
T.D. 4	4.05%
T.D. 5	4.26%
T.D. 6	5.53%
T.D. 7	8.33%

Fuente: Autora del proyecto

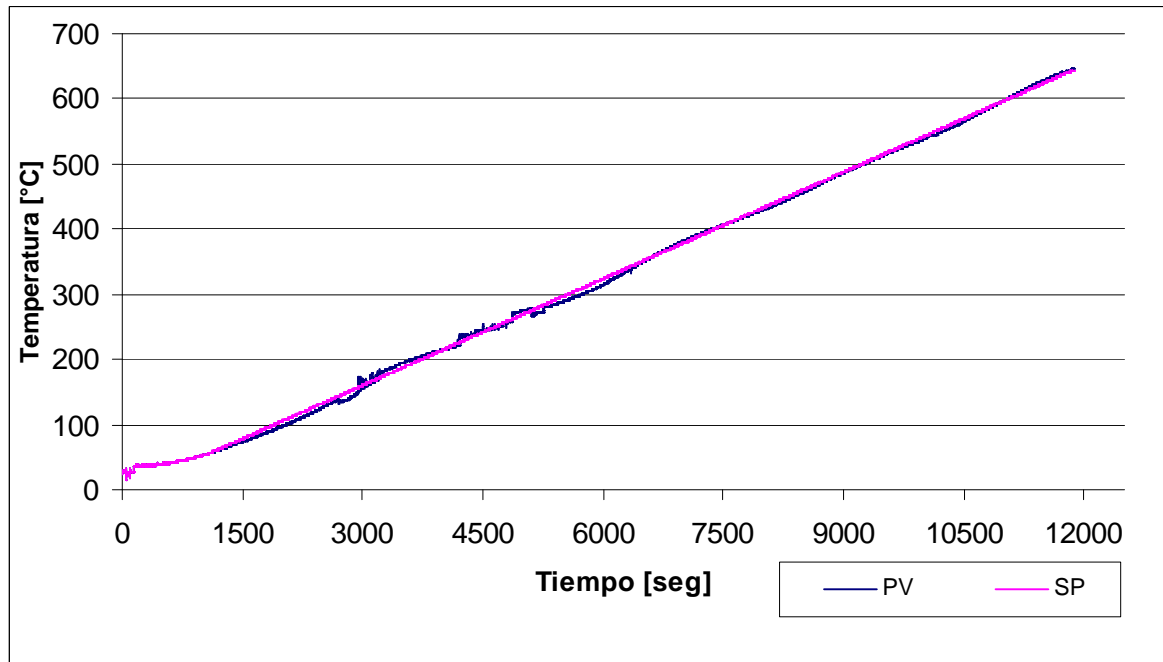
Este error es aceptable, ya que como se menciona en el ANEXO B para la expresión de los resultados se redondeaba mínimo al 5% y las diferencias permitidas entre tubos es mínimo de 6% y entre pruebas del 10.5%.

7.3.2. Sistema de control de temperatura

Con las constantes calculadas a partir del método de Ziegler-Nichols, y limitando la salida del controlador y el **setpoint** durante un intervalo de temperatura suficiente para haber superado el tiempo muerto, estimado a partir de las

caracterizaciones, se obtuvo un buen comportamiento, el cual se evidencia en una de las curvas típicas la cual se muestra a continuación*.

Figura 40 Comportamiento del sistema de control de temperatura



Fuente: Autora del proyecto

El gradiente promedio de la curva en el intervalo en el cual el **setpoint** varía en $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ es de $3.088^{\circ}\text{C}/\text{min}$, es decir, se presenta una variación promedio del 2.95%.

* Curvas de control de temperatura adicionales se presentan en el ANEXO F.

8. OBSERVACIONES

La primera etapa del proyecto consistió en una consulta bibliográfica con el fin de obtener información sobre la dilatometría en carbones y los equipos que se usan para las caracterizaciones plásticas de los mismos. Esta etapa permitió obtener criterios, herramientas y los requisitos de diseño del equipo. La documentación continuó con la búsqueda del sensor de desplazamiento, el cual, después de analizar los requisitos y costos, se cambió por el sistema de adquisición de imágenes. Una vez elegido el dispositivo de medición se profundizó en los conceptos de los elementos del sistema y se estudió el software IMAQ Vision de LabVIEW y las ventajas que ofrece con respecto a Matlab. 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, el **frame grabber**, la cámara y la iluminación. Con ayuda del grupo de investigación CPS, Conectividad y Procesado de Señal, se obtuvo en préstamo el lente y el **frame grabber**, y la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, facilitó una cámara, con los cuales se determinó el ambiente controlado de iluminación necesario para implementar el sistema. Luego se procedió a la elección y compra del lente y el **frame grabber** teniendo en cuenta el comportamiento del sistema con los elementos preliminares.

Superada esta etapa se realizó la caracterización preliminar del sistema y se procedió a seleccionar la instrumentación de temperatura, el acondicionamiento de la misma, los elementos de la tarjeta de adquisición de datos y el diseño de controlador bidireccional monofásico de onda completa.

Una vez seleccionados, se implementaron las tarjetas de adquisición de datos y de potencia y se realizaron pruebas de las mismas. Además se realizó el software de adquisición y control de temperatura en LabVIEW con la librería **PID Control Toolset**, y se simularon los elementos del sistema de control.

Finalmente, se integraron todas las etapas, y se realizaron pruebas para la sintonización del lazo de control hasta obtener un comportamiento satisfactorio, y ajustes del sistema de adquisición de imágenes hasta obtener una adecuada segmentación de las marcas para la medición de desplazamiento para cada uno de los pistones.

Del trabajo realizado se destaca:

1. Se diseño y construyó un prototipo que permitirá realizar pruebas de dilatometría de carbones, que consta de tres partes que son:
 - 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, con una resolución de 0.8mm y un error promedio del 5%.
 - Una tarjeta de adquisición de datos implementada con un microcontrolador motorola, un conversor A/D y un potenciómetro digital, que comunican al sensor y al actuador con el computador por medio del puerto serie, para realizar la visualización y el control de la temperatura del proceso por medio de LabVIEW. Esta tarjeta permite adquirir señales de temperatura entre [0°C-970°C] y tiene la posibilidad de emplearla para leer datos de 3 canales adicionales, de manera que en una etapa posterior se pueda adicionar la prueba de uniformidad en la temperatura a lo largo de los tubos dilatométricos.

- Un controlador bidireccional monofásico de onda completa, el cual a partir de una señal analógica, “recorta” la onda de tensión proveniente de la red de manera que se aplique un voltaje eficaz al horno, conveniente, para obtener el gradiente de temperatura deseado.

9. 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 desarrollo una aplicación que posee una interfaz de usuario “amigable”, en la cual se pueden visualizar los datos de dilatación y temperatura “en línea”.
2. El sistema de adquisición y control de temperatura implementado permite obtener un gradiente de calentamiento promedio que se encuentra dentro de 3 ± 0.2 °C/min que corresponde a la tolerancia permitida en la norma de dilatometría original.
3. Se desarrolló un prototipo de sistema de medición de desplazamiento por medio de adquisición y tratamiento de imágenes, que permite realizar mediciones en un rango de [0-220mm], con una resolución de 0.8mm y un error promedio del 5%.
4. La iluminación es un parámetro determinante 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.
5. El Dilatómetro de Carbón Audibert-Arnu es un equipo de difícil consecución y alto costo. Aunque solo se consiguió el costo de un equipo y sus características no estaban disponibles, vale la pena mencionar que su costo era de e 48.100 y el costo del sistema implementado es de aproximadamente de tres millones de pesos (\$ 3.000.000).

6. Con la realización de este proyecto se deja abierto un espacio para la realización de nuevos proyectos de investigación en el área de la medición de variables y fenómenos metalúrgicos por medio de imágenes, para obtener herramientas de análisis ajustadas a las necesidades de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales y la reducción de costos en la adquisición y mantenimiento de los equipos.

7. El proyecto culminó satisfactoriamente ya que cumplió con los objetivos del proyecto y los requisitos de la prueba de dilatometría para carbones.

10. RECOMENDACIONES

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

- Adicionar tres termocuplas 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 sensibilidad en el sistema de medición de desplazamiento.
- Realizar un equipo sin tanta flexibilidad, a partir del comportamiento del actual, para disminuir el riesgo de desconfiguración y descalibración del sistema.
- Cambiar el sistema de iluminación por lámparas de encendido electrónico para disminuir cambios en la iluminación por el inadecuado comportamiento de los starters.
- Hacer una búsqueda exhaustiva de pinturas mate que permitan mejorar la segmentación de las marcas.
- 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.

- Para hacer el equipo autónomo, el procesamiento y la visualización de la señal de temperatura y el tratamiento de imágenes se podría implementar directamente en el equipo, por medio un DSP y una pantalla de cristal líquido gráfica.
- Es importante mas adelante hacer una calibración del equipo comparándolo con otro equipo de su tipo certificado en el país que permita determinar adecuadamente su exactitud y fidelidad.
- Con este proyecto se observa la importancia del modelamiento y control de sistemas de orden superior, por lo que se recomienda a la escuela fortalecer dichas líneas de investigación.
- Fortalecer el área de control de procesos por medio de tratamiento digital de imágenes aprovechando los desarrollos de los grupos de investigación CEMOS y CPS.

BIBLIOGRAFÍA

1. ADAMEL LHOMARGY, DIVISION d'INSTRUMENTS S.A., MONTAGE ET UTILISATION DU DILATOMETRE A CHARBON TYPE D C 7.
2. BERKOWITZ Norbert, AN INTRODUCTION TO COAL TECHNOLOGY, Academic Press, New York, Primera Edición, 1979.
Capitulo 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 D ESANTANDER) PARA PRODUCCIÓN DE COQUE METALÚRGICO.
5. COOPER Bernard R., SCIENTIFIC PROBLEMS OF COAL UTILIZATION, Technical Information Center U.S. DEPARTAMENT OF ENERGY, Morgantown, West Virginia, Primera Edición, 1977.
A Discussion of Some of the Methods of Physical Characterization Used for Coal. DAVIS Alan, Coal Research Section, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania.
6. CORZO RUEDA Mónica Patricia, COMPUTADOR DE FLUJO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SOPORTE DE HARDWARE Y SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN.
7. Edmund Industrial Optics.

8. GIRALDO GUTIÉRREZ Carlos Arturo, GUALDRÓN FLÓREZ Jesús, MÉNDEZ TEJADA Juan Sebastián, DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y DETECCIÓN DE FUGAS DE MICROONDAS PARA EL ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN TÉRMICA MICROONDAS-PAVIMIENTO
9. 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.
10. GUZMÁN G. Raúl, OYOLA L. Pablo, SALINAS Renato. Trabajo Presentado, XIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERIA ELECTRICA, CONTROLADOR DIFUSO REALIMENTADO POR VISIÓN ARTIFICIAL PARA SISTEMA DE LEVITACIÓN POR AIRE.
11. IMAQ Vision Concepts Manual. Nacional Instruments. Capítulo 3, System Setup and Calibration, Pág. 48-65.
12. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook CRCnetBase 1999.
Capitulo 6, Displacement Measurement, Linear and Angular
13. MORA CRUZ Sandro, PLATAFORMA PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES ORIENTADO AL CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS.
14. MAZZONE, Virginia. Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes. 2002. p.3.

15. 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.

16. OGATA Katsuhiko, INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA, Prentice Hall, México, 3a. Edición, 1998.
Capítulo 4, Análisis de la Respuesta Transitoria, Secciones 1,2, y 3, Pág. 134-160. Capítulo 5, Acciones básicas de control y respuesta de sistemas de control, Secciones 1,2, y 3, Pág. 211-228.

17. OMAÑA SILVA Maira Milena, MORENO VIANCHA Rocio del Pilar, ZAMBRANO REY Gabriel Mauricio, CONTROL POR COMPUTADOR DE UN REACTOR PROTOTIPO MULTIPROPÓSITO PARA LA MODIFICACIÓN DE ASFALTO.

18. ORTIZ SILVA Fabián Gilberto, ROJAS GONZÁLEZ Yoham Efrén, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA TRATAMIENTO TÉRMICO DE MUESTRAS DE PAVIMENTO CON MICROONDAS.

19. PALLAS ARENY Ramón. SENSORES Y ACONDICIONADORES DE SEÑAL. Alfaomega Marcombo, Barcelona España, Tercera Edición. 2001.

20. PITT G. J., MILLWARD G. R., COAL AND MODERN COAL PROCESSING: AN INTRODUCTION, Academic Press, New York, Primera Edición, 1979.
Capítulo 2, Structural Analysis of Coal, Sección VI, Behavior on Heating, Pág. 47-50. Capítulo 3, Carbonization and Coking, Sección III, Structure of Coal and the Mechanism of Carbonization, Pág. 56-60.

21. RODRÍGUEZ MAZUERA, Jose, ENSAYOS DE COQUIZACIÓN EN CARBONES DEL VALLE DEL CAUCA. Primer Seminario Internacional

sobre la utilización integral del carbón, Tomo I, 1974. Cooperativa Huilera de Occidente Ltda. Cali, Colombia, 1974.

22. 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.

23. WILFRIDO MORENO T, Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos, Ediciones UIS, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1993. Capítulo 1, Metodología del diseño de experimentos.

ANEXO A Comportamiento térmico del carbón

Propiedades plásticas.

En un intervalo de temperatura que coincide aproximadamente con la descomposición activa (350-500°C), dependiendo del tipo de carbón, ciertos carbones tienden a ser termoplásticos, es decir, pasan a través de un estado transitorio plástico en el cual se contraen, se dilatan y finalmente se resolidifican en una estructura porosa.

El desarrollo óptimo de estas propiedades ocurre dentro de un rango de cerca de 88 a 89% de carbón y cerca de 25 a 30% de materia volátil.

Así, dichos carbones son llamados carbones coquizables, mientras que los que no llegan a ser plásticos al calentarlos son llamados no coquizables. Dentro de carbones coquizables, el comportamiento en el rango plástico puede variar ampliamente.

En esta serie de transformaciones del carbón, se pueden distinguir dos importantes zonas de temperatura. La primera es en la cual el carbón es plástico y la segunda es a altas temperaturas en la cual el material resolidificado se contrae.

1. Rango de temperatura plástico

El carbón coquizable de primera calidad que tiene un contenido volátil en el rango 20-32% (d.m.m.f.), se hace plástico antes de que la descomposición activa ocurra. Es llamado de este modo, debido a que produce un carbón fuerte con buena resistencia a la abrasión. La viscosidad y rata de devolatilización de la masa plástica son tales como para minimizar el

ablandamiento intragranular pero permitir partículas de carbón vecinas para adhesión fuerte. El coque formado así tiene poros uniformes de pequeño diámetro cercados por un muro grueso dando una alta resistencia a la abrasión.

El carbón con contenido de materia volátil más allá de 20-32% sufre descomposición antes y durante la zona de temperatura plástica. En muchos casos, ocurre ablandamiento intragranular y la masa entera puede espumarse, dando un aumento en la porosidad y poros amurallados delgados y de diámetro grande dentro del coque. Este producto tiene una baja resistencia relativa a la abrasión. Esto es claramente visto en que la inherente fuerza y resistencia a la abrasión de coque son determinadas por el comportamiento del carbón en la zona plástica.

2. Rango de temperatura Post-plástico (contracción)

Como la temperatura es elevada después de que la masa plástica se resolidifica, el sólido se contrae pero a una tasa no uniforme y depende de la tasa de devolatilización y el proceso de reorientación en el sólido, variando de carbón a carbón. Si los coeficientes de contracción medidos en un dilatómetro de alta temperatura son dibujados de nuevo dos picos de temperatura son observados; el primero ocurre justo después de la resolidificación (~500°C) y el segundo en la región de 750°C.

La importancia de las medidas cuantitativas del comportamiento plástico del carbón tiene mucho tiempo siendo reconocida para los supuestos en la valoración de carbones para propósitos de coquización. Para este fin, una variedad de técnicas han sido inventadas; estas incluyen el Índice de Estiramiento Libre, el tipo de coque Gray-King, el Índice Roga, y una variedad de pruebas de dilatómetros, y plastómetros.

Índice de Hinchamiento Libre

Esta prueba (procedimiento ASTM D 720-67) cuantifica el comportamiento plástico del carbón cuando una muestra de 1 g es rápidamente calentada en un pequeño crisol a $820 \pm 2^\circ\text{C}$ en $2^{1/2}$ min. El perfil de cruce seccional de la perla de coque resultante es comparado con perfiles estándar. Aunque intenta proveer algún índice del grado de coquización y del comportamiento de dilatación del carbón bajo un rápido calentamiento en un proceso de combustión, la prueba es a menudo usada como un método muy rudo para valorar el potencial del carbón para hacer coque metalúrgico. La prueba es altamente empírica, y el tamaño y la clase del crisol, la rata de calentamiento, y otros detalles de la prueba han sido cuidadosamente especificados. Los resultados pueden ser invalidados por muchos detalles, un tamaño inconsistente de la muestra de carbón o también un alto gradiente de temperatura a lo largo del crisol.

Tipo de Coke Gray-King

Esta prueba difiere de la anterior en que la rata de calentamiento es baja ($5^\circ\text{C}/\text{min}$; desde 300 a 600°C) para aproximar más fielmente las condiciones en un horno de coque. La replica es un tubo de vidrio horizontal de cerca de 2 cm de diámetro, y la carga consiste en 20 g. De nuevo el perfil y coherencia de los lápices de coque son visualmente comparados contra una serie de estándares. Los Coques Gray-King los cuales no son dilatados son clasificados desde A a G.

Callcott et al. Tien estableció la siguiente relación tentativa entre el tipo de coque Gray-King y el comportamiento en hornos industriales:

Tipo de coque Gray-King	Calidad de coque Industrial
A-C	No coquizable
D-F	No coquizable a muy baja calidad
G-G ₃	Baja calidad a buenos coques
G ₄ -	Buenos a excelentes coques

Índice Roga

Es un método alternativo el cual valora la rata de fuerza mecánica de la distensión de una perla de coque. En ésta, ~ 1 gm de 0.2mm de carbón es mezclado con 5 gm de 0.4mm de antracita, compactada por 30 segundos bajo 6Kg, y calentada a 850°C en 15 min. El coque producido se extrae del crisol y se pasa por un tamiz de 1mm, a la parte mayor de 1mm se le hace una prueba de resistencia a la abrasión en un tambor especial por un tiempo de 5 minutos a 50 rpm. La prueba se hace dos veces mas sobre la fracción mayor de 1mm que se queda cada vez después del tamizaje. El índice Roga (R) es calculado así:

$$R = \frac{\frac{1}{2}(a+d)+b+c}{3} \frac{100}{w}$$

donde b, c, y d son los pesos de la perla residual después del primer, segundo y tercer periodo de rotación y pueden asumir algún valor entre 0 y 80.

Desarrollados y modificados para proveer guías prácticas para el comportamiento del carbón en operaciones industriales, el FSI, el tipo de coque Gray-King, y el índice Roga son usados como parámetros de clasificación alternativos. Además, los tres índices proporcionan convenientes medidas para correlacionar carbones

propensos a ser coquizables con indicadores de categoría de carbón. Sin embargo, ni el FSI o cualquier otra prueba de potencial coquizable ofrece mucha información sobre el complejo comportamiento tecnológico del carbón en su estado plástico, y así esta información debe ser buscada separadamente recurriendo a métodos plastométricos o dilatométricos estandarizados.

Plastómetros

El criterio esencial de un carbón coquizable es su habilidad para ablandarse, permanecer plástico a través de un rango de temperatura, y resolidificarse para formar un coque duro y compacto. Para evaluar este grupo de características, han sido desarrollados varios plastómetros.

Los plastómetros se usan para estudiar el comportamiento plástico del carbón, cuando se calienta con un gradiente térmico constante y bajo. La condición de que el gradiente sea constante es indispensable, pues las propiedades plásticas del carbón dependen notablemente de la modalidad de calentamiento. Estos muestran la resistencia al movimiento ofrecido por carbones pulverizados cuando son calentados a ratas de calentamiento estándar.

Los dos principales tipos de plastómetros son:

1. El plastómetro de torque constante, en el cual el torque aplicado se mantiene constante y la rata de movimiento de este mecanismo es función de la temperatura.
2. El plastómetro de torque variable, en el cual la unidad agitadora es rotada a velocidad constante y el torque opuesto es medido.

El plastómetro Gieseler es el plastómetro de torque constante más comúnmente usado para investigar las propiedades plásticas; algunos plastómetros de torque variable son el Brabender, el SapojniKov, y el Cerchar.

El uso primario de los datos plastométricos consiste en establecer la aptitud de un carbón a producir buen coque. Los datos del plastómetro son usados como ayuda en mezclas de carbón para hacer coque. Los datos plastométricos, desde el examen de la superposición de las zonas plásticas de los carbones individuales, permite juzgar la compatibilidad de los carbones en una mezcla. Idealmente el rango de temperatura de fluidez de componentes de mezclas debe traslaparse de manera que estas tengan grandes posibilidades de unirse. Carbones de alta fluidez pueden mezclarse con carbones de baja fluidez para dar mucho mejores coques que los conseguidos por estos componentes individualmente.

