

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA AUTOMATICO PARA EL  
ENCENDIDO Y APAGADO DE UNA CALDERA INDUSTRIAL**

**MILTON JAVIER MUÑOZ NEIRA  
HECTOR ALFONSO PINTO HERRERA  
CESAR AUGUSTO PINZON**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA Y ELECTRONICA  
BUCARAMANGA  
2004**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA AUTOMATICO PARA EL  
ENCENDIDO Y APAGADO DE UNA CALDERA INDUSTRIAL**

**MILTON JAVIER MUÑOZ NEIRA  
HECTOR ALFONSO PINTO HERRERA  
CESAR AUGUSTO PINZON**

**Tesis de Grado como requisito para optar el título de:  
Ingeniero Electrónico**

**Director:  
Ing. OMAR GELVEZ**

**Codirector:  
M.P.E JAIME BARRERO PÉREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA Y ELECTRONICA  
BUCARAMANGA  
2004**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta alegría personal en primer lugar a DIOS fuente de la sabiduría, quien con su amor infinito y gran bondad me ha acompañado en todo momento alentándome a seguir caminando en medio del desierto de la vida, Muy especialmente dedico este peldaño mas en mi vida a mi madre del cielo MARIA, a mis Padres Alfonso y Benilda y Hermanos que me apoyaron en todo instante, a mis grandes amigos del alma, Edwin, Milton, Laura, Sandra, Josué, Pedro y a todas aquellas personas que ocupan un lugar muy especial en mi corazón, lo dedico a todas aquellas personas que en algún momento leerán esta tesis, invitándoles a vivir cada día como si fuera el primero y el ultimo de nuestra dulce existencia.....

**Héctor Alfonso Pinto H.**

A Ti, a quien ninguna palabra puede expresar y a quien toda palabra pronuncia, de quien solo puedo decir que eres y que me das la fuerza para ser. A ti, que me has permitido reír y llorar en el último ápice de la creación, en el aire que respiro y siento día a día. A ti, que te me has revelado en el amor, la comprensión y la donación de mis padres Jerónimo y Maria, en la amistad de mis hermanos, en el auxilio de mi tía, en la sinceridad de mis amigos, en la existencia de la comunidad, en el amor, la esperanza y el apoyo oportuno de Laura.

A Ti y a Ella, gratitud eterna, por manifestarte siempre en todo lo sencillo y en todo lo comprensible e incomprensible de la existencia.

**Milton J. Muñoz**

A todos

**Cesar Pinzó**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su agradecimiento al profesor Omar Armando Gelvez de la escuela de Ingeniería Mecánica, y al profesor Jaime Guillermo Barrero de la escuela de Ingeniería Eléctrica, por su apoyo incondicional al presente proyecto, sus oportunos consejos técnicos y su paciencia infinita.

A Jairo, Edwin, Javier y Fernando por su apoyo técnico.

A nuestros padres por su apoyo moral espiritual y económico.

A todos los que nos apoyaron, confiaron y esperaron en nosotros.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	1
1. CONTROL DE CALDERAS	3
1.1 INTRODUCCION	3
1.2 DEFINICION DE LA CALDERA Y DESCRIPCION DE SUS SISTEMAS ASOCIADOS	4
1.2.1 Definición	4
1.2.2 Sistema de Combustible	4
1.2.3 Sistema Aire de Combustión	9
1.2.4 Sistema de Vaporización de Agua	9
1.2.5 Sistema de Agua de Alimentación	9
1.2.6 Sistema de Control y Seguridad	10
1.3 CONTROL DEL PROCESO	11
1.3.1 Factores a Regular	11
1.3.2 Factores Perturbadores	11
1.3.3 Factores de Control	11
1.4 PROGRAMADOR DE ENCENDIDO - SISTEMA DE SEGURIDAD DE LLAMA	12
1.4.1 Tiempo de Purga	13
1.4.2 Seguridad de Encendido	14