Estas son ya varias indicaciones de que el potencial para licuefacción de carbones puede ser relacionado con sus propiedades plásticas. La tendencia de ciertos carbones para ablandarse y dilatarse a elevadas temperaturas puede físicamente ayudar a su hidrogenación y solvatación o, bajo condiciones desfavorables, llevar a la producción irreversible de coque inerte.

Los cambios de volumen que acompañan el calentamiento del carbón coquizable a través de su rango plástico son medidos convenientemente con un dilatómetro, y así varios instrumentos son específicamente desarrollados para este propósito.

DILATÓMETRO

Como el plastómetro, el dilatómetro es con frecuencia usado como una medida para valorar el potencial del carbón para carbonización y la detección de extensión de oxidación.

Las medidas dilatométricas tienen por meta dar una apreciación de la aptitud a la coquización de un carbón o mezcla de carbones con respecto a la contracción y a la expansión.

Los dilatómetros permiten seguir las variaciones de la longitud de una muestra de carbón sometida a un determinado gradiente térmico. En dichos ensayos, el carbón se coloca en un cilindro calentado, cerrado por un pistón cuyos desplazamientos son seguidos por medio de un dispositivo de medición. Pero el hinchamiento no es libre ya que el carbón previamente se aglomera por compresión, o el pistón lo somete a una carga.

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.

Todos operan bajo el mismo principio básico, i.e., ellos registran el desplazamiento vertical de un pistón que reposa sobre una carga de carbón compactada, pero difieren en detalles tales como ancho y diámetro del pistón, y el grado de compactación de la carga.

Para mediciones en el dilatómetro Audibert-Arnu (Figura 1), al carbón se le da forma de "lápiz" de 6.5 mm de diámetro, 60 mm de longitud, y se inserta en un tubo metálico de 8 mm, y sobre el se pone un pistón de 7.8 mm de diámetro que pone un peso de 150 gm de carga sobre el carbón. Por otro lado, en el dilatómetro Sheffield, el carbón es cargado en un tubo de 5/8 in (~15.9 mm) y compactado dejando un peso de 130 gm sobre él, y el pistón, el cual tienen un diámetro menor substancialmente que el tubo, puede penetrar la masa de carbón cuando este alcanza suficientemente alta fluidez. Debido a estas variaciones, la

curvas del dilatómetro son solo directamente comparables cuando ellas son registradas con el mismo instrumento y bajo idénticas condiciones.

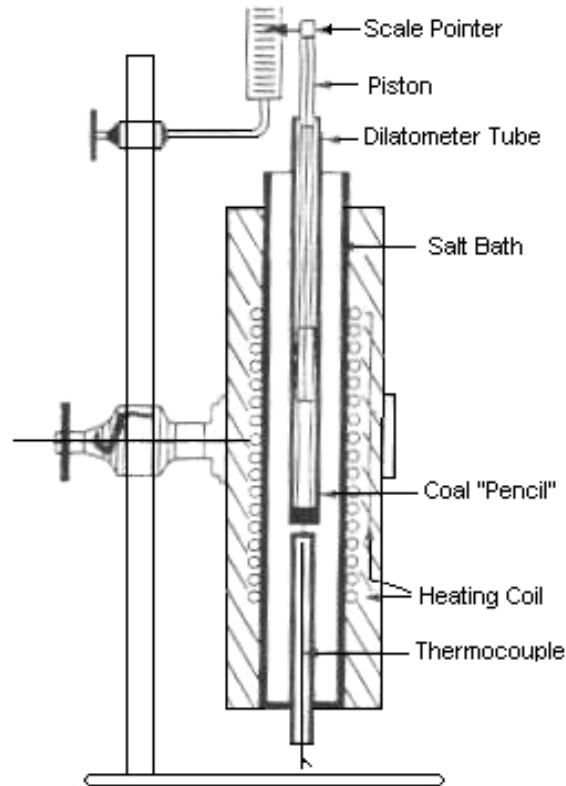


Figura 1. Esquema simplificado del Dilatómetro Audibert-Arnu

Dilatómetro Audibert-Arnu

En el dilatómetro Audibert-Arnu, un cilindro moldeado como un lápiz es calentado desde 300°C a 3°C/min; el movimiento de un pistón que reposa sobre el lápiz es registrado sobre una escala o cilindro de acuerdo con el movimiento de un puntero o pluma. Los porcentajes de contracción y expansión son leídos directamente o calculados.

De origen francés, ha sido normalizado en el plan internacional con la norma ISO 349 (1975), y los datos sacados con este dilatómetro sirven para la clasificación internacional de los carbones por tipo.

En principio, los cambios dimensionales en una carga de carbón pueden ser medidos como función del tiempo pero conduciendo las pruebas a una serie de temperaturas constantes. Sin embargo, en la mayoría de casos el interés se centra más en el comportamiento de carbón mientras su temperatura se aumenta a una rata constante.

El resultado de la prueba es la Curva Dilatométrica (curva "d" de la Figura 2), de donde se pueden deducir los siguientes parámetros:

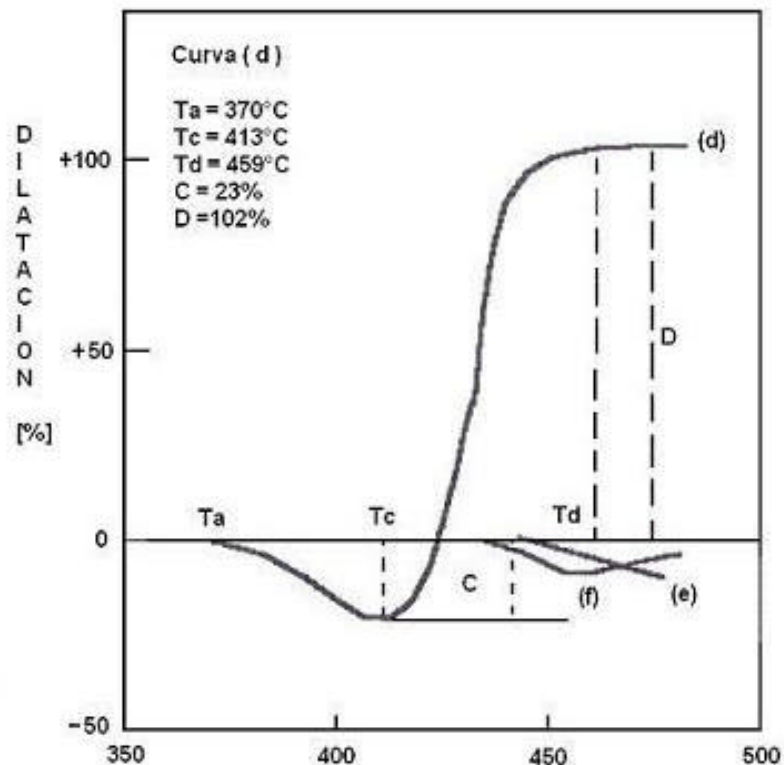


Figura 2. Típicas curvas Dilatométricas

- a. Temperatura Inicial de Ablandamiento: T_a °C, en correspondencia de la cual el pistón se ha movido de una división de papel diagramal.
- b. Temperatura de Máxima Contracción: T_c °C, en que el pistón alcanza el punto mínimo (máxima contracción).
- c. Temperatura de Máxima Dilatación: T_d °C, en que el pistón alcanza el punto máximo (máxima dilatación).
- d. Ablandamiento: "S", %
- e. Máxima Contracción: "C", %
- f. Máxima Dilatación: "D", %.

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_1 a T_2) 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. En esta etapa las partículas fundidas tienden a llenar los intersticios entre los granos de carbón, expulsando el aire allí atrapado, y a soldarse juntos.

Contemporáneamente 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. Esta 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 de la desgasificación. El intervalo de temperatura en que la velocidad de desgasificación y la plasticidad alcanzan los valores máximos prácticamente coincide con la temperatura de máxima dilatación.

Las curvas dilatométricas de carbones de diverso rango difieren notablemente para los valores de contracción y dilatación, y también para las temperaturas en que ocurre el ablandamiento.

Al aumentar el rango, la dilatación antes crece y luego disminuye rápidamente.

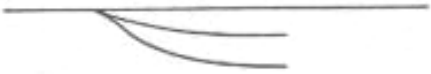
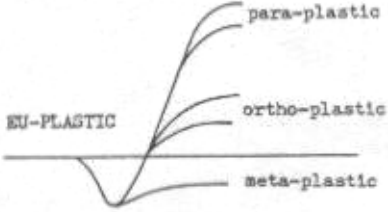
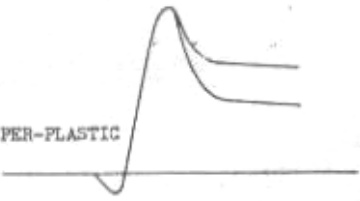
Un comportamiento análogo se encuentra para el intervalo térmico de ablandamiento: carbones de alto y bajo rango tienen un intervalo más estrecho, mientras que los carbones de medio rango (coquizables) presentan un intervalo más amplio. Por último se puede observar que algunos carbones presentan solo contracción (curva "e" de la Figura 2), mientras que otros presentan contracción y luego una dilatación negativa (curva "f" de la Figura 2).

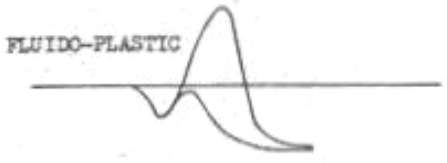
Ya que c , d , y s dependen de las dimensiones de la carga de carbón y del diámetro del tubo que lo contiene, estos valores numéricos son, por supuesto, solo relativos. Van Krevelen et al. por lo tanto sugiere que es preferible calcular una "verdadera" expansión (e), la cual es de particular significado en prácticas de horno de coque donde esto determina la presión que el carbón ejercerá sobre los muros del horno.

$$e = \left(\frac{V_o}{V_i} \right) (1 + d) - 1$$

En esta expresión, v_i es el volumen inicial de la carga de carbón y v_o el volumen bajo el pistón en algún tiempo particular o temperatura. Bajo la suposición de que e es una función aditiva, es posible entonces calcular curvas de dilatómetro para mezclas de carbones binarios o ternarios a partir de la curva de sus componentes individuales. Esto debe ser tomado con cuidado, ya que carbones con substancialmente similares propiedades coquizables (como lo reflejado en los FSI, índice Roga, o tipo de coque Gray-King) pueden mostrar muy diferentes comportamientos dilatométricos. La clasificación de Hoffman y Hoehne's de curvas de dilatómetros (Tabla 1) ejemplifica esta variedad. Para propósitos prácticos, es por lo tanto obligatorio, aun cuando las propiedades plásticas de un carbón coquizable han sido cuidadosamente medidas en el laboratorio, probar el carbón en hornos experimentales antes de usarlo para hacer coque.

Tabla 1. Clasificación del comportamiento dilatométrico

1. Subplástico: contracción solamente	<p>SUB-PLASTIC</p> 
2. Eu-plástico: contracción seguida por expansión; después de alcanzar la máxima dilatación, la curva se hace horizontal	<p>EU-PLASTIC</p> 
3. Per-plástico: contracción seguida por expansión; después alcanzar la máxima dilatación, la curva disminuye gradualmente antes de hacerse horizontal	<p>PER-PLASTIC</p> 

<p>4. Fluidoplástico: ; después de alcanzar la máxima dilatación, la curva disminuye rápidamente</p>	
--	--

La necesidad de semejante prueba adicional es resaltada por la extraordinaria sensibilidad de las propiedades plásticas a cambios en las condiciones ambientales y la susceptibilidad a modificaciones:

- a) Incrementando la rata de calentamiento se incrementa la fluidez Gieseler máxima y se extiende la expansión, y simultáneamente aumenta la temperatura en la cual la máxima fluidez y el comienzo de la expansión son observadas.
- b) El precalentamiento del carbón en una atmósfera protectora (inerte) a temperaturas tan bajas como 200°C por periodos extendidos de tiempo, progresivamente disminuye la fluidez, la expansión, y los índices de coquización relativos.
- c) Una disminución similar de todos los aspectos de plasticidad es observada cuando el carbón es cada vez más finamente pulverizado; y aun, un carbón coquizable fuertemente (con FSI >6-7) producirá apenas una perla de coque coherente si está molido suficientemente y es calentado muy lentamente.
- d) Las propiedades plásticas de carbones coquizables con alto contenido de ceniza (e.g., carbones con FSI 3-5 y >10% de ceniza) puede ser substancialmente incrementadas por reducción del contenido de materia mineral de los carbones.

- e) Oxidación rápida y progresivamente estrechado el rango plástico ($T_r - T_s$), reduce la fluidez máxima, y eventualmente destruye completamente algunas propensiones coquizables.

- f) La hidrogenación ligera, la cual no cambia significativamente la estructura molecular del carbón, causa efectos inversos, i.e., esto ensancha el rango plástico e incrementa la fluidez y la dilatación.

- g) Manifestaciones de plasticidad pueden ser suprimidas pirolizando el carbón en vacío o aumentando el calentamiento con alta presión.

Esta dependencia de la plasticidad de carbón a condiciones ambientales ha sido utilizada en operaciones industriales para determinar propiedades coquizables.

**ANEXO B Procedimiento estándar para el ensayo al dilatómetro Audibert-
Arnu de los carbones
Basado en la norma ISO 349-75**

I. Equipo

1. Dilatómetro y accesorios

1.1. Horno eléctrico vertical de forma cilíndrica, constituido por

1.1.1. Bloque de metal resistente a la oxidación y a la acción de la temperatura, provisto de una cavidad cilíndrica para alojar los siete tubos dilatométricos y el tubo para la termocupla de control.

1.1.2. Resistencias metálicas, debidamente aisladas, para el calentamiento del bloque.

Este sistema eléctrico tiene que asegurar una temperatura uniforme a lo largo de los tubos dilatométricos puestos en su cavidad; por eso el paso de corriente en las resistencias se puede controlar mediante DOS REOSTATOS.

Un procedimiento para verificar la constancia de la uniformidad de la temperatura a lo largo del tubo se encuentra en la sección II. 1.

1.1.3. Contrapesos calibrados para subir y bajar fácilmente el horno.

1.2. Aparatos de regulación y control de la temperatura

1.2.1. Sistema que impone y mantiene una rata de calentamiento constante de 3°C/min; la parte de este sistema, sobre la cual se opera, se reporta en la Figura 3.

- 1.2.2. Termocupla de control Pt/Pt-Rh 10%
 - 1.2.3. Potenciómetro que se conecta a la termocupla de control para leer la temperatura.
 - 1.3. Tubos dilatométricos y pistones (No. 7)
Un tubo dilatométrico adicional para alojar la termocupla de control.
 - 1.4. Tubo para introducir suavemente la muestra en los tubos dilatométricos.
 - 1.5. Plumillas para registrar los desplazamientos verticales de los pistones a que están unidos.
 - 1.6. Movimiento eléctrico de relojería (1 giro en 2 h) y cilindro registrador.
Sobre el cilindro se enrolla una hoja de papel de registro sobre el cual las plumillas trazan las curvas dilatométricas.
El papel de registro está graduado en “mm” en ordenada y “minutos” en abscisa.
2. Implementos para preparar las probetas de carbón (Figura 1):
 - 2.1. Molde (2), pulido internamente, provisto de base (4) y pieza de cierre en acero (3).
 - 2.2. Embudo (1).
 - 2.3. Barra de apisonamiento manual (7).
 - 2.4. Juego de pistones de acero duro para el apisonamiento (8A, 8B, 8C).
 - 2.5. Martillo de caída.
 - 2.6. Pistón de desmoldeo (9).
 - 2.7. Guía del pistón de desmoldeo (6) y receptor de la probeta de carbón (5).
 - 2.8. Prensa de desmoldeo (Figura. 2).
 - 2.9. Micrótopo para la puesta en longitud de la probeta (11).
 - 2.10. Calibrador de acero para el control de la conicidad del molde (10).
 - 2.11. Cuchilla de afeitar.

3. Implementos para limpieza
 - 3.1. Broca con mango de madera, para abrir tapones que se formen en los tubos.
 - 3.2. Escariador, para ensanchar los rotos abiertos, con la broca de mano.
 - 3.3. Churrusco de hilos de latón (8mm de diámetro) – para la limpieza fina de los tubos dilatométricos.

4. Tamiz de 0.146mm (No. 100 de la serie ASTM)

II. Controles

1. Uniformidad de la temperatura de los tubos dilatométricos.

Esta verificación no debe confundirse con la calibración del equipo; se puede efectuar en la siguiente manera:

- 1.1. Calentar rápidamente el horno (cerca 5°C/min) hasta aproximadamente 450°C.
- 1.2. Con la termocupla y el potenciómetro leer tres temperaturas en la mitad inferior del tubo calorimétrico: a 60, 120 y 180mm del fondo del tubo.
- 1.3. Si las temperaturas leídas difieren más de 5°C, regular los reóstatos para establecer las condiciones de uniformidad deseadas.

2. Tolerancias de los tubos dilatométricos

- 2.1. El diámetro interno de los tubos dilatométricos debe ser de $8 \pm 0.05\text{mm}$.
- 2.2. El juego entre el tubo y el pistón debe ser menor de 0.2mm.

Si por el desgaste no se cumplen más estos requisitos, desechar los tubos y los pistones viejos y substituirlos con otros nuevos.

3. Tolerancias del molde

Controlar periódicamente la conicidad del molde con el calibrador de acero (No. 10 de la Figura 1)

Si introduciendo el calibrador el molde:

- 3.1. Son visibles las dos líneas del calibrador, el molde es demasiado pequeño.
- 3.2. Se puede ver una sola línea, el molde es satisfactorio.
- 3.3. No se ve ninguna línea, el molde está desgastado y se debe reemplazar.

III. Calibración del equipo

La calibración del equipo, según la norma ISO 349, consiste en determinar la temperatura efectiva de los tubos dilatométricos, que puede diferir de la prevista considerando un gradiente exacto y constante de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$. De las desviaciones de dicho gradiente, se deducen las correcciones que se deben aportar a la curva dilatométrica registrada por el equipo cuando se va a elaborar los datos.

El método para efectuar el ensayo aquí adoptado, basado en la lectura de la temperatura actual de los tubos cada 10°C , no hace necesario este tipo de calibración. Sin embargo, si mediante la termocupla de control se encuentra que el gradiente térmico es muy diferente de $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$, es necesaria una revisión del equipo (después de un examen de las características efectivas de la alimentación).

IV. Preparación de la muestra

1. Extraer la MUESTRA DE CARBÓN PARA ANÁLISIS (preparada según la norma ASTM D 2013-72) 50g de carbón.
2. Moler hasta que el carbón pase a través del tamiz de 0.16mm (No. 100 de la serie ASTM).

NOTA: La operación se debe llevar a cabo minimizando el número de finos producidos; entonces, después de un cierto tiempo,

- 2.1. interrumpir la molienda,
- 2.2. pasar el producto sobre el tamiz de 0.16mm,
- 2.3. volver a moler la parte retenida sobre el tamiz.

NOTA IMPORTANTE

La muestra así preparada se debe ensayar lo más pronto pues un envejecimiento de ella determina un aumento de la “temperatura de ablandamiento” del carbón (debido a la oxidación de la muestra).

En la eventualidad de que la muestra preparada no se pueda ensayar inmediatamente, se aconseja guardarla en una nevera hasta el momento de la utilización.

V. Procedimiento

1. Preparación de la probeta de carbón

Para esta preparación se sigue el método aconsejado por el fabricante del equipo.

- 1.1. Pesar 2.5g del carbón preparado como en I sección IV.
- 1.2. Poner este carbón en un vaso de precipitado de 100ml, añadirle 10 gotas de agua y mezclar por cerca de 1 minuto.

- 1.3. Vaciar la mezcla sobre una hoja de papel no absorbente o una placa conveniente y dividirla en cuatro partes aproximadamente iguales.
- 1.4. Colocar el cilindro de acero (No. 3 de la Figura 1) al fondo del molde (2), atornillar el molde a su base (4) y poner sobre su parte superior el embudo (1).
- 1.5. Transferir una de las partes del polvo húmedo de carbón en el embudo y apisonarlo a mano utilizando la barrita para tal fin (7).
- 1.6. Introducir el pistón más largo (8A) a través del embudo y poner el molde así arreglado entre las columnas del martillo de caída.
- 1.7. Subir el peso del martillo hasta tocar la barra de parada, y luego dejar caer BRUSCAMENTE el peso sobre el pistón. Dar 10 golpes idénticos.
- 1.8. Retirar el molde, sacar el pistón "8A" y colocar en el embudo la segunda parte del polvo de carbón.
- 1.9. Apisonar el carbón a mano, introducir nuevamente el pistón "8A" a través del embudo y dar sobre el pistón 10 golpes con el peso del martillo de caída como en el punto 7.
- 1.10. Proceder de la misma manera (puntos 8 y 9) para la tercera parte de la muestra, pero utilizando el pistón "8B" para el apisonamiento.
- 1.11. Proceder de la misma manera para la cuarta parte de la muestra, utilizando el pistón "8C" para el apisonamiento.
- 1.12. Retirar del molde el pistón y el embudo y desatornillar su base (4).
- 1.13. Poner en la parte superior del molde el receptor de la probeta (5) y en la parte inferior la GUIA DEL PISTÓN DE DESMOLDEO (6).
- 1.14. Voltear el conjunto, introducir el PISTÓN DE DESMOLDEO (9) en su guía y transferir a la PRENSA DE DESMOLDEO disponiendo todo como en la Figura 2.
- 1.15. Mediante la prensa hacer avanzar el pistón de desmoldeo hasta que toque su guía.