1.4.3 Seguridad de Operación	14
1.5 CONTROL DE COMBUSTION	17
2. HARDWARE	21
2.1 HARDWARE PARA EL SECUENCIADOR DE ENCENDIDO	21
2.1.1 Tarjeta de Control	23
2.1.2 Tarjetas de Interfaces	31
2.1.3 Tarjeta para la comunicación serial	36
2.1.5 Ubicación del Equipo en el Panel de Encendido	38
2.2 HARDWARE PARA EL CONTROL DE PRESION	39
2.2.1 Microconvertidor 832	43
2.2.2 Interfaz Digital	44
2.2.3 Interfaz Análogica	45
2.3 FUENTES DE ALIMENTACION	48
2.3.1 Fuentes 5 VDC	48
2.3.2 Fuente de +-15 VDC	50
2.3.3 Fuente 24 VDC	50
3. SOFTWARE	52
3.1 SECUENCIA DE ENCENDIDO	54
3.2 RUTINAS DE ENCENDIDO	55
3.2.1 Inicio	55
3.2.2 Autodiagnóstico	56
3.2.3 Selección Automático Manual	58
3.2.4 Captura de datos del teclado	58

3.2.5 Contador Decremental	60
3.2.6 Transmisión Serial	63
3.2.7 Apagar	63
3.2.8 Rutina Automática – Manual	63
3.3 SECUENCIA DE CONTROL DE PRESION	64
3.3.1 Sistema a Controlar	64
3.3.2 Rutina de Arranque	67
3.3.3 Rutina Decimal	67
3.3.4 Introducción de las constantes PID	69
3.3.5 Rutina PID	69
3.3.6 Rutina Motor	72
3.4 ESCRITURA Y EJECUCION DE LOS PROGRAMAS	75
3.4.1 Ejecución en el <i>ATMEL</i> 89C52.	76
3.4.2 Ejecución en el Microconvertidor 832.	76
3.4.3 Depuradores y Emuladores	77
3.5 COMUNICACIÓN SERIAL CON EL PC USANDO LABVIEW	78

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Especificaciones del interruptor de presión	7
Tabla 2. Especificaciones de la servoválvula de control proporcional de gas	8
Tabla 3. Requerimientos del secuenciador de encendido.	22
Tabla 4. Puerto 0 - Bus de Datos LCD	26
Tabla 5: Puerto 1 – Salidas	26
Tabla 6. Puerto 2 – Entradas	27
Tabla 7. Puerto 3 – Señales de Control	27
Tabla 8. Sensor UV	35
Tabla 9. Pines 832	43
Tabla 10. Sensor de Presión	45
Tabla 11. Variador de Velocidad	46
Tabla 12. Potencia de los elementos del secuenciador de encendido	48
Tabla 13. Datos experimentales para el ajuste de los valores de presión	70
Tabla 14. Valores De Apertura del Motor Ventilador y la Servoválvula	72

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. Sistema de Combustible	6
Figura 2. Servoválvula de control proporcional de Gas.	8
Figura 3. Sistema de Control y Seguridad	10
Figura 4. Programador de Encendido	13
Figura 5. Diagrama Lógico y funcional de un Programador de Encendido	16
Figura 6. Diagrama de Bloques Control de Combustión	18
Figura 7. Parámetros Control de Combustión	18
Figura 8. Diagrama de bloques secuenciador de encendido	22
Figura 9. Tarjeta de Control	24
Figura 10. Lógica de interrupciones	29
Figura 11. Entrada	31
Figura 12. Salida	33
Figura 13. Circuito de Llama	35
Figura 14. Circuito RS232	37
Figura 15. Tarjeta de visualización	38
Figura 16. Diagrama Circuital Panel de Control	40
Figura 17. Diagrama Esquemático Panel de Control	41
Figura 18. Equipo programador de Encendido desarrollado	42