- 1.16. Retirar el conjunto de la prensa, quitar el pistón de desmoldeo y su guía, dejando el receptor de la probeta en su lugar.
- 1.17. Poner el molde, unido al receptor, horizontalmente sobre una mesa y con la barrita de apisonamiento (7) empujar manualmente el cilindrito de acero (3) (obviamente por el lado del molde) hasta que la probeta de carbón salga del receptor.
- 1.18. Tomar la probeta con precaución y ponerla dentro del micrótopo introduciendo primero su extremidad más pequeña (“11” de Figura 1; “pc”=probeta de carbón).
- 1.19. Teniendo el micrótopo verticalmente, asegurarse que la base atornillada esté al término de su carrera y con una cuchilla para afeitar cortar la parte de la extremidad grande de la probeta, que sobresale del micrótopo.
- 1.20. Operando de esta manera se obtiene una probeta de exactamente 60mm de largo.

SI LA PROBETA PRESENTA CUALQUIER IMPERFECCIÓN, REPETIR TODA LA PREPARACIÓN.

2. Ejecución de un ensayo.

- 2.1. Bajar el horno hasta la base de su carrera. (*)
- 2.2. Introducir cuidadosamente las probetas de carbón (sus extremidades grandes primero) en los tubos dilatométricos puestos en posición horizontal; empujar suavemente las probetas hasta el fondo de los tubos dilatométricos mediante la barra cilíndrica (1.4 de la sección I).
- 2.3. Poner los tubos marcados con los números 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y el de la termocupla de control (c) sobre el soporte del dilatómetro, cada uno en su LUGAR ESPECIFICO (marcado sobre el equipo).

Para efectuar fácilmente esta operación:

- 2.3.1. Acercar oblicuamente el tubo a la chapa superior del soporte.
- 2.3.2. Introducir la extremidad superior del tubo en la chapa superior subiendo un poco.
- 2.3.3. Colocar la base del tubo sobre la chapa inferior del soporte.

IMPORTANTE

Para no alterar la capacidad térmica del sistema, todos los tubos (incluso los vacíos) sin muestra se deben colocar en el soporte.

- 2.4. Introducir en el tubo "C" la termocupla de control.
- 2.5. Introducir en los tubos 1, 2, 3, 4, 5, 6, y 7 los respectivos pistones, a que están fijadas las plumas con los números marcados, haciendo pasar las barritas de guía numeradas a través del soporte de las plumas.
- 2.6. Colocar en su lugar el movimiento eléctrico, teniendo cuidado de hacer penetrar todas las barritas de guía a través de la chapa que el movimiento eléctrico lleva en su parte inferior.

- 2.7. Fijar una hoja de registro sobre el cilindro registrador y colocar el cilindro sobre el movimiento eléctrico, asegurándose que los dientes del engranaje del movimiento eléctrico penetren bien dentro los del cilindro (girando el cilindro).
- 2.8. Actuar sobre los tornillos de regulación de las plumas (las correspondientes a tubos que contienen muestras) de manera tal que sus puntas casi toquen el papel de registro.
- 2.9. Girar en sentido anti-horario el cilindro registrador de manera tal que la pluma del pistón 1 se encuentre en correspondencia de la abscisa o (120) min.
- 2.10. Poner la tinta en las plumas (alternativamente la roja y la azul para distinguir más fácilmente las diferentes curvas).
- 2.11. Cerrar el horno con su tapa metálica. (*)
- 2.12. Girando el cilindro regulador del ciclo térmico c y (Figura 3) y actuando sobre el tornillo E, hacer coincidir el dedo "d" de la aguja del horno con el punto "a" marcando sobre el papel del cilindro Cy. (*)
- 2.13. Poner en marcha el movimiento de relojería del cilindro Cy actuando sobre la palanquita para tal fin. (*)
- 2.14. Poner en marcha los interruptores general (interrupteur general) y del horno (Four) ubicados sobre la base del dilatómetro. (*)

A medida que el horno se calienta, el dedo "d" de la aguja del horno (Fig. 3) sube, se apoya sobre el escantillón "M" y sigue su parte horizontal, hasta llegar al punto "b".

Para esto se necesita aproximadamente una hora, y entonces:

- (*) Las operaciones 11, 12, 13, y 14 se PUEDEN EFECTUAR DESPUÉS DE LA 1, en manera tal de aprovechar para los pasos de 2 a 10 del tiempo muerto de 1 hora necesario al calentamiento del horno.

2.15. Apenas el dedo "d" ha llegado al punto "b", efectuar en rápida sucesión las siguientes operaciones:

2.15.1. Actuando sobre los tornillos de las plumas, hacer apoyar sus puntas sobre el papel de registro.

2.15.2. Retirar la tapa metálica del horno y subir éste completamente.

2.15.3. Girar el cilindro Cy para hacer coincidir el dedo "d" con el punto "c".

2.15.4. Poner en marcha el cilindro registrador actuando sobre su interruptor en la base del dilatómetro (En registrement).

2.15.5. Tirar la bolita negra que pende detrás del equipo, para que el cilindro registrador suba y marque una rayita vertical al comienzo de cada curva.

Escribir en correspondencia de estas rayitas la temperatura a que se empieza el ensayo, leída en el potenciómetro conectado a la termocupla de control.

2.16. Vigilar la subida de la temperatura de las muestras, indicada por el potenciómetro conectado a la termocupla de control.

CADA 10°C tirar la bola negra para marcar una rayita vertical sobre las varias curvas; el conjunto de estas rayitas constituye la escala de temperatura que después se utilizará para construir la curva dilatométrica.

NOTA: Si el gradiente térmico es exacto y constantemente de 3°C/min, la subida de 30°C se obtiene después de cada 10 min, y por lo tanto algunas rayas verticales (1 si, 2 no, 1 si ...) coincidirán con las abscisas correspondientes a múltiplos de 10 min.

(10 min = 3 rayas verticales = 30°C).

2.17. Cuando se ha obtenido una temperatura suficiente, es decir, cuando todas las muestras han alcanzado la máxima dilatación

- 2.17.1. Desactivar los tres interruptores en la base del dilatómetro (ARRET).
 - 2.17.2. Alejar las plumas del papel actuando sobre los tornillos de regulación.
 - 2.17.3. Sacar el cilindro registrador.
 - 2.17.4. Retirar el movimiento eléctrico y colocarlo sobre su soporte en la columna izquierda del dilatómetro.
- 2.18. Desarmado de los pistones y de los tubos.
- 2.18.1. Bajar el horno hasta su base y cerrarlo con su tapa metálica.
 - 2.18.2. Colocar sobre la tapa la arandela ensanchada y subir el horno hasta que su tapa toque el soporte de los tubos dilatométricos. En estas condiciones la arandela se encuentra alrededor de los tubos, y entonces es posible retirar de ellos los pistones sin el riesgo de hacer caer lateralmente los tubos.
 - 2.18.3. Los pistones se deben retirar inmediatamente después del ensayo cuando los tubos están todavía calientes. Si se dejan enfriar los tubos, la extracción de los pistones se hace muy difícil.
 - 2.18.4. Retirar los tubos.

3. Limpieza de los tubos y de los pistones

Es esencial que los tubos y los pistones usados para el ensayo estén escrupulosamente limpios. Efectuar entonces concienzudamente las siguientes operaciones.

3.1. Tubos

- 3.1.1. Desatornillar el fondo del tubo.
- 3.1.2. Triturar y remover el semi-coque en el tubo lo máximo posible con la broca de mano.

- 3.1.3. Tapar el tubo, llenarlo con benceno y dejarlo así por varias horas.
- 3.1.4. Rapar completamente los sólidos que se quedaron sobre las paredes y el fondo del tubo con el escoriador.
- 3.1.5. Inmediatamente antes del ensayo limpiar finalmente el tubo con el cepillo de latón.
- 3.1.6. Antes de atornillar su base al tubo, untar las roscas con una mezcla de aceite y óxido de cromo, para evitar su atascamiento durante el calentamiento.

3.2. Pistones

- 3.2.1. Limpiar el pistón, incluso la base, con papel esmerilado muy fino, teniendo cuidado de no REDONDEAR los bordes de la base.
- 3.2.2. Asegurarse que el pistón penetre libremente en el tubo.

VI. Expresión de los resultados

Sobre la hoja de registro el equipo traza una curva del tipo reportado en la Figura. 4, que indica las variaciones de la curva de la probeta de carbón (en mm) versus la temperatura (rayitas verticales hechas cada 10°C) y el tiempo en minutos (división de 5 minutos).

Estos datos se elaboran usando el formato reportado en la Figura. 5, de la siguiente manera:

1. Leer sobre el diagrama las VARIACIONES DE LA ALTURA de la probeta de carbón para todas las temperaturas de la primera columna, y reportar estos valores sobre la segunda columna. Las variaciones negativas se reportan con signo negativo.
2. Calcular la dilatación porcentual dividiendo los valores de la segunda columna por 60mm (altura inicial de la probeta) y multiplicando por 100.

Los valores negativos se reportan con signo negativo (dilatación negativa = contracción).

3. Cerca de los puntos críticos (máxima contracción, máxima dilatación, pendientes fuerte ...) leer para algunas temperaturas intermedias las variaciones de altura de la probeta y calcular las relativas dilataciones.

Los valores de dilatación en función de la temperatura se reportan sobre la gráfica del formato de la Figura. 6 y trazar la CURVA DILATOMÉTRICA.

En el mismo formato especificar los siguientes parámetros:

1. TEMPERATURA DE ABLANDAMIENTO (T1), °C

Temperatura en correspondencia de la cual el pistón ha bajado 0.5mm.

Redondear a los 5°C más cercanos.

2. TEMPERATURA DE MÁXIMA CONTRACCIÓN (T2), °C

Temperatura Correspondiente al mínimo de la curva dilatométrica,

Redondear a los 5°C más cercanos.

3. TEMPERATURA DE MÁXIMA DILATACIÓN (T3), °C

Temperatura a la cual el pistón alcanza su punto más alto.

Redondear a los 5°C más cercanos.

4. MÁXIMA CONTRACCIÓN (a), %

Máxima contracción de la probeta, expresada como porcentaje de su largo inicial.

Redondear al número entero más cercano.

5. MÁXIMA DILATACIÓN (b), %

Máxima dilatación de la probeta, expresada como porcentaje de su largo inicial.

Redondear según la siguiente tabla:

Dilatación	Redondear a
Negativa	Número entero más cerca
Hasta 100%	5% más cerca
Sobre 100%	10% más cerca

6. RATA DE CALENTAMIENTO, °C/min

Comparando la escala de temperatura con la del tiempo en minutos, se calcula el gradiente térmico. Este gradiente tiene que ser de 3°C/min.

En las figuras 4, 5, y 6 se reporta un ejemplo completo de análisis.

VII. Confiabilidad de los resultados

Efectuar dos ensayos dobles, en carreras separadas, sobre la misma muestra y hacer el promedio.

1. Las diferencias permitidas entre los resultados de dos tubos en el mismo ensayo deben ser:

- Para las TEMPERATURAS: $\pm 5^{\circ}\text{C}$
- Para la DILATACIÓN:

Dilatación, %	Máx. diferencias permitidas
Hasta 50	6
50-150	10
150-220	16
220-300	20

2. Las diferencias permitidas entre los resultados de dos ensayos separados (en el mismo laboratorio: repetibilidad) deben ser

Dilatación, %	Máx. diferencias permitidas
Hasta 50	10.5
50-150	17.5
150-220	22
220-300	28

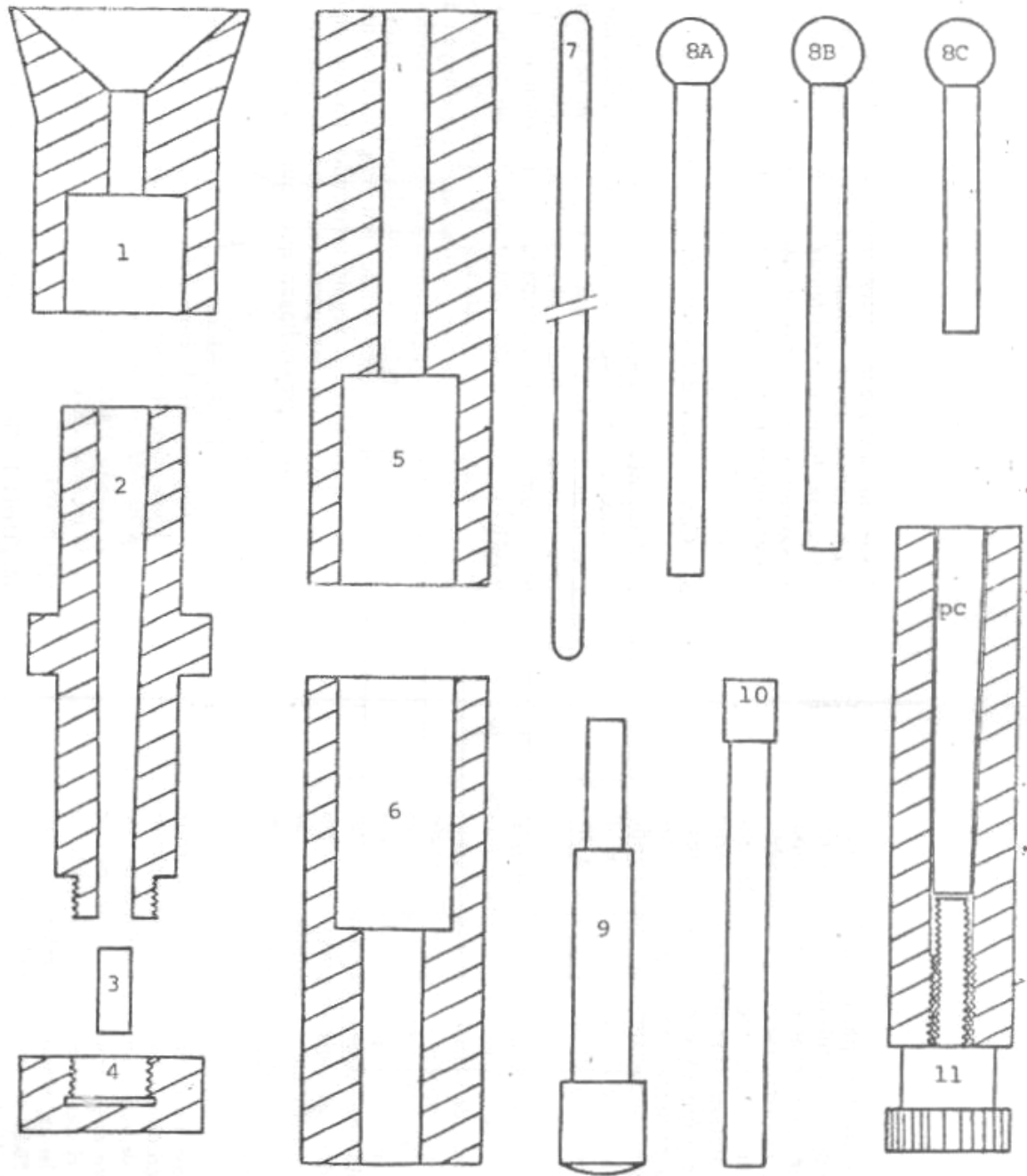


Figura 1. Implementos para preparar las probetas de carbón

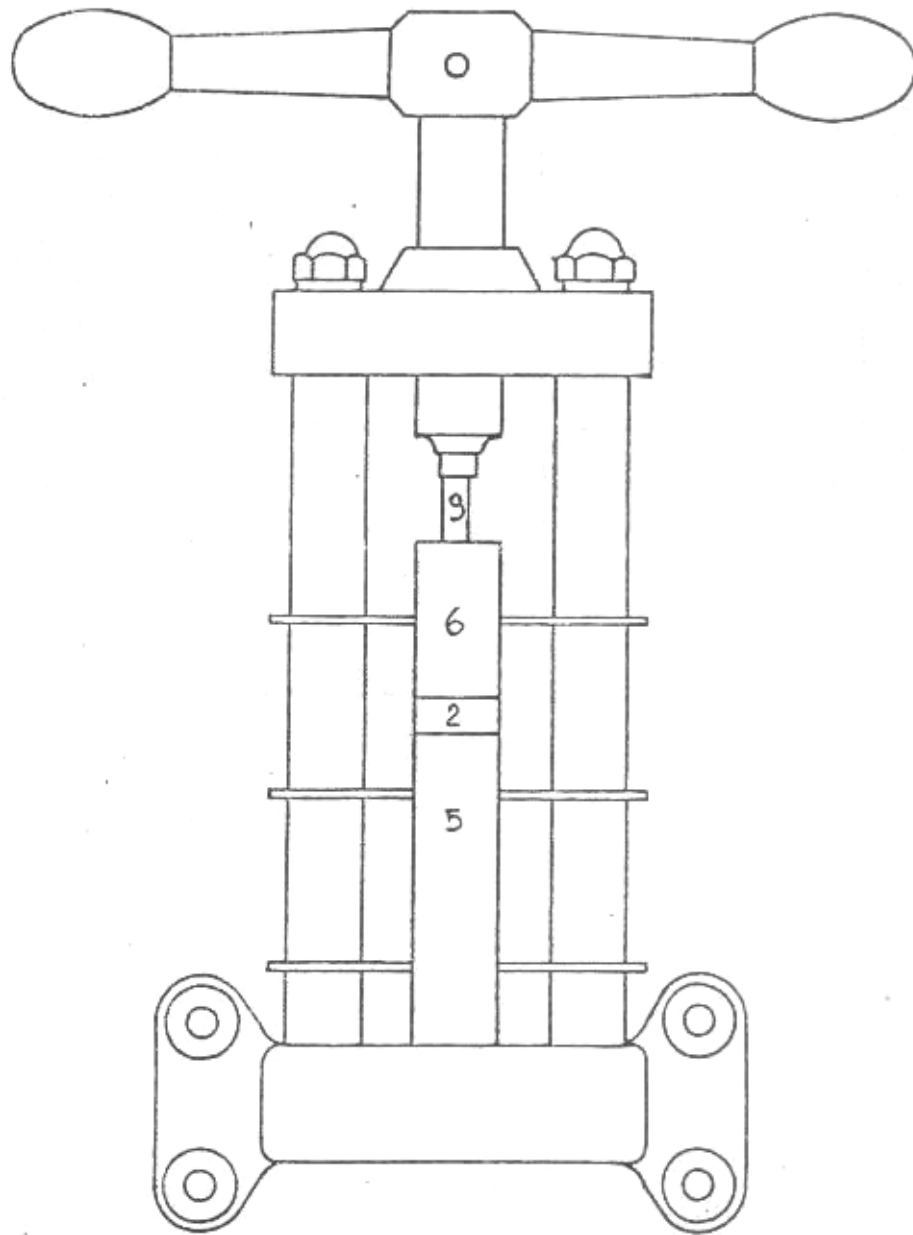


Figura 2. Prensa de Desmoldeo

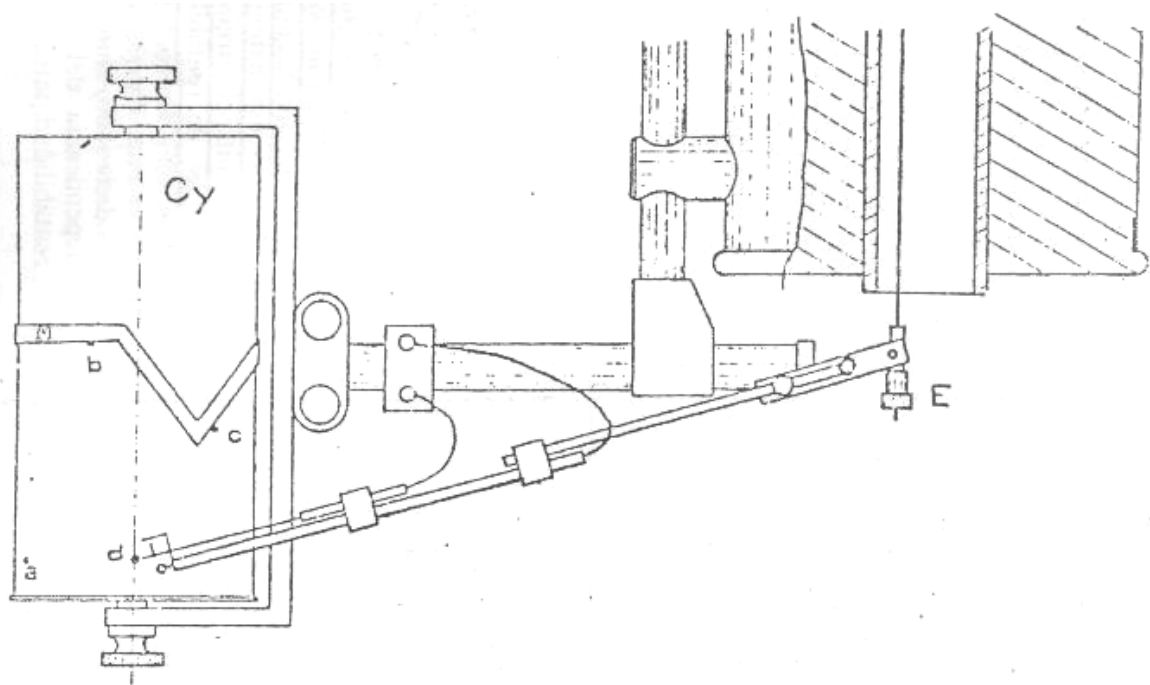


Figura 3. Sistema de Regulación del ciclo térmico del horno

ANEXO C Parámetros fundamentales de un sistema de imágenes

Antes de adquirir, analizar, y procesar imágenes, se debe configurar el sistema de imágenes. Cinco factores comprenden un sistema: Campo de vista, distancia de trabajo, resolución, profundidad de campo, y tamaño del sensor.

1. Campo de Vista (FOV)

El área del visible del objeto bajo inspección. En otros términos, ésta es la porción del objeto que llena el sensor de la cámara.

2. Distancia de Trabajo (WD)

La distancia desde el frente del lente al objeto bajo inspección.

3. Resolución

La resolución es una medida de la habilidad del sistema de imágenes para reproducir el detalle del objeto. Es el tamaño del rasgo mínimo del objeto que puede distinguir el sistema. Para que dos objetos sean distinguibles, una cierta cantidad de espacio entre los objetos se necesita.

Claramente, la resolución es importante describiendo el detalle del objeto. Un factor igualmente importante es cuan eficazmente las diferencias entre el objeto y las sombras de gris en el fondo son reproducidas en la imagen. El contraste del objeto es tan importante como la resolución del objeto. La resolución espacial se define como la resolución a un contraste fijo. El lente, el sensor y la iluminación toman papeles claves determinando el contraste de la imagen resultante.

La resolución de una cámara CCD puede especificarse en una variedad de maneras, incluso la cantidad de píxeles, líneas TV, y MTF.

Líneas-par por milímetro (lp/mm)

La resolución puede expresarse en términos del número de líneas par por milímetro (lp/mm), por lo cual la resolución es a menudo llamada frecuencia. Esta especificación puede usarse para lentes y cámaras.

Líneas TV

En CCDs analógicos, la especificación "línea TV" es usada para evaluar a menudo la resolución. La "Línea TV", o la especificación "TVL" es una unidad de resolución basada en un patrón de barras con líneas igualmente espaciadas. Si el patrón está extendido para que cubra el campo de vista, el número de líneas TV es calculado sumando todas las líneas y espacios resultantes. Hay también un factor de normalización usado calculando el valor de líneas TV horizontal basado en la proporción del aspecto 4:3 del chip. Desgraciadamente, esta especificación no tiene ninguna unidad física de medida (como mm o pulgadas) y puede ser por consiguiente bastante ambiguo.

Cantidad de píxeles (número de píxeles)

La resolución de cámaras digitales también puede especificarse en términos de la cantidad de píxeles. Una línea-par realmente corresponde a dos píxeles. Como la resolución de línea de TV, la resolución de cantidad de píxel puede ser engañosa si no se interpreta correctamente. La mayoría de CCDs no ofrecen filas y columnas perfectas de píxeles y a menudo contienen espacios muertos entre ellos. Incluso cámaras que no tienen ningún espacio muerto pueden producir centros imperfecta resolución de píxel de centro a centro. Los factores como el señal-a-ruido y jitter del píxel todos contribuyen a la resolución

espacial real de la cámara. Donde la resolución de pixel demuestra ser más beneficiosa es en el uso de dispositivos de captura de video. Al usar los dispositivos de captura de video, la única manera de acoplar las capacidades de la tarjeta de captura con las de la cámara es comparar la cantidad de pixeles.

Función de Transferencia de modulación (MTF)

Al caracterizar la resolución de un lente, es sumamente útil referirse a la Función de Transferencia de Modulación (MTF). La MTF de un lente es una medida de la habilidad del lente de transferir el contraste a un nivel de resolución particular del objeto a la imagen. En otras palabras, la MTF es una manera de incorporar datos de resolución y de contraste en una sola especificación. Un gráfico de MTF traza el porcentaje de contraste transferido versus la frecuencia (lp/mm) de las líneas.

Relación Señal a Ruido (SNR)

La relación señal-a-ruido (SNR) se une estrechamente al rango dinámico de la cámara. Superior SNRs produce un número más alto de pasos en la escala de grises (contraste más alto) mostrado por la cámara. La SNR se expresa en términos de decibelios (dB) en los sistemas analógicos y bits en los sistemas digitales. En general, 6dB de SNR analógicos son convertidos a 1-bit cuando se digitaliza. Para las cámaras digitales o analógicas, X bits (o el equivalente en los sistemas analógicos) corresponde a 2^X niveles de gris (es decir las cámaras de 8-bits tienen 2^8 o 256 niveles de gris).

4. Profundidad de Campo (DOF)

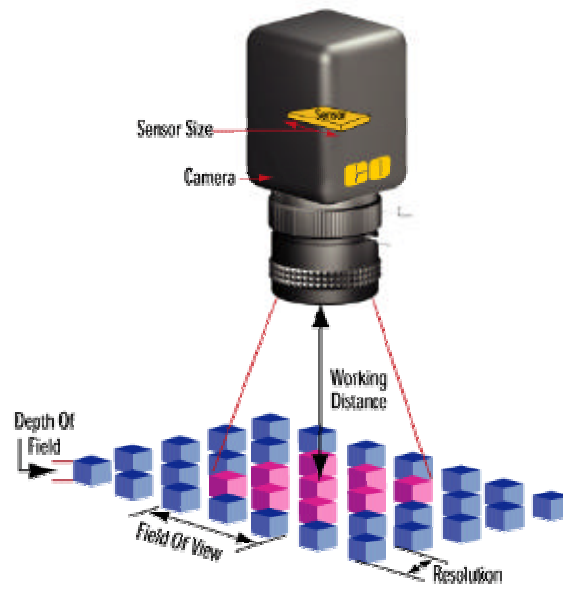
Es la profundidad del objeto máxima que puede mantenerse completamente en enfoque, en otras palabras, es la zona que quedará nítida por delante y por detrás del sujeto que hemos enfocado. DOF también es la cantidad de

movimiento del objeto (en y fuera del mejor enfoque) aceptable manteniendo una cantidad deseada de enfoque. Cuando el objeto se pone más cerca o más lejos que la distancia de trabajo, sale de enfoque y la resolución y el contraste sufren. Por esta razón, DOF tiene sólo sentido si se define con una resolución y contraste asociados. DOF también aplica a los objetos con profundidad, ya que lentes de alta DOF pueden captar la imagen del objeto completo claramente. Hay algunos lentes que incorporan un iris en sus diseños. Si el lente no es de difracción limitada, se puede mejorar el comportamiento global y la profundidad de campo del lente del sistema de imágenes cerrando el iris.

5. Tamaño del sensor CCD

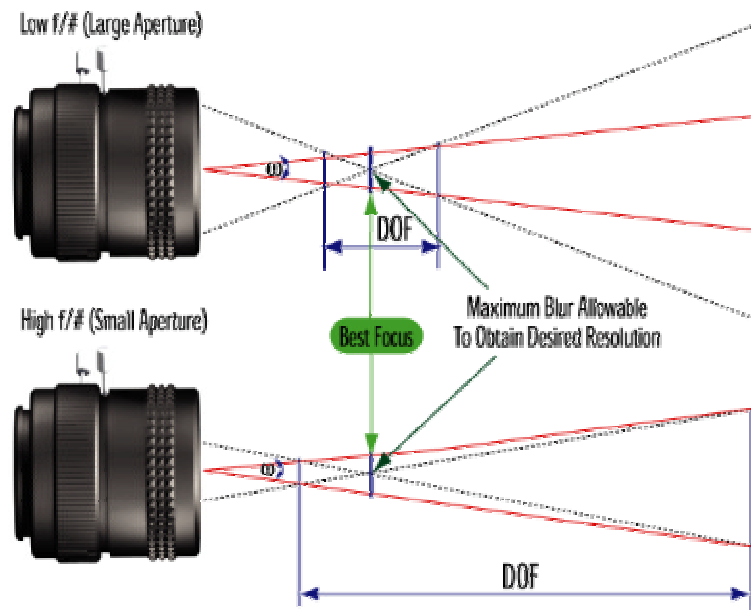
Es el tamaño del área activa de un sensor de la cámara. Este parámetro es importante determinando la amplificación del lente requerido para obtener un campo de vista deseado. Hay varios tamaños de sensor CCD estándar: 1/4", 1/3", 1/2", 2/3" y 1". Todos estos estándares mantienen una proporción de dimensión 4:3 (Horizontal:Vertical). Otro problema es la habilidad del lente de soportar ciertos tamaños de chip CCD. Si el chip es demasiado grande para el diseño del lente, la imagen es degradada hacia los bordes. Esto normalmente es llamado efecto túnel. Los tamaños del chip más pequeños no producen tales problemas.

Se ilustran algunas imágenes para entender más claramente estos conceptos.



Parámetros fundamentales de un sistema de Imágenes

Fuente: Edmund Industrial Optics



Representación geométrica de DOF para alto y bajo f/#

Fuente: Edmund Industrial Optics

Otros parámetros característicos del sistema son:

Amplificación primaria

La amplificación primaria (PMAG) es exclusivamente la amplificación del lente. Es la relación entre el tamaño del sensor de la cámara CCD y el campo de vista. En otras palabras, es el trabajo hecho por el lente.

Amplificación del sistema

La amplificación total del objeto a la imagen en el monitor, éste es el trabajo hecho por el sistema completo. Es el producto del PMAG y la amplificación de la cámara-al-monitor (la relación entre el tamaño del monitor y el tamaño del sensor).

Típicamente se usa los valores horizontales para la proporción sensor-a-campo de vista y valores de la diagonal para la proporción del monitor-a-sensor.

F-número (f / #)

Una medida de la habilidad de recolección de luz de un lente. $f/\#$ aumenta como la abertura del lente es cerrada. Cerrando la abertura también puede aumentar la profundidad de campo del sistema pero debe aumentarse la iluminación para compensar esto.

Además de los descritos arriba otros factores que contribuyen a la calidad de la imagen en conjunto son la perspectiva y la distorsión.

Errores de perspectiva

El error de perspectiva, también llamado de paralaje, es parte de experiencia humana cotidiana. De hecho, el paralaje es lo que permite el cerebro interpretar en 3-D el mundo. Nosotros percibimos los objetos más cercanos relativamente más grandes que aquéllos posicionados más lejos. Este fenómeno también está presente en sistemas convencionales de imágenes en los cuales la amplificación del objeto cambia con su distancia del lente. El paralaje es muy molesto en aplicaciones de medida que involucren objetos con profundidad u objetos con movimiento relativo al lente.

El error de perspectiva con frecuencia ocurre cuando el eje de la cámara no es perpendicular al objeto que esta examinando. El error de perspectiva aparece como cambio en la magnitud del objeto dependiendo de la distancia del objeto al lente.

Para reducir el error de perspectiva se debe posicionar la cámara perpendicular al objeto que esta intentando inspeccionar. Si la aplicación requiere tomar mediciones precisas desde la imagen, se debe corregir el error de perspectiva aplicando técnicas de calibración a la imagen.

Distorsión

La distorsión es un error óptico (aberración) causada por el lente y que resulta en diferencias de amplificación entre diferentes puntos en la imagen. La diferencia entre la posición actual (imagen distorsionada) y la predicha (objeto no distorsionado) puede expresarse en términos de un porcentaje del centro del campo.

Aunque la distorsión existe en todas las lentes, puede corregirse a menudo bastante bien. La distorsión es una aberración geométrica. Esto significa que información sobre el objeto realmente no se pierde, pero es extraviada en la imagen. Esto puede proveer molestias en algunas aplicaciones de medición. Sin embargo, una vez la distorsión ha sido medida con precisión usando un patrón de distorsión, puede factorizarse en el cálculo de medidas. Además, la distorsión puede quitarse de la imagen usando software.

Los parámetros fundamentales pueden relacionarse con las especificaciones de los componentes con algunas ecuaciones.

Resolución de la cámara

$$Res.Cámara(\mathbf{mm}) = \frac{1000}{Res.Cámara(lp/mm)}$$

Analógica

$$Res.Horiz.Cámara(lp/mm) = \frac{LíneaTVHoriz.x1.333}{2xTamañoSensor(Horiz.)}$$

$$Res.Vertical.Cámara(lp/mm) = \frac{LíneaTVVertical}{2xTamañoSensor(Vert.)}$$

Digital

$$Res.Cámara(lp/mm) = \frac{\# \text{ pixeles}}{2xTamañoSensor}$$

$$Res.Cámara(\mathbf{mm}) = 2xTamañoPixel(\mathbf{mm})$$

Amplificación

$$PMAG = \frac{\text{TamañoSensor}(\text{Horiz.})}{\text{CampodeVista}(\text{Horiz.})}$$

$$\text{Ampl.Sistema} = PMAG \times \frac{\text{TamañoMonitor}(\text{diag.})}{\text{TamañoSensor}(\text{diag.})}$$

Resolución del Sistema

$$\text{Re s.Sistema}(\mathbf{mm}) = \frac{\text{Re s.Camara}(\mathbf{mm})}{PMAG}$$

$$\text{Re s.Sistema}(\text{lp/mm}) = PMAG \times \text{Camara}(\text{lp/mm})$$

Contraste

$$\% \text{Contraste} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100$$

Porcentaje de distorsión

$$\% = \frac{AD - PD}{PD} \times 100$$

AD = Distancia de la imagen

PD = Distancia del objeto

Así mismo, estos parámetros pueden afectarse por los componentes del sistema como se observa en la siguiente tabla.

Parámetros de calidad de la imagen	Componentes que afectan los parámetros
Resolución	<ul style="list-style-type: none"> ○ Lente ○ Monitor ○ Cámara ○ Tarjeta digitalizadora
Contraste:	<ul style="list-style-type: none"> ○ Cámara ○ Tarjeta digitalizadora ○ Iluminación
Profundidad de Campo (DOF)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Apertura del Lente (f/#)
Distorsión	<ul style="list-style-type: none"> ○ Lente
Errores de perspectiva	<ul style="list-style-type: none"> ○ Lente

Componentes que afectan los parámetros del sistema

ANEXO D Caracterización sistema calefactor

Curva 1

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0	29.6
1	38.0
2	55.5
3	72.4
4	89.8
5	105.7
6	123.6
7	138.9
8	154.5
9	171.2
10	-
11	203.8
12	218.4
13	233.4
14	251.8
15	265.9
16	277.3
17	316.6
18	228.8
19	316.0
20	337.6
21	350.2
22	367.0
23	378.9
24	389.0

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
25	398.3
26	407.3
27	421.6
28	429.3
29	438.2
30	447.8
31	458.3
32	465.1
33	474.4
34	481.2
35	490.2
36	498.0
37	503.7
38	510.3
39	519.6
40	524.5
41	533.5
42	539.8
43	545.8
44	553.3
45	559.3
46	565.4
47	571.8
48	577.4
49	583.2

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
50	589.0
51	594.4
52	600.3
53	606.2
54	611.1
55	616.9
56	621.9
57	626.9
58	632.7
59	637.3
60	641.6
61	646.9
62	651.3
63	655.8
64	660.1
65	665.0
66	669.4
67	674.1
68	678.4
69	681.3
70	686.5
71	690.4
72	695.0
73	698.5

Fuente: Autora del proyecto

Curva 2

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0	27.5
1	38.0
2	58.7
3	76.9
4	94.0
5	110.5
6	126.2
7	142.6
8	159.9
9	175.1
10	189.9
11	204.4
12	221.6
13	235.8
14	247.2
15	265.7
16	278.2
17	291.1
18	305.5
19	319.6
20	333.0
21	341.9
22	353.6
23	368.2
24	378.6

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
25	391.8
26	401.9
27	409.8
28	420.1
29	432.5
30	438.2
31	449.9
32	456.2
33	464.3
34	472.1
35	480.3
36	487.4
37	493.7
38	500.9
39	509.3
40	516.3
41	522.9
42	529.5
43	536.2
44	539.7
45	548.2
46	555.6
47	562.4
48	568.9
49	572.7

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
50	579.5
51	587.6
52	592.3
53	597.5
54	603.7
55	608.6
56	615.9
57	621.8
58	626.9
59	631.5
60	637.6
61	642.5
62	647.7
63	651.8
64	657.3
65	662.1
66	667.0
67	672.8
68	678.3
69	681.4
70	685.6
71	690.4
72	694.3
73	700.1

Fuente: Autora del proyecto

Curva 3

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0	29.2
1	36.5
2	50.5
3	65.5
4	81.8
5	99.6
6	117.0
7	132.8
8	149.8
9	162.5
10	174.9
11	190.8
12	203.0
13	220.4
14	235.4
15	245.4
16	261.8
17	270.1
18	280.0
19	296.6
20	307.5
21	314.6
22	330.5
23	340.5
24	351.2
25	361.0
26	367.3
27	379.2

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
28	389.4
29	398.0
30	405.7
31	415.9
32	423.1
33	434.3
34	443.9
35	450.7
36	457.2
37	464.0
38	473.3
39	481.3
40	485.3
41	495.9
42	503.6
43	507.9
44	515.4
45	522.9
46	528.9
47	535.0
48	540.0
49	547.3
50	553.2
51	559.0
52	565.4
53	570.6
54	577.2
55	583.2

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
56	588.2
57	592.1
58	598.0
59	603.9
60	610.1
61	612.2
62	619.5
63	624.5
64	628.9
65	634.7
66	637.8
67	643.3
68	647.3
69	653.7
70	656.8
71	661.9
72	666.4
73	671.2
74	675.4
75	679.8
76	685.4
77	689.5
78	693.8
79	697.0
80	700.0

Fuente: Autora del proyecto

Curva 4

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0	27.8
1	36.5
2	51.6
3	66.9
4	82.6
5	97.0
6	112.9
7	128.3
8	144.3
9	157.3
10	172.4
11	189.7
12	198.2
13	212.6
14	226.7
15	239.6
16	250.3
17	259.6
18	275.2
19	283.1
20	301.3
21	313.8
22	317.5
23	329.3
24	342.6
25	352.6
26	363.8

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
27	382.3
28	378.9
29	398.3
30	400.9
31	409.3
32	415.8
33	428.7
34	441.6
35	442.6
36	450.3
37	457.3
38	470.2
39	477.8
40	483.3
41	492.1
42	500.6
43	504.6
44	515.0
45	522.1
46	528.3
47	535.6
48	542.8
49	549.3
50	556.3
51	562.1
52	567.8

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
53	574.6
54	580.9
55	586.9
56	593.8
57	598.5
58	604.6
59	610.7
60	615.7
61	620.1
62	625.9
63	631.0
64	636.1
65	641.1
66	646.1
67	651.3
68	656.2
69	662.1
70	666.8
71	672.6
72	676.1
73	680.3
74	685.0
75	689.6
76	693.8
77	698.7
78	700.0