Figura 19. Interfaz digital con el 832	44
Figura 20. Sensor de Presión.	45
Figura 21. Circuitos acondicionadores.	47
Figura 22. Fuente de 5vdc	49
Figura 23. Fuente de +-15VDC	50
Figura 24. Fuente de +24VDC	51
Figura 25. Algoritmo de Encendido	53
Figura 26. Algoritmo de Inicio	57
Figura 27. Algoritmo Selección Manual Automático	59
Figura 28. Algoritmo Teclado	61
Figura 29. Algoritmo Contador	62
Figura 30. Esquema de Control	65
Figura 31. Diagrama de flujo rutina decimal	68
Figura 32. Algoritmo PID	73
Figura 33. mm.exe (programador ATMEL 89C52)	76
Figura 34. Configuración u832	77
Figura 35. Programador wsd.exe	77
Figura 36. Debugger51	78
Figura 37. Debugger Accutron	78
Figura 38. Algoritmo Comunicación Serial con el PC.	79

**TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA AUTOMATICO PARA EL ENCENDIDO Y APAGADO DE UNA CALDERA INDUSTRIAL\*.**

**AUTOR(ES):** MILTON J. MUÑOZ NEIRA  
HECTOR ALFONSO PINTO  
CESAR AUGUSTO PINZÓN\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Secuenciador de encendido, sensor de llama, control PID, relación aire – gas.

**DESCRIPCIÓN:**

El siguiente texto presenta el desarrollo de un equipo electrónico para realizar la secuencia de encendido de una caldera pirotubular y de un modulo anexo para regular la apertura de la válvula de combustible en dependencia de la presión de vapor sensada.

Ambos equipos fueron implementados por medio de microcontroladores, teniendo en cuenta que los sistemas sobre los cuales se trabajo pueden considerarse como sistemas de propósito específico.

Para el diseño del secuenciador de encendido se tuvo en cuenta las características eléctricas del sensor de llama y el ruido eléctrico presente en el lugar de operación del equipo. De igual manera se elaboro un control en lazo cerrado para la regular la apertura de la servoválvula de combustible, por medio de un algoritmo PID. El proyecto implicó también establecer la relación aire – gas necesaria para una combustión aceptable en la caldera.

El documento inicia haciendo una exposición teórica del proceso de encendido y seguridad que debe tener una caldera, así como de los factores mas importantes que deben tenerse en cuenta para realizar un control de combustión, el cual determina los pasos a seguir para regular la servoválvula de combustible y la velocidad del motor ventilador que inyecta el aire necesario para el proceso de combustión.

Posteriormente se expone el hardware elaborado y los algoritmos de las rutinas mas relevantes programadas en los microcontroladores. El texto finaliza con la exposición de las conclusiones obtenidas en el desarrollo de los equipos mencionados.

Palabras: 241

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicomecánicas  
Programa de Ingeniería Electrónica

Asesores: Mpe. Jaime Guillermo Barrero. Ing. Omar Gélvez

**TITLE: DESING AND CONSTRUCTION OF THE AUTHOMATIC SYSTEM FOR THE SWITCHING ON AND SWITCH OFF OF THE INDUSTRIAL CALDRON\*.**

**AUTHORS:** MILTON J. MUÑOZ N.  
HECTOR A. PINTO H  
CESAR AUGUSTO PINZON\*\*.

**KEY WORDS:** switching on sequence, algorithm PID, microcontrollers, air – gas relation.

**DESCRIPTION:**

The following text presents the development of the electronic equipment to realize the switching on sequence of the tubular fire boiler, and the annex module for regulating the opening of the combustibile valve in dependence of steam press.

Both equipments were implanted by microcontroller, considering that systems on which they worked can consider as specific purpose systems.

The design of the switching on programmer considered the electric characteristics of flame sensor and the electric noise which is present into the operation place of the equipment.

On the same way it was manufactured a feedback control in order to regulate the aperture of the servo valve of combustibile, by algorithm PID. This project implicated to establish the air – gas relation necessary for an acceptable combustion in the boiler too.

The beginning of this document is a theoretic exposition of the switch on and security process which a boiler should be included. The project consider the most important factors to realize a combustion control, which determinates the steps to follow for regulating the combustibile servo valve and the velocity of ventilator motor which inject the necessary air for the combustion process.

Afterwards the texts explain the elaborated hardware and the algorithms of the routines more outstanding programmed in the microcontrollers. This text will be finished with the exposition of the conclusions in the development of the mentioned equipment.

Words: 226

---

\*\* Physicals and mechanics Engineering School.  
Electronic Engineering program.  
Advisers: ING. Omar Gélvez Arocha, MPE. Jaime Guillermo Barrero.

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto consiste en el diseño e implementación de un equipo electrónico para la ejecución de la secuencia de encendido y control de seguridad de la caldera del laboratorio de plantas térmicas, de la escuela de Ingeniería Mecánica; y el desarrollo de un modulo anexo para la regulación de la presión de vapor de la misma.

Ambos equipos fueron implementados por medio de microcontroladores, teniendo en cuenta que los sistemas sobre los cuales se trabajo pueden considerarse como sistemas de propósito específico.

Para el diseño del programador de encendido se trabajo con el microcontrolador **Atmel** 89C52, y para el diseño del control de presión se trabajo con el microconvertidor 832 de **Analog Devices**. Es importante resaltar que los dos dispositivos poseen un hardware similar a los microcontroladores **Intel**, la cual ofrece una gran potencialidad en el procesamiento booleano y que el microconvertidor 832 además de estas características, cuenta con una circuiteria interna que facilita en gran medida el desarrollo de equipos que operen con señales de tipo analógico.

El programador de encendido se estructuro con una estrategia de control **on – off** realimentada, puesto que a cada instante realiza un sensado de la llama generada en la caldera. A su vez el controlador de presión se estructuro con una estrategia de control PID, que facilita que el usuario pueda ensayar diferentes constantes de control.

Aunque estos equipos pueden encontrarse en el mercado con características robustas de operación, los autores consideraron importante la construcción

de estos equipos, como un aporte necesario para continuar impulsando una cultura de diseño electrónico en nuestro medio, la cual esta siendo apoyada por la E3T y la escuela de Ingeniería Mecánica, en su proyección del desarrollo mecatrónico en la Universidad Industrial de Santander.

El objetivo era desarrollar estos instrumentos electrónicos con la capacidad de operar en un ambiente eléctricamente ruidoso, tal como el laboratorio de plantas térmicas. Para esto fue necesario no solo el desarrollo de un software adecuado para programar las secuencias de operación en los microcontroladores, sino también la implementación de los circuitos de interfaz digital y analógica idóneos para suprimir dichos ruidos.

Al respecto se ha conseguido que los equipos puedan operar y desarrollar sus secuencias de control en el ambiente previsto, a pesar de las restricciones tanto técnicas como económicas que limitaron el desarrollo de un equipo de mayor competitividad.

Se espera que esta tesis sirva para la implementación de otros equipos de control industrial mas avanzados, basados en la técnica de microcontroladores

# 1. CONTROL DE CALDERAS

## 1.1 INTRODUCCION

Una de las tareas más delicadas que se presenta en la manipulación de una caldera es su control, de forma especial cuando esta es empleada en procesos de generación de vapor, en los cuales una mala operación implica no solo detener la producción del mismo, sino también otros procesos ligados a este.

Los desequilibrios durante la operación de la caldera son de ocurrencia normal, especialmente entre la potencia de salida y la exigida por el proceso energético, con el cual se atiende la demanda de los equipos de una planta. Estos procesos de desajuste pueden equilibrarse mediante el control de la maquina, operada con todos sus instrumentos en modo automático.

Por esto, la confiabilidad en la operación de un generador de vapor esta en su sistema de combustión y todo su control asociado. Este control es un conjunto de dispositivos, encargados de manejar las demandas o reducciones de energía a la salida de la caldera.

Este capítulo expone en forma general los principios básicos que deben tenerse en cuenta en el proceso de control de una caldera, y de manera específica en el control de seguridad (secuencia de encendido) y en el control de combustión, el cual permite regular la presión de vapor de salida en una caldera.

Se iniciará con una breve descripción de la caldera del laboratorio de plantas térmicas de la escuela de ingeniería mecánica y de los sistemas que la

conforman, con los cuales estarán en contacto los equipos diseñados en este proyecto.

## **1.2 DEFINICION DE LA CALDERA Y DESCRIPCION DE SUS SISTEMAS ASOCIADOS**

**1.2.1 Definición.** Todo generador de vapor puede considerarse por extensión una caldera. En él un combustible en presencia de calor es quemado con el fin de elevar la temperatura de una cantidad específica de agua, con el objeto de producir vapor.