Fuente: Autora del proyecto

Curva 5

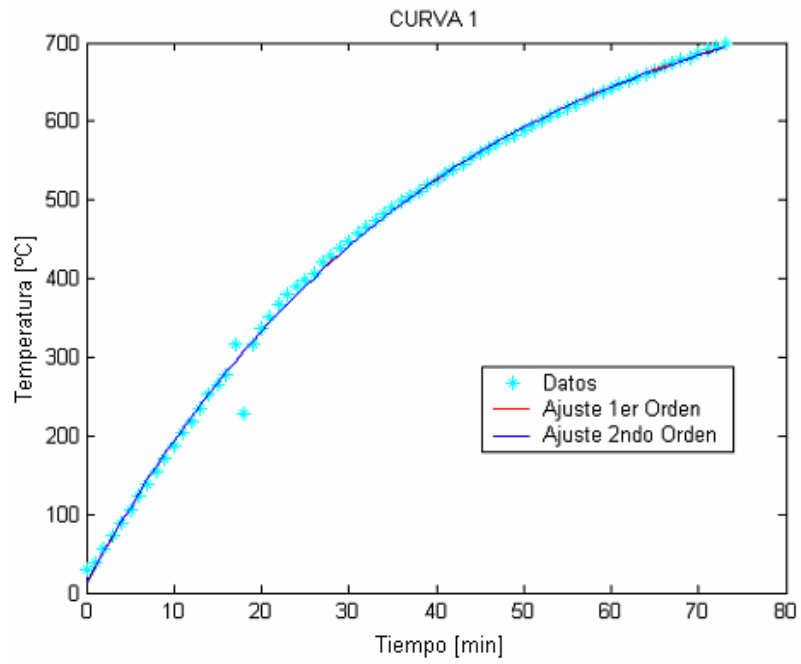
Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0	28.3
1	47.1
2	78.6
3	105.1
4	112.4
5	137.0
6	158.0
7	175.4
8	193.0
9	209.6
10	221.5
11	239.3
12	253.6
13	267.2
14	280.2
15	293.0
16	304.8
17	316.4
18	327.8
19	339.8
20	352.3
21	362.4
22	375.0
23	383.3
24	393.7
25	407.8

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
26	415.6
27	424.9
28	432.7
29	443.7
30	451.6
31	459.9
32	468.2
33	476.5
34	483.8
35	490.8
36	498.6
37	504.9
38	510.8
39	517.8
40	525.2
41	530.2
42	537.3
43	542.0
44	548.9
45	555.1
46	560.6
47	567.1
48	572.3
49	578.5
50	583.6
51	589.1

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
52	594.9
53	598.3
54	604.6
55	608.9
56	613.7
57	620.0
58	624.4
59	629.7
60	634.3
61	639.0
62	643.3
63	648.3
64	653.3
65	658.1
66	662.5
67	666.9
68	670.9
69	675.6
70	680.4
71	684.1
72	688.8
73	692.6
74	696.6
75	701.8

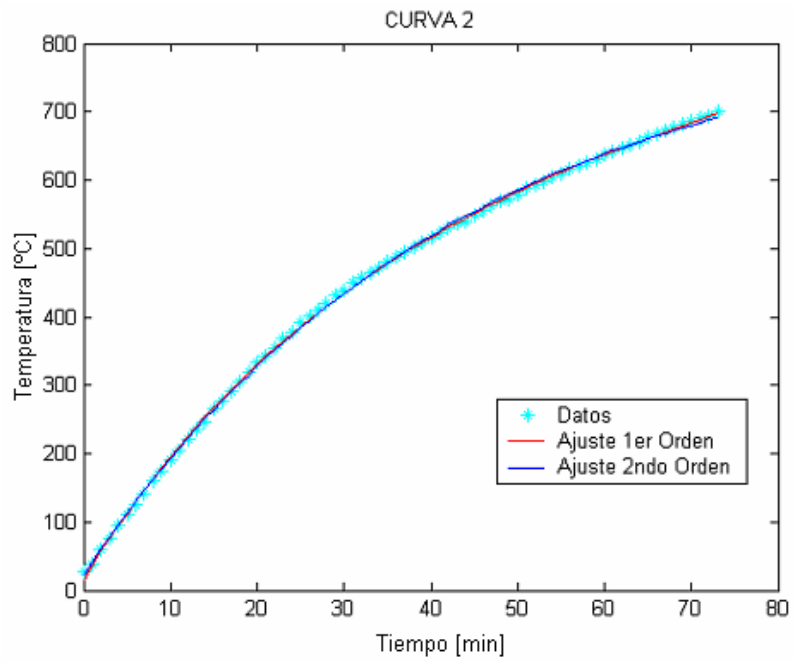
Fuente: Autora del proyecto

Ajuste de 1^{er} y 2^{ndo} orden de la Curva 1



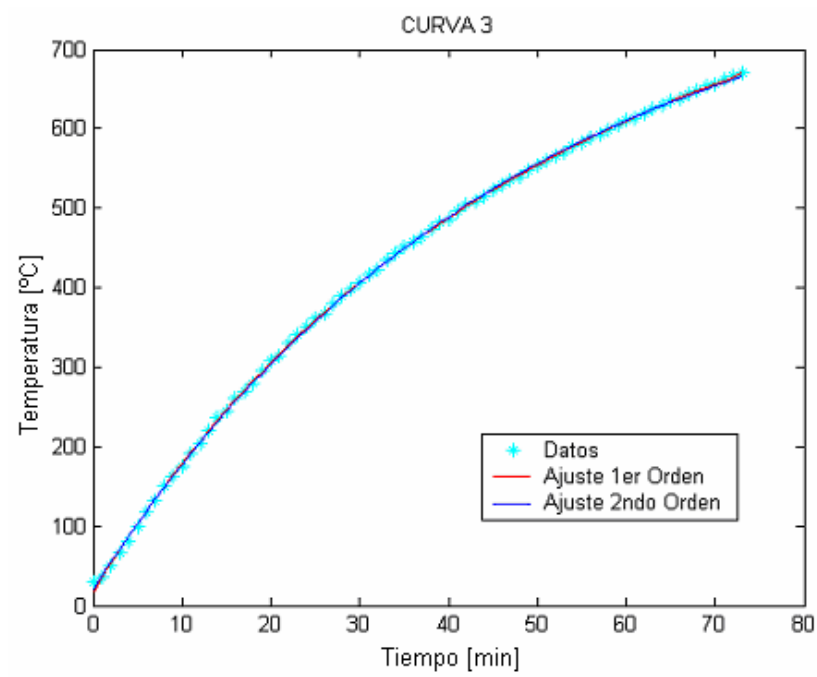
Fuente: Autora del proyecto

Ajuste de 1^{er} y 2^{ndo} orden de la Curva 2



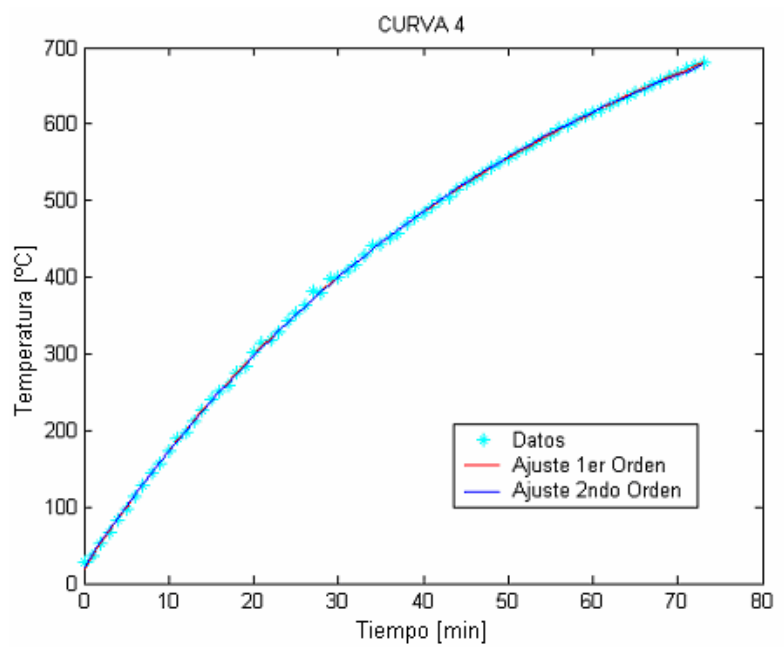
Fuente: Autora del proyecto

Ajuste de 1^{er} y 2^{ndo} orden de la Curva 3



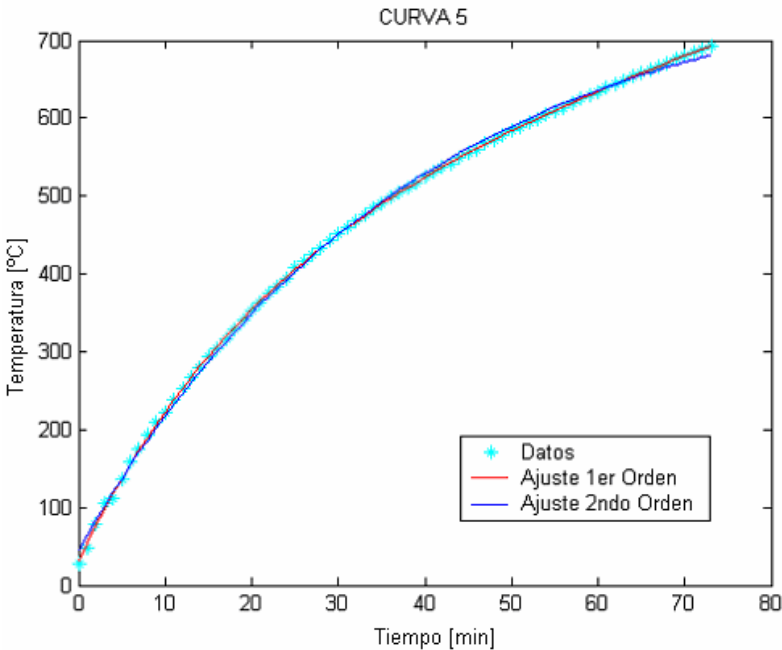
Fuente: Autora del proyecto

Ajuste de 1^{er} y 2^{ndo} orden de la Curva 4



Fuente: Autora del proyecto

Ajuste de 1^{er} y 2^{ndo} orden de la Curva 5



Fuente: Autora del proyecto

FRAME GRABBER

Video formats	PAL/NTSC/SECAM, RS-170/CCIR, composite (CVBS), Y/C (S-VHS)
Max video resolution	768x576 at 50Hz (PAL/CCIR), 640x480 at 60Hz (NTSC/RS170)
Analog inputs	2x composite, 1x Y/C (multiplexed inputs)
Connectors	2x female RCA (Cinch), 1x 4 pin S-VHS
On-board EEPROM	64 bytes usable as hardware dongle
On-board settings	Hue, saturation, brightness, contrast, AGC etc.
On-board procedures	Color conversion Y/C to RGB in real-time, real-time x/y scaler, interpolation
Acquisition to graphics card	Non-destructive overlay of graphics in live video with low CPU load. Graphics card with BackBuffer mode required.
Sync level	75mV or 125mV: suitable for sync with VCR
On-board RAM	FIFO for transfer to system memory
System bus	Up to 132 MB/s (dependent upon system capacity). PCI 2.1, 32 bit
Transfer	Burst DMA
Color sampling	RGB32, RGB24, RGB16, RGB15, YUV2-YCRCB 4:2:2, BTYUV-YCRCB, 4:1:1, Y8 (gray value), 8 bit, dithered, YCRCB 4:2:2 planar, YUV12 planar, YCRCB 4:1:1 planar, YUV9 planar
Sampling rate	40 MHz for luminance and chrominance
A/D conversion	CCIR: 14.75 MHz, NTSC: 12.27 MHz, SECAM: 14.75 MHz
Square pixels	Yes
Pixel jitter	<6ns
Noise	1 LSB RMS
Included software	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)
Available software	Grab&View, Ad Oculos, LEADTOOLS, ActivVisionTools, HALCON
Recommended compilers	MS Visual Basic, MS Visual Studio, Borland Delphi

AD202/AD204**FEATURES**

Small Size: 4 Channels/Inch
Low Power: 35 mW (AD204)
High Accuracy: $\pm 0.025\%$ Max Nonlinearity (K Grade)
High CMR: 130 dB (Gain = 100 V/V)
Wide Bandwidth: 5 kHz Full-Power (AD204)
High CMV Isolation: ± 2000 V pk Continuous (K Grade)
(Signal and Power)
Isolated Power Outputs
Uncommitted Input Amplifier

APPLICATIONS

Multichannel Data Acquisition
Current Shunt Measurements
Motor Controls
Process Signal Isolation
High Voltage Instrumentation Amplifier

GENERAL DESCRIPTION

The AD202 and AD204 are general purpose, two-port, transformer-coupled isolation amplifiers that may be used in a broad range of applications where input signals must be measured, processed, and/or transmitted without a galvanic connection. These industry standard isolation amplifiers offer a complete isolation function, with both signal and power isolation provided for in a single compact plastic SIP or DIP style package. The primary distinction between the AD202 and the AD204 is that the AD202 is powered directly from a 15 V dc supply while the AD204 is powered by an externally supplied clock, such as the recommended AD246 Clock Driver.

The AD202 and AD204 provide total galvanic isolation between the input and output stages of the isolation amplifier through the use of internal transformer-coupling. The functionally complete AD202 and AD204 eliminate the need for an external, user-supplied dc-to-dc converter. This permits the designer to minimize the necessary circuit overhead and consequently reduce the overall design and component costs.

The design of the AD202 and AD204 emphasizes maximum flexibility and ease of use, including the availability of an uncommitted op amp on the input stage. They feature a bipolar ± 5 V output range, an adjustable gain range of from 1V/V to 100 V/V, $\pm 0.025\%$ max nonlinearity (K grade), 130 dB of CMR, and the AD204 consumes a low 35 mW of power.

The functional block diagrams can be seen in Figures 1a and 1b.

PRODUCT HIGHLIGHTS

The AD202 and AD204 are full-featured isolators offering numerous benefits to the user:

Small Size: The AD202 and AD204 are available in SIP and DIP form packages. The SIP package is just 0.25" wide, giving the user a channel density of four channels per inch. The isolation barrier is positioned to maximize input to output spacing. For applications requiring a low profile, the DIP package provides a height of just 0.350".

High Accuracy: With a maximum nonlinearity of $\pm 0.025\%$ for the AD202K/AD204K ($\pm 0.05\%$ for the AD202J/AD204J) and low drift over temperature, the AD202 and AD204 provide high isolation without loss of signal integrity.

Low Power: Power consumption of 35 mW (AD204) and 75 mW (AD202) over the full signal range makes these isolators ideal for use in applications with large channel counts or tight power budgets.

Wide Bandwidth: The AD204's full-power bandwidth of 5 kHz makes it useful for wideband signals. It is also effective in applications like control loops, where limited bandwidth could result in instability.

Excellent Common-Mode Performance: The AD202K/AD204K provide ± 2000 V pk continuous common-mode isolation, while the AD202J/AD204J provide ± 1000 V pk continuous common-mode isolation. All models have a total common-mode input capacitance of less than 5 pF inclusive of power isolation. This results in CMR ranging from 130 dB at a gain of 100 dB to 104 dB (minimum at unity gain) and very low leakage current (2 μ A maximum).

Flexible Input: An uncommitted op amp is provided at the input of all models. This provides buffering and gain as required, and facilitates many alternative input functions including filtering, summing, high voltage ranges, and current (transimpedance) input.

Isolated Power: The AD204 can supply isolated power of ± 7.5 V at 2 mA. This is sufficient to operate a low-drift input preamp, provide excitation to a semiconductor strain gage, or power any of a wide range of user-supplied ancillary circuits. The AD202 can supply ± 7.5 V at 0.4 mA, which is sufficient to operate adjustment networks or low power references and op amps, or to provide an open-input alarm.

AD202/AD204—SPECIFICATIONS (Typical @ 25°C and $V_S = 15\text{ V}$ unless otherwise noted.)

Model	AD204J	AD204K	AD202J	AD202K
GAIN				
Range	1 V/V–100 V/V	*	*	*
Error	±0.5% typ (±4% max)	*	*	*
vs. Temperature	±20 ppm/°C typ (±45 ppm/°C max)	*	*	*
vs. Time	±50 ppm/1000 Hours	*	*	*
vs. Supply Voltage	±0.01%/V	±0.01%/V	±0.01%/V	±0.01%/V
Nonlinearity ($G = 1\text{ V/V}$) ¹	±0.05% max	±0.025% max	±0.05% max	±0.025% max
Nonlinearity vs. Isolated Supply Load	±0.0015%/mA	*	*	*
INPUT VOLTAGE RATINGS				
Input Voltage Range	±5 V	*	*	*
Max Isolation Voltage (Input to Output)				
AC, 60 Hz, Continuous	750 V rms	1500 V rms	750 V rms	1500 V rms
Continuous (AC and DC)	±1000 V Peak	±2000 V Peak	±1000 V Peak	±2000 V Peak
Isolation-Mode Rejection Ratio (IMRR) @ 60 Hz				
$R_S \leq 100\ \Omega$ (HI and LO Inputs) $G = 1\text{ V/V}$	110 dB	110 dB	105 dB	105 dB
$G = 100\text{ V/V}$	130 dB	*	*	*
$R_S \leq 1\text{ k}\Omega$ (Input HI, LO, or Both) $G = 1\text{ V/V}$	104 dB min	104 dB min	100 dB min	100 dB min
$G = 100\text{ V/V}$	110 dB min	*	*	*
Leakage Current Input to Output @ 240 V rms, 60 Hz	2 μA rms max	*	*	*
INPUT IMPEDANCE				
Differential ($G = 1\text{ V/V}$)	$10^{12}\ \Omega$	*	*	*
Common-Mode	2 G Ω /4.5 pF	*	*	*
INPUT BIAS CURRENT				
Initial, @ 25°C	±30 pA	*	*	*
vs. Temperature (0°C to 70°C)	±10 nA	*	*	*
INPUT DIFFERENCE CURRENT				
Initial, @ 25°C	±5 pA	*	*	*
vs. Temperature (0°C to 70°C)	±2 nA	*	*	*
INPUT NOISE				
Voltage, 0.1 Hz to 100 Hz	4 μV p-p	*	*	*
$f > 200\text{ Hz}$	50 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	*	*	*
FREQUENCY RESPONSE				
Bandwidth ($V_O \leq 10\text{ V}$ p-p, $G = 1\text{ V–50 V/V}$)	5 kHz	5 kHz	2 kHz	2 kHz
Settling Time, to ±10 mV (10 V Step)	1 ms	*	*	*
OFFSET VOLTAGE (RTI)				
Initial, @ 25°C Adjustable to Zero	(±15 ±15/G) mV max	(±5 ±5/G) mV max	(±15 ±15/G) mV max	(±5 ±5/G) mV max
vs. Temperature (0°C to 70°C)	(±10 ± $\frac{10}{G}$) $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	*	*	*
RATED OUTPUT				
Voltage (Out HI to Out LO)	±5 V	*	*	*
Voltage at Out HI or Out LO (Ref. Pin 32)	±6.5 V	*	*	*
Output Resistance	3 k Ω	3 k Ω	7 k Ω	7 k Ω
Output Ripple, 100 kHz Bandwidth	10 mV p-p	*	*	*
5 kHz Bandwidth	0.5 mV rms	*	*	*
ISOLATED POWER OUTPUT²				
Voltage, No Load	±7.5 V	*	*	*
Accuracy	±10%	*	*	*
Current	2 mA (Either Output) ³	2 mA (Either Output) ³	400 μA Total	400 μA Total
Regulation, No Load to Full Load	5%	*	*	*
Ripple	100 mV p-p	*	*	*
OSCILLATOR DRIVE INPUT				
Input Voltage	15 V p-p Nominal	15 V p-p Nominal	N/A	N/A
Input Frequency	25 kHz Nominal	25 kHz Nominal	N/A	N/A
POWER SUPPLY (AD202 Only)				
Voltage, Rated Performance	N/A	N/A	15 V ± 5%	15 V ± 5%
Voltage, Operating	N/A	N/A	15 V ± 10%	15 V ± 10%
Current, No Load ($V_S = 15\text{ V}$)	N/A	N/A	5 mA	5 mA
TEMPERATURE RANGE				
Rated Performance	0°C to 70°C	*	*	*
Operating	–40°C to +85°C	*	*	*
Storage	–40°C to +85°C	*	*	*
PACKAGE DIMENSIONS⁴				
SIP Package (Y)	2.08" × 0.250" × 0.625"	*	*	*
DIP Package (N)	2.10" × 0.700" × 0.350"	*	*	*

NOTES

*Specifications same as AD204J.

¹Nonlinearity is specified as a % deviation from a best straight line.

²1.0 μF min decoupling required (see text).

³5 mA with one supply loaded.

⁴Width is 0.25" typ, 0.26" max.

Specifications subject to change without notice.

MAXIM

Low-Noise Precision Operational Amplifiers

OP27/OP37

General Description

The OP27/OP37 precision operational amplifiers provide lower noise and higher speed with the same input offset and drift specifications as the OP07. Both parts have a $10\mu\text{V}$ offset, $0.2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ drift, and 1.8 million gain. Coupled with a low-voltage noise of $3.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 10Hz and a low $1/f$ noise corner frequency of 2.7Hz, the OP27/OP37 are optimized for accurate amplification of low-level signals. The OP27 features an 8MHz gain-bandwidth product and a $2.8\text{V}/\mu\text{s}$ slew rate. For applications demanding higher speed, the OP37 has a 63MHz gain-bandwidth product, $17\text{V}/\mu\text{s}$ slew rate, and is stable at gains of five or more.