La caldera del laboratorio de plantas térmicas es de tipo pirotubular, en el cual el fuego circula por tubos rodeados de agua. Esta compuesta por diferentes sistemas, los cuales tienen cada uno una función específica, en procura de conseguir un adecuado funcionamiento de la maquina.

Los principales sistemas que conforman la caldera son:

- ❖ Sistema de Combustible
- ❖ Sistema Aire de Combustión
- ❖ Sistema de Vaporización de Agua
- ❖ Sistema de Alimentación de agua
- ❖ Sistema de Control y Seguridad

Todos estos sistemas ayudan a la consecución del objetivo fundamental que es la producción de vapor.

**1.2.2 Sistema de Combustible.** Este sistema cumple dos funciones principales. Una de ellas es llevar el gas desde la red hasta el quemador de

la caldera y proporcionar una llama piloto para el encendido del quemador\*. El sistema de combustible se puede dividir en dos subsistemas, los cuales son:

- ❖ Sistema Principal de combustible
- ❖ Sistema piloto

**Sistema Principal de combustible.** Su función principal es la de suministrar la cantidad de gas necesaria exigida por la caldera para la evaporación del agua. El sistema principal de combustible utiliza los siguientes dispositivos, (Véase la Figura 1).

- ❖ Regulador Manual
- ❖ Válvula Manual de cierre.
- ❖ Sensor/Interruptor **on/off** alta presión de gas, APG
- ❖ Válvula **on/off** de gas, VG.
- ❖ Servoválvula de control proporcional de gas
- ❖ Quemador

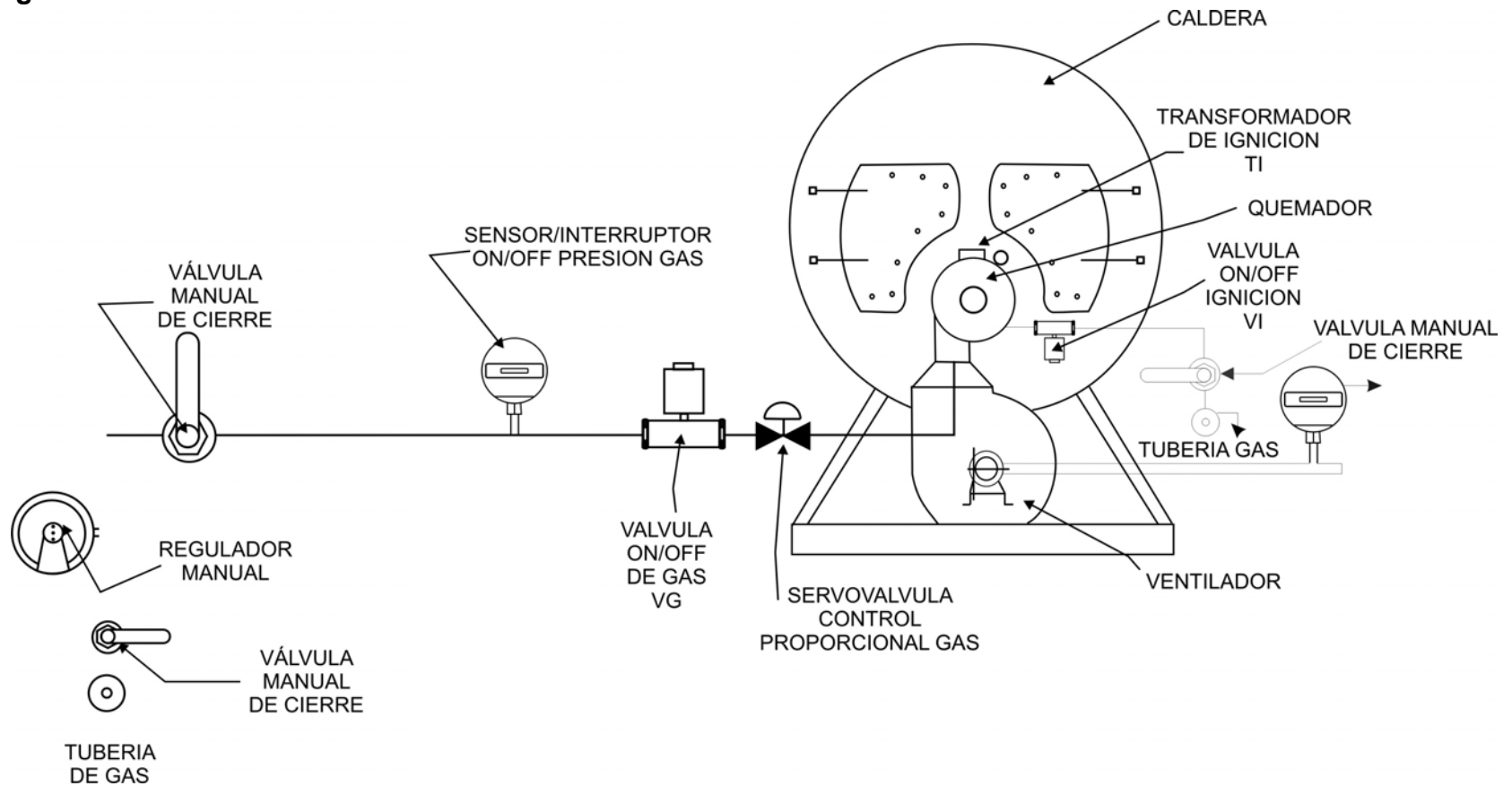
El flujo de gas que entra a una presión aproximada de 275.86 kpas es estrangulado en el regulador disminuyendo su presión a unos 1170.4 pas. Luego pasa por el interruptor de presión (APG), que abre el circuito de alimentación de la válvula **on/off** de gas (VG) si la presión del gas tiene un valor límite máximo, el cual es determinado por la capacidad de la caldera. El paso del gas al quemador es controlado por la válvula VG, que a su vez es manejada por el controlador o programador de encendido y por la servo válvula de control proporcional de gas, la cual debe ser operada por el equipo que regula la presión de vapor.

---

\* El Quemador, es la parte de la caldera donde se produce la combustión.

Se detallan a continuación las características del APG, de la válvula VG y de la servo válvula de control proporcional de gas, por estar relacionados estos instrumentos con los equipos desarrollados en este proyecto.  
(Véase la Figura 1)

**Figura 1. Sistema de Combustible.**



### **Sensor/Interruptor *on/off* alta presión de gas, APG**

Es un interruptor *on/off* de corriente eléctrica activado por presión. Puede utilizarse para control límite de presión (máxima y mínima), control de presión diferencial y corte de seguridad. Existen dos reguladores de presión conectados en el circuito eléctrico de la caldera, uno para el control de alta presión de gas (APG) y otro para el control de presión de aire de combustión (PAC).

Los interruptores de presión conectados al circuito de la caldera tienen las siguientes especificaciones.

**Tabla 1. Especificaciones del interruptor de presión**

<b>Modelo</b>	C 637B-1002-3
<b>Marca</b>	<i>Honeywell</i>
<b>Rango de Operación</b>	6650 a 93100 pascales
<b>Máxima presión de operación</b>	5 psi (34.5 Kpas)
<b>Máxima temperatura ambiente</b>	52°C (125 °F)
<b>Mínima temperatura ambiente</b>	0 °C (32 °F)

**Válvula *on/off* de gas VG.** La válvula principal de combustible (VG) es la encargada de controlar el paso del gas natural al quemador de la caldera. Esta constituida por dos partes principales: el cuerpo y el actuador.

Cuando es energizado el actuador de la válvula este se abre permitiendo el flujo de gas al quemador. En esta posición permanece la válvula hasta que por algún motivo se corte el suministro de energía, momento en el cual vuelve a su posición original, cortando inmediatamente el flujo de combustible.