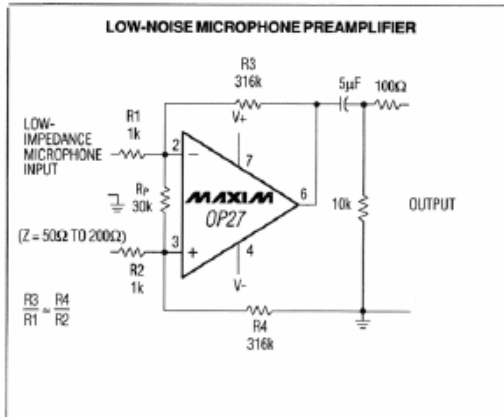
An output swing of $\pm 10\text{V}$ into 600Ω together with low distortion make the OP27/OP37 ideal for professional audio applications.

For applications requiring greater precision or lower noise than the OP27 or OP37, see the MAX427/MAX437 and the MAX410/MAX412/MAX414 data sheets.

Applications

- Low-Noise DC Amplifiers
- Microphone Amplifiers
- Precision Amplifiers
- Tape-Head Preamplifiers
- Thermocouple Amplifiers
- Low-Level Signal Processing
- Medical Instrumentation
- Strain-Gauge Amplifiers
- High-Accuracy Data Acquisition

Typical Application Circuit



Features

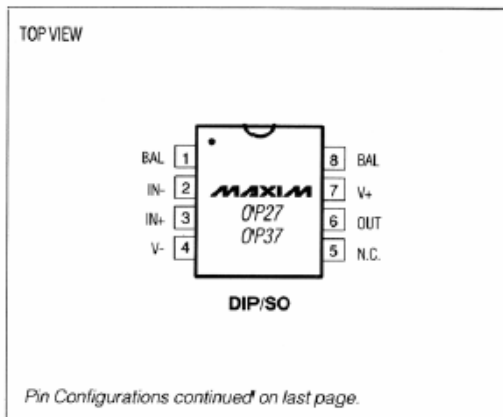
- ◆ $10\mu\text{V}$ Input Offset Voltage
- ◆ $0.2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ Drift
- ◆ $3\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ Input Noise Voltage (1kHz)
- ◆ $80\text{nV}_{\text{p-p}}$ Noise (0.1Hz to 10Hz)
- ◆ $2.8\text{V}/\mu\text{s}$ Slew Rate (OP27)
- ◆ $17\text{V}/\mu\text{s}$ Slew Rate (OP37)
- ◆ 8MHz Gain-Bandwidth Product (OP27)
- ◆ 63MHz Gain-Bandwidth Product (OP37)

Ordering Information

PART	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE
OP27EP	0°C to $+70^\circ\text{C}$	8 Plastic DIP
OP27FP	0°C to $+70^\circ\text{C}$	8 Plastic DIP
OP27GP	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	8 Plastic DIP
OP27GS	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	8 SO
OP27EZ	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	8 CERDIP
OP27FZ	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	8 CERDIP
OP27GZ	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	8 CERDIP
OP27EJ	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	8 TO-99
OP27FJ	-40°C to $+85^\circ\text{C}$	8 TO-99

Ordering Information continued on last page.

Pin Configurations



Pin Configurations continued on last page.

Low-Noise Precision Operational Amplifiers

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage	±22V
Input Voltage (Note 1)	±22V
Output Short-Circuit Duration	Continuous
Differential Input Voltage (Note 2)	±0.7V
Differential Input Current (Note 2)	±25mA
Continuous Power Dissipation (T _A = +70°C)	
Plastic DIP (derate 9.09mW/°C above +70°C)	727mW
SO (derate 5.88mW/°C above +70°C)	471mW
CERDIP (derate 8.00mW/°C above +70°C)	640mW
TO-99 (derate 6.67mW/°C above +70°C)	533mW

Operating Temperature Ranges:

OP27/OP37EP/FP	0°C to +70°C
OP27/OP37G_EZ/EJ/FZ/FJ	-40°C to +85°C
OP27/OP37A_B_JC_	-55°C to +125°C
Junction Temperature Range	-65°C to +150°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (soldering, 10 sec)	+300°C

Note 1: For supply voltages less than ±22V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

Note 2: OP27/OP37 inputs are protected by back-to-back diodes. Current-limiting resistors are not used in order to achieve low noise. If differential input voltage exceeds ±0.7V, the input current should be limited to 25mA.

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V_S = ±15V, T_A = +25°C, unless otherwise noted.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP27A/E OP37A/E			OP27B/F OP37B/F			OP27C/G OP37C/G			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage (Note 3)	V _{OS}		10	25		20	60		30	100	μV	
Long-Term V _{OS} Stability (Notes 4, 5)	V _{OS} /TIME		0.2	1.0		0.3	1.5		0.4	2.0	μV/Mo	
Input Bias Current	I _B		±10	±40		±12	±55		±15	±80	nA	
Input Offset Current	I _{OS}		7	35		9	50		12	75	nA	
Input Voltage Range	I _{VR}		±11.0	±12.3		±11.0	±12.3		±11.0	±12.3	V	
Input Resistance - Differential Mode (Note 6)	R _{IN}		1.3	6		0.94	5		0.7	4	MΩ	
Input Resistance - Common Mode	R _{INCM}		3			2.5			2		GΩ	
Input Noise Voltage (Notes 5, 7)	e _{np-p}	0.1Hz to 10Hz	0.08	0.18		0.08	0.18		0.09	0.25	μVp-p	
Input Noise-Voltage Density (Note 5)	e _n	f _o = 10Hz	3.5	5.5		3.5	5.5		3.8	8.0	nV/√Hz	
		f _o = 30Hz	3.1	4.5		3.1	4.5		3.3	5.6		
		f _o = 1kHz	3.0	3.8		3.0	3.8		3.2	4.5		
Input Noise-Current Density (Notes 5, 8)	i _n	f _o = 10Hz	1.7	4.0		1.7	4.0		1.7		pA/√Hz	
		f _o = 30Hz	1.0	2.3		1.0	2.3		1.0			
		f _o = 1kHz	0.4	0.6		0.4	0.6		0.4	0.6		
Large-Signal Voltage Gain	A _{VO}	R _L ≥ 2kΩ, V _O = ±10V	1000	1800		1000	1800		700	1500	V/mV	
		R _L ≥ 1kΩ, V _O = ±10V	800	1500		800	1500		400	1500		
		R _L ≥ 600Ω, V _O = ±1V, V _S = ±4V (Note 5)	250	700		250	700		200	500		
Output Voltage Swing	V _O	R _L ≥ 2kΩ	±12.0	±13.8		±12.0	±13.8		±11.5	±13.5	V	
		R _L ≥ 600Ω	±10.0	±11.5		±10.0	±11.5		±10.0	±11.5		

FEATURES

- Fast 16-Bit ADC with 200 kSPS Throughput
- Four Single-Ended Analog Input Channels
- Single +5 V Supply Operation
- Input Ranges: 0 V to +4 V, 0 V to +5 V and ± 10 V
- 120 mW Max Power Dissipation
- Power-Down Mode 50 μ W
- Choice of External or Internal 2.5 V Reference
- On-Chip Clock
- Power-Down Mode

GENERAL DESCRIPTION

The AD974 is a four-channel, data acquisition system with a serial interface. The part contains an input multiplexer, a high-speed 16-bit sampling ADC and a +2.5 V reference. All of this operates from a single +5 V power supply that also has a power-down mode. The part will accommodate 0 V to +4 V, 0 V to +5 V or ± 10 V analog input ranges.

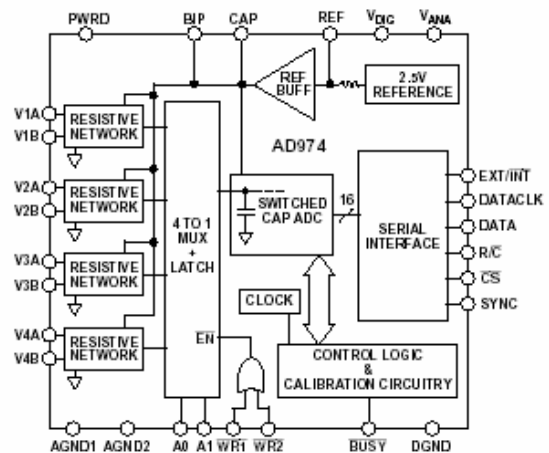
The interface is designed for an efficient transfer of data while requiring a low number of interconnects.

The AD974 is comprehensively tested for ac parameters such as SNR and THD, as well as the more traditional parameters of offset, gain and linearity.

The AD974 is fabricated on Analog Devices' BiCMOS process, which has high performance bipolar devices along with CMOS transistors.

The AD974 is available in 28-lead DIP, SOIC and SSOP packages.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD974 is a complete data acquisition system combining a four-channel multiplexer, a 16-bit sampling ADC and a +2.5 V reference on a single chip.
2. The part operates from a single +5 V supply and also has a power-down feature.
3. Interfacing to the AD974 is simple with a low number of interconnect signals.
4. The AD974 is comprehensively specified for ac parameters such as SNR and THD, as well as dc parameters such as linearity and offset and gain errors.

AD974—SPECIFICATIONS (-40°C to +85°C, $f_s = 200$ kHz, $V_{DIG} = V_{ANA} = +5$ V, unless otherwise noted)

Parameter	Conditions	A Grade			B Grade			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
RESOLUTION		16			16			Bits
ANALOG INPUT								
Voltage Range	Channel On or Off	± 10 V, 0 V to +4 V, 0 V to +5 V (See Table I)						
Impedance		(See Table I)						
Sampling Capacitance		40			40			pF
THROUGHPUT SPEED								
Complete Cycle (Acquire and Convert)		200			200			μ s
Throughput Rate		5			5			kHz
DC ACCURACY								
Integral Linearity Error								LSB ¹
Differential Linearity Error		-2			-1			LSB
No Missing Codes		15			16			Bits
Transition Noise ²		1.0			1.0			LSB
Full-Scale Error ³	Internal Reference							%
Full-Scale Error Drift	Internal Reference	±7			±7			ppm/°C
Full-Scale Error	Ext. REF = +2.5 V							%
Full-Scale Error Drift	Ext. REF = +2.5 V	±2			±2			ppm/°C
Bipolar Zero Error	Bipolar Range							mV
Bipolar Zero Error Drift	Bipolar Range	±2			±2			ppm/°C
Unipolar Zero Error	Unipolar Ranges							mV
Unipolar Zero Error Drift	Unipolar Ranges	±2			±2			ppm/°C
Channel-to-Channel Matching								% FSR
Recovery to Rated Accuracy After Power-Down ⁴	2.2 μ F to CAP	1			1			ms
Power Supply Sensitivity $V_{ANA} = V_{DIG} = V_D$	$V_D = 5$ V \pm 5%							LSB
AC ACCURACY								
Spurious Free Dynamic Range	$f_{IN} = 20$ kHz	90			96			dB ⁵
Total Harmonic Distortion	$f_{IN} = 20$ kHz							dB
Signal-to-(Noise+Distortion)	$f_{IN} = 20$ kHz -60 dB Input	83			85			dB
		27			28			dB
Signal-to-Noise	$f_{IN} = 20$ kHz	83			85			dB
Channel-to-Channel Isolation	$f_{IN} = 20$ kHz	-110			-110			dB
Full Power Bandwidth ⁶		1			1			MHz
-3 dB Input Bandwidth		2.7			2.7			MHz
SAMPLING DYNAMICS								
Aperture Delay	Full-Scale Step	40			40			ns
Transient Response		1			1			μ s
Overvoltage Recovery ⁷		150			150			ns
REFERENCE								
Internal Reference Voltage		2.48	2.5	2.52	2.48	2.5	2.52	V
Internal Reference Source Current		1			1			μ A
External Reference Voltage Range for Specified Linearity		2.3	2.5	2.7	2.3	2.5	2.7	V
External Reference Current Drain	Ext. REF = +2.5 V	100			100			μ A
DIGITAL INPUTS								
Logic Levels								
V_{IL}		-0.3			-0.3			V
V_{IH}		+2.0			+2.0			V
I_{IL}								μ A
I_{IH}								μ A

Parameter	Conditions	A Grade			B Grade			Units	
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max		
DIGITAL OUTPUTS									
Data Format		Serial 16 Bits Straight Binary							
Data Coding									
V_{OL}	$I_{SINK} = 1.6 \text{ mA}$ $I_{SOURCE} = 500 \mu\text{A}$ High-Z State High-Z State $V_{OUT} = 0 \text{ V to } V_{DIG}$						+0.4	V	
V_{OH}		+4			+4		+0.4	V	
Output Capacitance							15	pF	
Leakage Current							± 5	μA	
POWER SUPPLIES									
Specified Performance									
V_{DIG}		+4.75	+5	+5.25	+4.75	+5	+5.25	V	
V_{ANA}		+4.75	+5	+5.25	+4.75	+5	+5.25	V	
I_{DIG}		4.5			4.5			mA	
I_{ANA}		14			14			mA	
Power Dissipation									
PWRD LOW							120	mW	
PWRD HIGH		50			50		120	μW	
TEMPERATURE RANGE									
Specified Performance									
	T_{MIN} to T_{MAX}	-40			+85		-40	+85	$^{\circ}\text{C}$

NOTES

¹LSB means Least Significant Bit. With a $\pm 10 \text{ V}$ input, one LSB is $305 \mu\text{V}$.

²Typical rms noise at worst case transitions and temperatures.

³Full-Scale Error is expressed as the % difference between the actual full-scale code transition voltage and the ideal full-scale transition voltage, and includes the effect of offset error. For bipolar input, the Full-Scale Error is the worst case of either the -Full-Scale or +Full-Scale code transition voltage errors. For unipolar input ranges, Full-Scale Error is with respect to the +Full-Scale code transition voltage.

⁴External 2.5 V reference connected to REF.

⁵All specifications in dB are referred to a full-scale $\pm 10 \text{ V}$ input.

⁶Full-Power Bandwidth is defined as full-scale input frequency at which Signal-to-(Noise + Distortion) degrades to 60 dB, or 10 bits of accuracy.

⁷Recovers to specified performance after a $2 \times \text{FS}$ input overvoltage.

Specifications subject to change without notice.

TIMING SPECIFICATIONS ($f_s = 200 \text{ kHz}$, $V_{DIG} = V_{ANA} = +5 \text{ V}$, -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$)

Parameter	Symbol	Min	Typ	Max	Units
Convert Pulswidth	t_1	50			ns
R/\overline{C} , \overline{CS} to \overline{BUSY} Delay	t_2			100	ns
\overline{BUSY} LOW Time	t_3			4.0	μs
\overline{BUSY} Delay after End of Conversion	t_4		50		ns
Aperture Delay	t_5		40		ns
Conversion Time	t_6		3.8	4.0	μs
Acquisition Time	t_7	1.0			μs
Throughput Time	$t_6 + t_7$			5	μs
R/\overline{C} Low to DATACLK Delay	t_8		220		ns
DATACLK Period	t_9		220		ns
DATA Valid Setup Time	t_{10}	50			ns
DATA Valid Hold Time	t_{11}	20			ns
EXT. DATACLK Period	t_{12}	66			ns
EXT. DATACLK HIGH	t_{13}	20			ns
EXT. DATACLK LOW	t_{14}	30			ns
R/\overline{C} , \overline{CS} to EXT. DATACLK Setup Time	t_{15}	20		$t_{12} + 5$	ns
R/\overline{C} to \overline{CS} Setup Time	t_{16}	10			ns
EXT. DATACLK to SYNC Delay	t_{17}	15		66	ns
EXT. DATACLK to DATA Valid Delay	t_{18}	25		66	ns
\overline{CS} to EXT. DATACLK Rising Edge Delay	t_{19}	10			ns
Previous DATA Valid after \overline{CS} , R/\overline{C} Low	t_{20}	3.5			μs
\overline{BUSY} to EXT. DATACLK Setup Time	t_{21}	5			ns
Final EXT. DATACLK to \overline{BUSY} Rising Edge	t_{22}			1.7	μs
A0, A1 to $\overline{WR1}$, $\overline{WR2}$ Setup Time	t_{23}	10			ns
A0, A1 to $\overline{WR1}$, $\overline{WR2}$ Hold Time	t_{24}	10			ns
$\overline{WR1}$, $\overline{WR2}$ Pulswidth	t_{25}	50			ns

Specifications subject to change without notice.

FEATURES

- 1024-position resolution
- Nonvolatile memory maintains wiper setting
- Power-on refresh with EEMEM setting
- EEMEM restore time: 140 μ s typ
- Full monotonic operation
- 10 k Ω , 50 k Ω , and 100 k Ω terminal resistance
- Permanent memory write-protection
- Wiper setting readback
- Predefined linear increment/decrement instructions
- Predefined ± 6 dB/step log taper increment/decrement instructions
- SPI[®] compatible serial interface
- 3 V to 5 V single supply or ± 2.5 V dual supply
- 28 bytes extra nonvolatile memory for user-defined data
- 100-year typical data retention, $T_A = 55^\circ\text{C}$

APPLICATIONS

- Mechanical potentiometer replacement
- Instrumentation: gain, offset adjustment
- Programmable voltage to current conversion
- Programmable filters, delays, time constants
- Programmable power supply
- Low resolution DAC replacement
- Sensor calibration

GENERAL DESCRIPTION

The AD5231 is a nonvolatile memory,¹ digitally controlled potentiometer² with 1024-step resolution. The device performs the same electronic adjustment function as a mechanical potentiometer with enhanced resolution, solid state reliability, and remote controllability. The AD5231 has versatile programming using a standard 3-wire serial interface, for 16 modes of operation and adjustment including scratchpad programming, memory storing and restoring, increment/decrement, ± 6 dB/step log taper adjustment, wiper setting readback, and extra EEMEM for user-defined information such as memory data for other components, look-up table, or system identification information.

In the scratchpad programming mode, a specific setting can be programmed directly to the RDAC2 register, which sets the resistance between Terminals W-A and W-B. This setting can be stored into the EEMEM and is transferred automatically to the RDAC register during system power-on.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

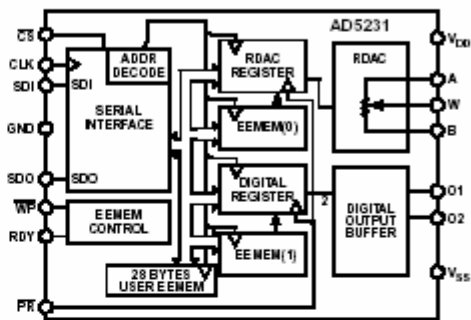


Figure 1.

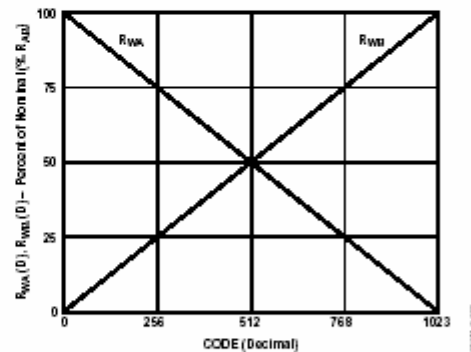


Figure 2. $R_{WA}(D)$ and $R_{WB}(D)$ vs. Decimal Code

The EEMEM content can be restored dynamically or through external PR strobing, and a WP function protects EEMEM contents. To simplify the programming, the linear-step increment or decrement commands can be used to move the RDAC wiper up or down, one step at a time. The ± 6 dB step commands can be used to double or half the RDAC wiper setting.

The AD5231 is available in a thin TSSOP-16 package. The part is guaranteed to operate over the extended industrial temperature range of -40°C to $+85^\circ\text{C}$.

¹The terms nonvolatile memory and EEMEM are used interchangeably.
²The terms digital potentiometer and RDAC are used interchangeably.

SPECIFICATIONS

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—10 k Ω , 50 k Ω , 100 k Ω VERSIONS

$V_{DD} = 3\text{ V} \pm 10\%$ or $5\text{ V} \pm 10\%$, $V_{SS} = 0\text{ V}$, $V_A = V_{DD}$, $V_B = 0\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} < T_A < +85^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

Table 1.

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ ¹	Max	Unit
DC CHARACTERISTICS						
RHEOSTAT MODE						
Resistor Differential Nonlinearity ²	R-DNL	R_{WB} , $V_A = \text{NC}$, Monotonic	-1	$\pm 1/2$	+1.8	LSB
Resistor Integral Nonlinearity ²	R-INL	R_{WB} , $V_A = \text{NC}$	-0.2		+0.2	LSB
Nominal Resistor Tolerance	$\Delta R_{WB}/R_{WB}$	$D = 0x3FF$	-40		+20	%
Resistance Temperature Coefficient	$(\Delta R_{WB}/R_{WB})/\Delta T \times 10^6$			600		ppm/ $^\circ\text{C}$
Wiper Resistance	R_W	$I_W = 100\ \mu\text{A}$, $V_{DD} = 5.5\text{ V}$, Code = half-scale $I_W = 100\ \mu\text{A}$, $V_{DD} = 3\text{ V}$, Code = half-scale		15	100	Ω
				50		Ω
DC CHARACTERISTICS						
POTENTIOMETER DIVIDER MODE						
Resolution	N				10	Bits
Differential Nonlinearity ³	DNL	Monotonic, $T_A = 25^\circ\text{C}$	-1	$\pm 1/2$	+1	LSB
		Monotonic, $T_A = -40^\circ\text{C}$ or $+85^\circ\text{C}$	-1		+1.25	LSB
Integral Nonlinearity ³	INL		-0.4		+0.4	LSB
Voltage Divider Temperature Coefficient	$(\Delta V_W/V_W)/\Delta T \times 10^6$	Code = half-scale		15		ppm/ $^\circ\text{C}$
Full-Scale Error	V_{WFSZ}	Code = full scale	-3		0	% FS
Zero-Scale Error	V_{WZSZ}	Code = zero scale	0		1.5	% FS
RESISTOR TERMINALS						
Terminal Voltage Range ⁴	$V_{A,B,W}$		V_{SS}		V_{DD}	V
Capacitance ⁵ A, B	$C_{A,B}$	$f = 1\text{ MHz}$, measured to GND, code = half-scale		50		pF
Capacitance ⁵ W	C_W	$f = 1\text{ MHz}$, measured to GND, Code = half-scale		50		pF
Common-Mode Leakage Current ^{5,6}	I_{CM}	$V_W = V_{DD}/2$		0.01	1	μA
DIGITAL INPUTS AND OUTPUTS						
Input Logic High	V_{IH}	With respect to GND, $V_{DD} = 5\text{ V}$	2.4			V
Input Logic Low	V_{IL}	With respect to GND, $V_{DD} = 5\text{ V}$			0.8	V
Input Logic High	V_{IH}	With respect to GND, $V_{DD} = 3\text{ V}$	2.1			V
Input Logic Low	V_{IL}	With respect to GND, $V_{DD} = 3\text{ V}$			0.6	V
Input Logic High	V_{IH}	With respect to GND, $V_{DD} = +2.5\text{ V}$, $V_{SS} = -2.5\text{ V}$	2.0			V
Input Logic Low	V_{IL}	With respect to GND, $V_{DD} = +2.5\text{ V}$, $V_{SS} = -2.5\text{ V}$			0.5	V
Output Logic High (SDO, RDY)	V_{OH}	$R_{PULL-UP} = 2.2\text{ k}\Omega$ to 5 V (see Figure 26)	4.9			V
Output Logic Low	V_{OL}	$I_{OL} = 1.6\text{ mA}$, $V_{LOGIC} = 5\text{ V}$ (see Figure 26)			0.4	V
Input Current	I_I	$V_{IN} = 0\text{ V}$ or V_{DD}			± 2.5	μA
Input Capacitance ⁷	C_{IL}			4		pF
Output Current ⁸	I_{O1}, I_{O2}	$V_{DD} = 5\text{ V}$, $V_{SS} = 0\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_{DD} = 2.5\text{ V}$, $V_{SS} = 0\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		50		mA
				7		mA
POWER SUPPLIES						
Single-Supply Power Range	V_{DD}	$V_{SS} = 0\text{ V}$	2.7		5.5	V
Dual-Supply Power Range	V_{DD}/V_{SS}		± 2.25		± 2.75	V
Positive Supply Current	I_{DD}	$V_{IN} = V_{DD}$ or $V_L = \text{GND}$		2.7	10	μA

AD5231

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ ¹	Max	Unit
Negative Supply Current	I_{SS}	$V_{IH} = V_{DD}$ or $V_L = GND$, $V_{DD} = +2.5 V$, $V_{SS} = -2.5 V$		0.5	10	μA
EEMEM Store Mode Current	$I_{DD}(\text{store})$	$V_{IH} = V_{DD}$ or $V_L = GND$, $V_{SS} = GND$, $I_{SS} \approx 0$		40		mA
EEMEM Restore Mode Current ⁷	$I_{DD}(\text{restore})$	$V_{DD} = +2.5 V$, $V_{SS} = -2.5 V$ $V_{IH} = V_{DD}$ or $V_L = GND$, $V_{SS} = GND$, $I_{SS} \approx 0$	0.3	3	9	mA
Power Dissipation ⁸	P_{DISS}	$V_{DD} = +2.5 V$, $V_{SS} = -2.5 V$ $V_{IH} = V_{DD}$ or $V_L = GND$	-0.3	-3	-9	mW
Power Supply Sensitivity ⁹	P_{SS}	$\Delta V_{DD} = 5 V \pm 10\%$		0.002	0.01	%/%
DYNAMIC CHARACTERISTICS^{5, 6}						
Bandwidth	BW	-3 dB, $R_{AB} = 10 k\Omega/50 k\Omega/100 k\Omega$		370/85/44		kHz
Total Harmonic Distortion	THD _w	$V_A = 1 V$ rms, $V_B = 0 V$, $f = 1 kHz$, $R_{AB} = 10 k\Omega$		0.022		%
		$V_A = 1 V$ rms, $V_B = 0 V$, $f = 1 kHz$, $R_{AB} = 50 k\Omega, 100 k\Omega$		0.045		%
V _w Settling Time	t_s	$V_A = V_{DD}$, $V_B = 0 V$, $V_W = 0.50\%$ error band, Code 0x000 to 0x200 for $R_{AB} = 10 k\Omega/50 k\Omega/100 k\Omega$		1.2/3.7/7		μs
Resistor Noise Voltage	$e_{n, W}$	$R_{WB} = 5 k\Omega$, $f = 1 kHz$		9		nV/\sqrt{Hz}

¹ Typicals represent average readings at 25°C and $V_{DD} = 5 V$.

² Resistor position nonlinearity error R-INL is the deviation from an ideal value measured between the maximum resistance and the minimum resistance wiper positions. R-DNL measures the relative step change from ideal between successive tap positions. $I_{DD} \sim 50 \mu A$ at $V_{DD} = 2.7 V$ and $I_{SS} \sim 400 \mu A$ at $V_{DD} = 5 V$ for the $R_{AB} = 10 k\Omega$ version, $I_{DD} \sim 50 \mu A$ for the $R_{AB} = 50 k\Omega$ and $I_{SS} \sim 25 \mu A$ for the $R_{AB} = 100 k\Omega$ version (see Figure 26).

³ INL and DNL are measured at V_{DD} with the RDAC configured as a potentiometer divider similar to a voltage output DAC. $V_A = V_{DD}$ and $V_B = V_{SS}$. DNL specification limits of -1 LSB minimum are guaranteed monotonic operating condition (see Figure 27).

⁴ Resistor Terminals A, B, and W have no limitations on polarity with respect to each other. Dual supply operation enables ground-referenced bipolar signal adjustment.

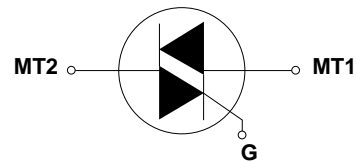
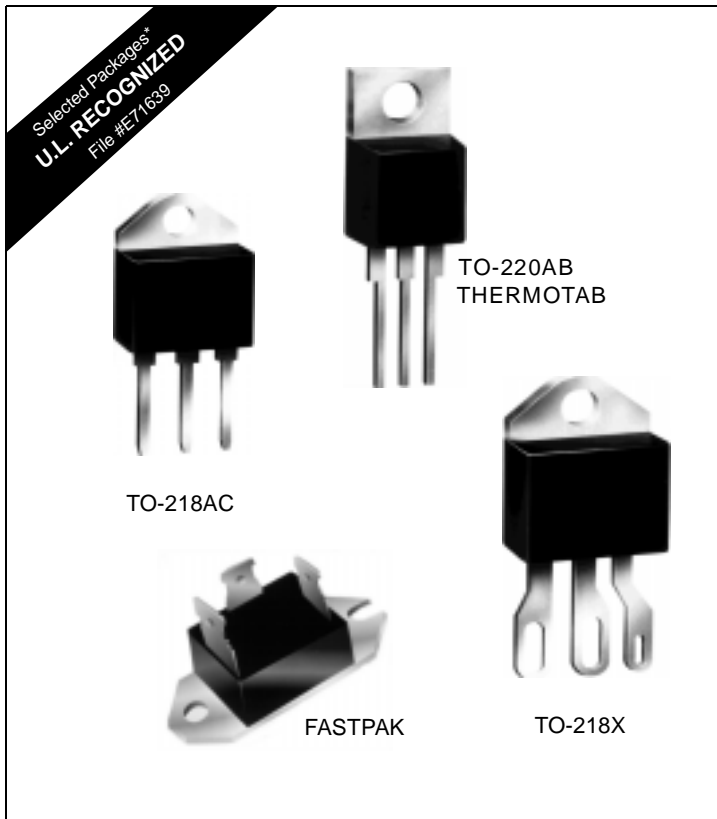
⁵ Guaranteed by design and not subject to production test.

⁶ Common-mode leakage current is a measure of the dc leakage from any Terminal B-W to a common-mode bias level of $V_{DD}/2$.

⁷ EEMEM restore mode current is not continuous. Current consumed while EEMEM locations are read and transferred to the RDAC register (see Figure 23). To minimize power dissipation, a NOP Instruction 0 (0x0) should be issued immediately after Instruction 1 (0x1).

⁸ P_{DISS} is calculated from $(I_{DD} \times V_{DD}) + (I_{SS} \times V_{SS})$.

⁹ All dynamic characteristics use $V_{DD} = +2.5 V$ and $V_{SS} = -2.5 V$.



Alternistor Triacs

(6 – 40 Amps)

General Description

Teccor offers bidirectional alternistors with current ratings from 6 to 40 amperes with voltages from 200 to 800 volts as part of Teccor's broad line of thyristors. Teccor's alternistor has been specifically designed for applications which are required to switch highly inductive loads. To accomplish this, a special chip has been designed which effectively offers the same performance as two thyristors (SCRs) wired inverse parallel (back-to-back); hence, the alternistor has better turn-off behavior than a standard triac. An alternistor may be triggered from a blocking to conduction state for either polarity of applied AC voltage with operating modes in Quadrants I, II, and III.

This new chip construction provides two electrically separate SCR structures, providing enhanced dv/dt characteristics while retaining the advantages of a single chip device.

All alternistors have glass-passivated junctions to ensure long term reliability and parameter stability. Teccor's glass offers a reliable barrier against junction contamination.

These alternistors are offered in four basic package configurations: TO-218X, TO-218AC, FastPak, and TO-220AB. Teccor's TO-218X package has been designed for heavy, steady power-

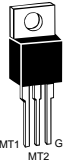
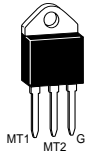
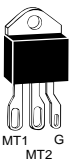

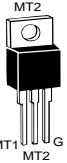
handling capability. The TO-218X features large eyelet terminals for ease of soldering heavy gauge hook-up wire. All the isolated packages have a standard isolation voltage rating of $2500V_{RMS}$.

Variations of devices covered in this data sheet are available for custom design applications. Please consult factory for further information.

Features

- High surge current capability
- Glass-passivated junctions
- 2500VAC isolation for "L," "J," "P," and "K"
- High commutating dv/dt
- High static dv/dt

Electrical Specifications

$I_T(RMS)$	Part Number					V_{DRM}	I_{GT}			I_{DRM}			V_{GT}	
	Isolated				Non-Isolated									
RMS On-State Current Conduction Angle of 360° (4)(16)						Repetitive Peak Blocking Voltage (1)	DC Gate Trigger Current in Specific Operating Quadrants $V_D=12VDC$ (3) (7) (15) (17)			Peak Off-State Current Gate Open $V_{DRM}=Max$ Rated Value (1) (18)			DC Gate Trigger Voltage $V_D=12VDC$ (2) (6) (15) (17)	
	THERMOTAB TO-220AB	TO-218AC (16)	TO-218X	FASTPAK TO-3 BASE	TO-220AB	Volts	mAmps			mAmps			Volts	
MAX	See "Package Dimensions" section for variations. (11)					MIN	MAX			MAX			MIN	MAX
6 Amps	Q2006LH4				Q2006RH4	200	35	35	35	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q4006LH4				Q4006RH4	400	35	35	35	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q5006LH4				Q5006RH4	500	35	35	35	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q6006LH4				Q6006RH4	600	35	35	35	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q7006LH4				Q7006RH4	700	35	35	35	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q8006LH4				Q8006RH4	800	35	35	35	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
8 Amps	Q2008LH4				Q2008RH4	200	35	35	35	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q4008LH4				Q4008RH4	400	35	35	35	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q5008LH4				Q5008RH4	500	35	35	35	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q6008LH4				Q6008RH4	600	35	35	35	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q7008LH4				Q7008RH4	700	35	35	35	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q8008LH4				Q8008RH4	800	35	35	35	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
10 Amps	Q2010LH5				Q2010RH5	200	50	50	50	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q4010LH5				Q4010RH5	400	50	50	50	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q5010LH5				Q5010RH5	500	50	50	50	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q6010LH5				Q6010RH5	600	50	50	50	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q7010LH5				Q7010RH5	700	50	50	50	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q8010LH5				Q8010RH5	800	50	50	50	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
12 Amps	Q2012LH5				Q2012RH5	200	50	50	50	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q4012LH5				Q4012RH5	400	50	50	50	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q5012LH5				Q5012RH5	500	50	50	50	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q6012LH5				Q6012RH5	600	50	50	50	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q7012LH5				Q7012RH5	700	50	50	50	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
	Q8012LH5				Q8012RH5	800	50	50	50	0.01	0.5	2.0	0.2	1.5
15 Amps	Q2015L6				Q2015R6	200	80	80	80	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q4015L6				Q4015R6	400	80	80	80	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q5015L6				Q5015R6	500	80	80	80	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q6015L6				Q6015R6	600	80	80	80	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q7015L6				Q7015R6	700	80	80	80	0.1	1.0	3.0	0.2	2.5
	Q8015L6				Q8015R6	800	80	80	80	0.1	1.0	3.0	0.2	2.5
25 Amps	Q2025L6	Q2025K6	Q2025J6	Q2025P	Q2025R6	200	80	80	80	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q4025L6	Q4025K6	Q4025J6	Q4025P	Q4025R6	400	80	80	80	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q5025L6	Q5025K6	Q5025J6	Q5025P	Q5025R6	500	80	80	80	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q6025L6	Q6025K6	Q6025J6	Q6025P	Q6025R6	600	80	80	80	.05	0.5	2.0	0.2	2.5
	Q7025L6	Q7025K6	Q7025J6	Q7025P	Q7025R6	700	80	80	80	0.1	1.0	3.0	0.2	2.5
	Q8025L6	Q8025K6	Q8025J6	Q8025P	Q8025R6	800	80	80	80	0.1	1.0	3.0	0.2	2.5
40 Amps		Q2040K7	Q2040J7	Q2040P		200	100	100	100	0.2	2.0	5.0	0.2	2.5
		Q4040K7	Q4040J7	Q4040P		400	100	100	100	0.2	2.0	5.0	0.2	2.5
		Q5040K7	Q5040J7	Q5040P		500	100	100	100	0.2	2.0	5.0	0.2	2.5
		Q6040K7	Q6040J7	Q6040P		600	100	100	100	0.2	2.0	5.0	0.2	2.5
		Q7040K7	Q7040J7	Q7040P		700	100	100	100	0.2	2.0	5.0	0.2	2.5
		Q8040K7	Q8040J7			800	100	100	100	0.2	2.0	5.0	0.2	2.5

See General Notes and Electrical Specification Notes on page 4-4.

Alternistor Triacs

V_{TM}	I_H	I_{GTM}	P_{GM}	$P_{G(AV)}$	I_{TSM}		dv/dt (c)	dv/dt		tgt	I^2t	di/dt
					Amps			Volts/ μ Sec				
Peak On-State Voltage at Max Rated RMS Current $T_C = 25^\circ C$ (1) (5)	Holding Current (DC) Gate Open (1) (8) (12)	Peak Gate Trigger Current (14)	Peak Gate Power Dissipation (14) $I_{GT} \leq I_{GTM}$	Average Gate Power Dissipation	Peak One Cycle Surge (9) (13)		Critical Rate-of-Rise of Commutation Voltage at Rated V_{DRM} and $I_{T(RMS)}$ Commutating di/dt = 0.54 Rated $I_{T(RMS)}$ /ms Gate Unenergized (1) (4) (13)	Critical Rate-of-Rise of Off-State Voltage at Rated V_{DRM} Gate Open (1)		Gate Controlled Turn-On Time $I_{GT} = 300mA$ 0.1 μs Rise Time (10)	RMS Surge (Non-Repetitive) On-State Current for period of 8.3 ms for Fusing	Maximum Rate-of-Change of On-State Current (19)
Volts	mAmps	Amps	Watts	Watts	60Hz	50Hz		$T_C = 100^\circ C$	$T_C = 125^\circ C$			
MAX	MAX						MIN	MIN		TYP		
1.6	35	1.6	18	0.5	65	60	20	750	600	4	17.5	70
1.6	35	1.6	18	0.5	65	60	20	575	450	4	17.5	70
1.6	35	1.6	18	0.5	65	60	20	500	400	4	17.5	70
1.6	35	1.6	18	0.5	65	60	20	425	350	4	17.5	70
1.6	35	1.6	18	0.5	65	60	20	375	300	4	17.5	70
1.6	35	1.6	18	0.5	65	60	20	300	250	4	17.5	70
1.6	35	2.0	20	0.5	85	80	25	750	600	4	30	70
1.6	35	2.0	20	0.5	85	80	25	575	450	4	30	70
1.6	35	2.0	20	0.5	85	80	25	500	400	4	30	70
1.6	35	2.0	20	0.5	85	80	25	425	350	4	30	70
1.6	35	2.0	20	0.5	85	80	25	375	300	4	30	70
1.6	35	2.0	20	0.5	85	80	25	300	250	4	30	70
1.6	50	2.0	20	0.5	110	100	30	1150	1000	4	50	70
1.6	50	2.0	20	0.5	110	100	30	1000	750	4	50	70
1.6	50	2.0	20	0.5	110	100	30	925	700	4	50	70
1.6	50	2.0	20	0.5	110	100	30	850	650	4	50	70
1.6	50	2.0	20	0.5	110	100	30	775	600	4	50	70
1.6	50	2.0	20	0.5	110	100	30	650	500	4	50	70
1.6	50	2.0	20	0.5	120	110	30	1150	1000	4	60	70
1.6	50	2.0	20	0.5	120	110	30	1000	750	4	60	70
1.6	50	2.0	20	0.5	120	110	30	925	700	4	60	70
1.6	50	2.0	20	0.5	120	110	30	850	650	4	60	70
1.6	50	2.0	20	0.5	120	110	30	775	600	4	60	70
1.6	50	2.0	20	0.5	120	110	30	650	500	4	60	70
1.6	70	2.0	20	0.5	200	167	30	875	600	5	166	100
1.6	70	2.0	20	0.5	200	167	30	875	600	5	166	100
1.6	70	2.0	20	0.5	200	167	30	800	520	5	166	100
1.6	70	2.0	20	0.5	200	167	30	800	520	5	166	100
1.6	70	2.0	20	0.5	200	167	30	700	475	5	166	100
1.6	70	2.0	20	0.5	200	167	30	700	475	5	166	100
1.8	100	2.0	20	0.5	250	208	30	875	600	5	259	100
1.8	100	2.0	20	0.5	250	208	30	875	600	5	259	100
1.8	100	2.0	20	0.5	250	208	30	800	520	5	259	100
1.8	100	2.0	20	0.5	250	208	30	800	520	5	259	100
1.8	100	2.0	20	0.5	250	208	30	700	475	5	259	100
1.8	100	2.0	20	0.5	250	208	30	700	475	5	259	100
1.8	120	4.0	40	0.8	400	335	50	1100	700	5	664	150
1.8	120	4.0	40	0.8	400	335	50	1100	700	5	664	150
1.8	120	4.0	40	0.8	400	335	50	1000	625	5	664	150
1.8	120	4.0	40	0.8	400	335	50	1000	625	5	664	150
1.8	120	4.0	40	0.8	400	335	50	900	575	5	664	150
1.8	120	4.0	40	0.8	400	335	50	900	575	5	664	150

See General Notes and Electrical Specification Notes on page 4-4.



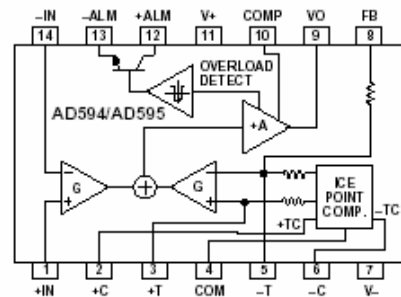
Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation

AD594/AD595

FEATURES

Pretrimmed for Type J (AD594) or Type K (AD595) Thermocouples
Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs
Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C
Built-In Ice Point Compensation
Wide Power Supply Range: +5 V to ±15 V
Low Power: <1 mW typical
Thermocouple Failure Alarm
Laser Wafer Trimmed to 1°C Calibration Accuracy
Setpoint Mode Operation
Self-Contained Celsius Thermometer Operation
High Impedance Differential Input
Side-Brazed DIP or Low Cost Cerdip

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



PRODUCT DESCRIPTION

The AD594/AD595 is a complete instrumentation amplifier and thermocouple cold junction compensator on a monolithic chip. It combines an ice point reference with a precalibrated amplifier to produce a high level (10 mV/°C) output directly from a thermocouple signal. Pin-strapping options allow it to be used as a linear amplifier-compensator or as a switched output setpoint controller using either fixed or remote setpoint control. It can be used to amplify its compensation voltage directly, thereby converting it to a stand-alone Celsius transducer with a low impedance voltage output.

The AD594/AD595 includes a thermocouple failure alarm that indicates if one or both thermocouple leads become open. The alarm output has a flexible format which includes TTL drive capability.

The AD594/AD595 can be powered from a single ended supply (including +5 V) and by including a negative supply, temperatures below 0°C can be measured. To minimize self-heating, an unloaded AD594/AD595 will typically operate with a total supply current 160 µA, but is also capable of delivering in excess of ±5 mA to a load.

The AD594 is precalibrated by laser wafer trimming to match the characteristic of type J (iron-constantan) thermocouples and the AD595 is laser trimmed for type K (chromel-alumel) inputs. The temperature transducer voltages and gain control resistors

are available at the package pins so that the circuit can be recalibrated for the thermocouple types by the addition of two or three resistors. These terminals also allow more precise calibration for both thermocouple and thermometer applications.

The AD594/AD595 is available in two performance grades. The C and the A versions have calibration accuracies of ±1°C and ±3°C, respectively. Both are designed to be used from 0°C to +50°C, and are available in 14-pin, hermetically sealed, side-brazed ceramic DIPs as well as low cost cerdip packages.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD594/AD595 provides cold junction compensation, amplification, and an output buffer in a single IC package.
2. Compensation, zero, and scale factor are all precalibrated by laser wafer trimming (LWT) of each IC chip.
3. Flexible pinout provides for operation as a setpoint controller or a stand-alone temperature transducer calibrated in degrees Celsius.
4. Operation at remote application sites is facilitated by low quiescent current and a wide supply voltage range +5 V to dual supplies spanning 30 V.
5. Differential input rejects common-mode noise voltage on the thermocouple leads.

AD594/AD595—SPECIFICATIONS (@ +25°C and $V_S = 5\text{ V}$, Type J (AD594), Type K (AD595) Thermocouple, unless otherwise noted)

Model	AD594A			AD594C			AD595A			AD595C			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
ABSOLUTE MAXIMUM RATING													
$+V_S$ to $-V_S$	36			36			36			36			Volts
Common-Mode Input Voltage	$-V_S - 0.15$	$+V_S$		$-V_S - 0.15$	$+V_S$		$-V_S - 0.15$	$+V_S$		$-V_S - 0.15$	$+V_S$		Volts
Differential Input Voltage	$-V_S$	$+V_S$		$-V_S$	$+V_S$		$-V_S$	$+V_S$		$-V_S$	$+V_S$		Volts
Alarm Voltages													
+ALM	$-V_S$	$-V_S + 36$		$-V_S$	$-V_S + 36$		$-V_S$	$-V_S + 36$		$-V_S$	$-V_S + 36$		Volts
-ALM	$-V_S$	$+V_S$		$-V_S$	$+V_S$		$-V_S$	$+V_S$		$-V_S$	$+V_S$		Volts
Operating Temperature Range	-55	+125		-55	+125		-55	+125		-55	+125		°C
Output Short Circuit to Common	Indefinite			Indefinite			Indefinite			Indefinite			
TEMPERATURE MEASUREMENT (Specified Temperature Range 0°C to +50°C)													
Calibration Error at +25°C ¹	±3			±1			±3			±1			°C
Stability vs. Temperature ²	±0.05			±0.025			±0.05			±0.025			°C/°C
Gain Error	±1.5			±0.75			±1.5			±0.75			%
Nominal Transfer Function	10			10			10			10			mV/°C
AMPLIFIER CHARACTERISTICS													
Closed Loop Gain ³	193.4			193.4			247.3			247.3			
Input Offset Voltage	(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C			μV
Input Bias Current	0.1			0.1			0.1			0.1			μA
Differential Input Range	-10	+50		-10	+50		-10	+50		-10	+50		mV
Common-Mode Range	$-V_S - 0.15$	$-V_S - 4$		$-V_S - 0.15$	$-V_S - 4$		$-V_S - 0.15$	$-V_S - 4$		$-V_S - 0.15$	$-V_S - 4$		Volts
Common-Mode Sensitivity – RTO	10			10			10			10			mV/V
Power Supply Sensitivity – RTO	10			10			10			10			mV/V
Output Voltage Range													
Dual Supply	$-V_S + 2.5$	$+V_S - 2$		$-V_S + 2.5$	$+V_S - 2$		$-V_S + 2.5$	$+V_S - 2$		$-V_S + 2.5$	$+V_S - 2$		Volts
Single Supply	0	$+V_S - 2$		0	$+V_S - 2$		0	$+V_S + 2$		0	$+V_S - 2$		Volts
Usable Output Current ⁴	±5			±5			±5			±5			mA
3 dB Bandwidth	15			15			15			15			kHz
ALARM CHARACTERISTICS													
$V_{CE(SAT)}$ at 2 mA	0.3			0.3			0.3			0.3			Volts
Leakage Current	±1			±1			±1			±1			μA max
Operating Voltage at -ALM	$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			Volts
Short Circuit Current	20			20			20			20			mA
POWER REQUIREMENTS													
Specified Performance	$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			$+V_S = 5, -V_S = 0$			Volts
Operating ⁵	$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			$+V_S$ to $-V_S \leq 30$			Volts
Quiescent Current (No Load)													
$+V_S$	160	300		160	300		160	300		160	300		μA
$-V_S$	100			100			100			100			μA
PACKAGE OPTION													
TO-116 (D-14)	AD594AD			AD594CD			AD595AD			AD595CD			
Cerdip (Q-14)	AD594AQ			AD594CQ			AD595AQ			AD595CQ			

NOTES

¹Calibrated for minimum error at +25°C using a thermocouple sensitivity of 51.7 μV/°C. Since a J type thermocouple deviates from this straight line approximation, the AD594 will normally read 3.1 mV when the measuring junction is at 0°C. The AD595 will similarly read 2.7 mV at 0°C.

²Defined as the slope of the line connecting the AD594/AD595 errors measured at 0°C and 50°C ambient temperature.

³Pin 8 shorted to Pin 9.

⁴Current Sink Capability in single supply configuration is limited to current drawn to ground through a 50 kΩ resistor at output voltages below 2.5 V.

⁵ $-V_S$ must not exceed -16.5 V.

Specifications shown in **boldface** are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels. All min and max specifications are guaranteed, although only those shown in **boldface** are tested on all production units. Specifications subject to change without notice.

INTERPRETING AD594/AD595 OUTPUT VOLTAGES

To achieve a temperature proportional output of 10 mV/°C and accurately compensate for the reference junction over the rated operating range of the circuit, the AD594/AD595 is gain trimmed to match the transfer characteristic of J and K type thermocouples at 25°C. For a type J output in this temperature range the TC is 51.70 μV/°C, while for a type K it is 40.44 μV/°C. The resulting gain for the AD594 is 193.4 (10 mV/°C divided by 51.7 μV/°C) and for the AD595 is 247.3 (10 mV/°C divided by 40.44 μV/°C). In addition, an absolute accuracy trim induces an input offset to the output amplifier characteristic of 16 μV for the AD594 and 11 μV for the AD595. This offset arises because the AD594/AD595 is trimmed for a 250 mV output while applying a 25°C thermocouple input.

Because a thermocouple output voltage is nonlinear with respect to temperature, and the AD594/AD595 linearly amplifies the

compensated signal, the following transfer functions should be used to determine the actual output voltages:

$$AD594 \text{ output} = (\text{Type J Voltage} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4$$

$$AD595 \text{ output} = (\text{Type K Voltage} + 11 \mu\text{V}) \times 247.3 \text{ or conversely:}$$

$$\text{Type J voltage} = (AD594 \text{ output}/193.4) - 16 \mu\text{V}$$

$$\text{Type K voltage} = (AD595 \text{ output}/247.3) - 11 \mu\text{V}$$

Table I lists the ideal AD594/AD595 output voltages as a function of Celsius temperature for type J and K ANSI standard thermocouples, with the package and reference junction at 25°C. As is normally the case, these outputs are subject to calibration, gain and temperature sensitivity errors. Output values for intermediate temperatures can be interpolated, or calculated using the output equations and ANSI thermocouple voltage tables referred to zero degrees Celsius. Due to a slight variation in alloy content between ANSI type J and DIN Fe-CuNi

SIEMENS

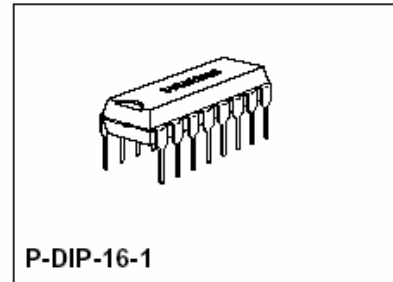
Phase Control IC

TCA 785

Bipolar IC

Features

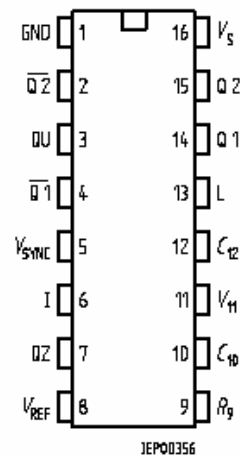
- Reliable recognition of zero passage
- Large application scope
- May be used as zero point switch
- LSL compatible
- Three-phase operation possible (3 ICs)
- Output current 250 mA
- Large ramp current range
- Wide temperature range



Type	Ordering Code	Package
TCA 785	Q67000-A2321	P-DIP-16-1

This phase control IC is intended to control thyristors, triacs, and transistors. The trigger pulses can be shifted within a phase angle between 0 ° and 180 °. Typical applications include converter circuits, AC controllers and three-phase current controllers.

This IC replaces the previous types TCA 780 and TCA 780 D.



Pin Configuration
(top view)

Pin Definitions and Functions

Pin	Symbol	Function
1	GND	Ground
2	$\overline{Q2}$	Output 2 inverted
3	Q U	Output U
4	$\overline{Q1}$	Output 1 inverted
5	V_{SYNC}	Synchronous voltage
6	I	Inhibit
7	Q Z	Output Z
8	V_{REF}	Stabilized voltage
9	R_9	Ramp resistance
10	C_{10}	Ramp capacitance
11	V_{11}	Control voltage
12	C_{12}	Pulse extension
13	L	Long pulse
14	Q 1	Output 1
15	Q 2	Output 2
16	V_s	Supply voltage

Functional Description

The synchronization signal is obtained via a high-ohmic resistance from the line voltage (voltage V_S). A zero voltage detector evaluates the zero passages and transfers them to the synchronization register.

This synchronization register controls a ramp generator, the capacitor C_{10} of which is charged by a constant current (determined by R_9). If the ramp voltage V_{10} exceeds the control voltage V_{11} (triggering angle φ), a signal is processed to the logic. Dependent on the magnitude of the control voltage V_{11} , the triggering angle φ can be shifted within a phase angle of 0° to 180° .

For every half wave, a positive pulse of approx. $30 \mu\text{s}$ duration appears at the outputs Q 1 and Q 2. The pulse duration can be prolonged up to 180° via a capacitor C_{12} . If pin 12 is connected to ground, pulses with a duration between φ and 180° will result.

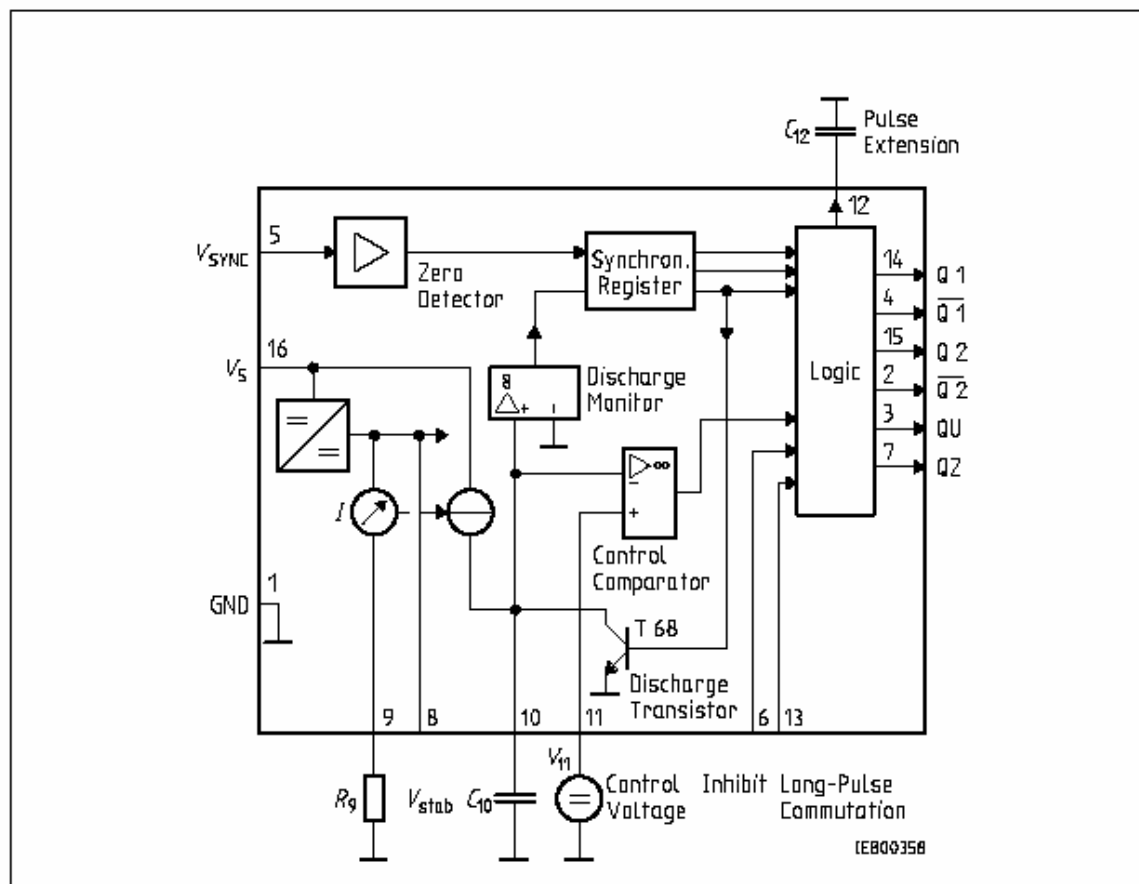
Outputs $\overline{Q1}$ and $\overline{Q2}$ supply the inverse signals of Q 1 and Q 2.

A signal of $\varphi + 180^\circ$ which can be used for controlling an external logic, is available at pin 3.

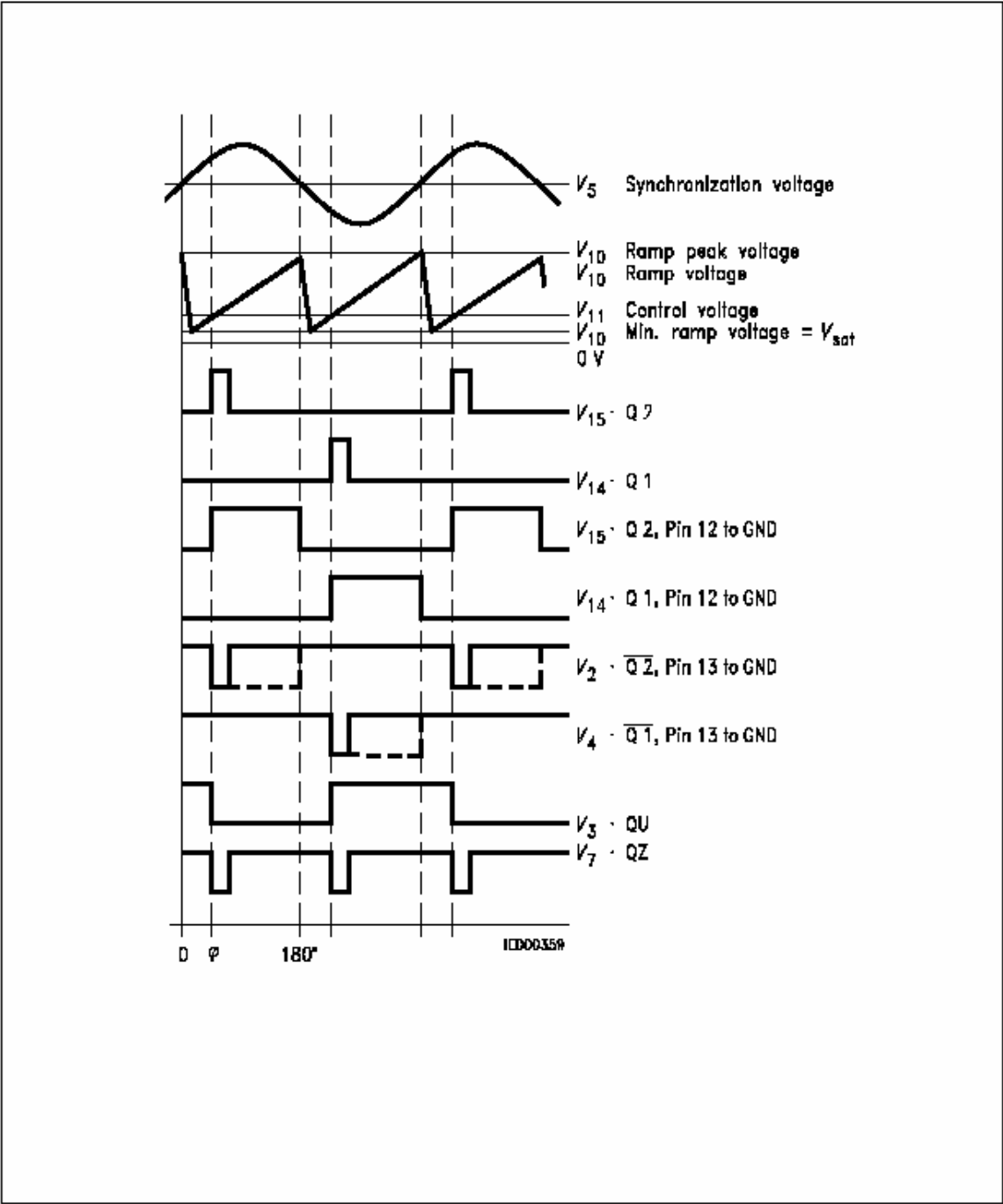
A signal which corresponds to the NOR link of Q 1 and Q 2 is available at output Q Z (pin 7).

The inhibit input can be used to disable outputs Q1, Q2 and $\overline{Q1}$, $\overline{Q2}$.

Pin 13 can be used to extend the outputs $\overline{Q1}$ and $\overline{Q2}$ to full pulse length ($180^\circ - \varphi$).



Block Diagram



Pulse Diagram

ANEXO F Pruebas

Distancias Horizontales y Verticales del Patrón de Calibración

MEDICION 1		MEDICION 2		MEDICION 3	
HORIZONTAL	VERTICAL	HORIZONTAL	VERTICAL	HORIZONTAL	VERTICAL
9.73	9.84	9.77	9.83	9.73	9.88
9.73	9.66	9.74	9.76	9.72	9.90
9.67	9.74	9.60	9.75	9.74	9.92
9.57	9.74	9.71	9.83	9.70	9.86
9.75	9.73	9.70	9.67	9.70	9.80
9.63	9.76	9.70	9.82	9.74	9.82
9.65	9.68	9.90	9.74	9.72	9.75
9.75	9.87	9.82	9.81	9.74	9.71
9.77	9.88	9.82	9.83	9.77	9.73
9.74	9.54	9.87	9.78	9.78	9.87
9.85	9.76	9.71	9.74	9.96	9.79
9.60	9.59	9.61	9.86	9.67	9.86
9.61	9.63	9.67	9.68	9.87	9.74
9.80	9.81	9.81	9.65	9.69	9.74
9.82	9.76	9.68	9.84	9.69	9.76
9.81	9.80	9.77	9.84	9.71	9.73
9.68	9.71	9.77	9.93	9.87	9.72
9.96	9.74	9.80	9.76	9.47	9.71
9.74	9.68	9.82	9.67	9.85	9.69
9.88	9.81	9.81	9.63	9.71	9.76
9.74	9.89	9.77	9.74	9.87	9.73
9.57	9.90	9.67	9.63	9.73	9.80
9.86	9.80	9.77	9.66	9.74	9.61
9.74	9.75	9.75	9.76	9.75	9.78

PROMEDIO DISTANCIA HORIZONTAL	9.74
PROMEDIO DISTANCIA VERTICAL	9.76