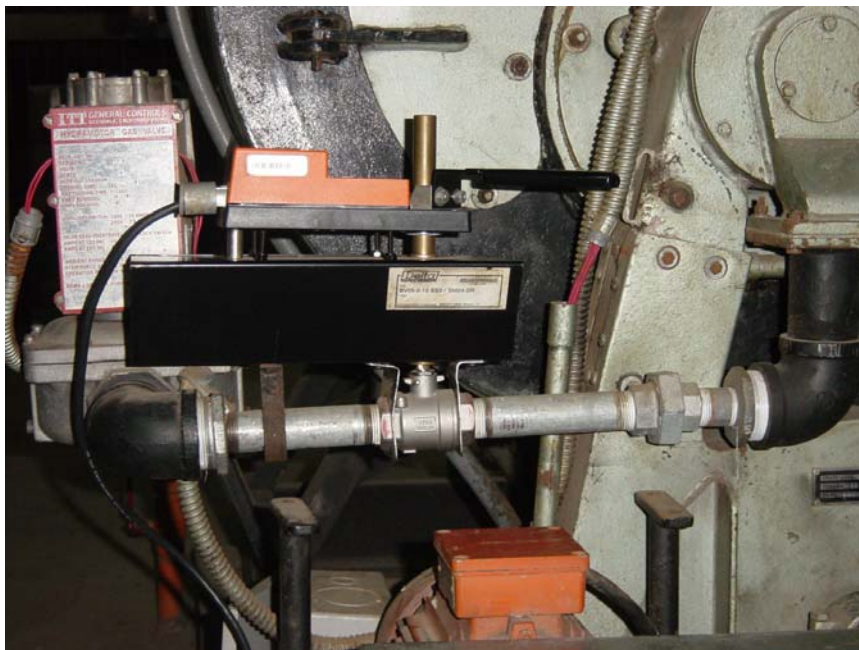
El accionamiento de la válvula principal de combustible es controlado por el programador de encendido, siguiendo una secuencia de control y seguridad.

**Servoválvula de control proporcional de gas.** La servovalvula, ver figura 2, permite regular el paso de combustible a la caldera, siendo importante su manejo para un adecuado control de combustión y por esto mismo para lograr estabilizar la presión de vapor. Sus especificaciones son:

**Tabla 2. Especificaciones de la servoválvula de control proporcional de gas**

Modelo	BV05-2-10 SS3 SM24-SR
Marca	<b><i>Delta control product</i></b>
Máxima presión de operación	917.241 kpas
Voltaje de operación	24 V AC-DC, 50-60 Hz
Voltaje de control	2 – 10 V DC
Máxima potencia disipada	3 W- 5VA
Tiempo de abertura ( <b><i>Running time</i></b> )	100-200 S, a máxima presión

**Figura 2. Servoválvula de control proporcional de Gas.**



**Sistema Piloto.** Proporciona y mantiene la llama piloto para el encendido del quemador de la caldera durante el periodo de ignición; esta conformado por la válvula de ignición (VI), el transformador eléctrico de ignición (TI). (Véase la Figura 1).

En el ciclo de encendido cuando el programador de encendido llega a la etapa de ignición, se energiza el transformador de ignición originando un arco eléctrico entre la punta del electrodo y la barra de chispa. Al instante se abre la válvula de ignición permitiendo el libre flujo de gas al mezclador donde se mezcla con aire del ventilador de tiro forzado, toda esta mezcla pasa a través del tubo ignitor y es encendida por el arco eléctrico. El aire secundario del mismo ventilador, se usa para la combustión y calidad de llama del piloto.

**1.2.3 Sistema Aire de Combustión.** El suministro de aire es indispensable para el funcionamiento de la caldera, no solo en la fase de combustión, sino a través de todo el proceso de funcionamiento. El aire es tomado directamente del medio ambiente por un ventilador, ver figura 1, y dirigido hacia el quemador por un ducto. Todo el flujo de aire es detectado por el control de presión de aire de combustión PAC el cual cierra el circuito del programador de encendido en el momento en que se inicia el trabajo del ventilador y empieza a circular aire.

**1.2.4 Sistema de Vaporización de Agua.** Este sistema esta compuesto por el cuerpo de la caldera, los tubos de fuego y el quemador. Requiere de una estructura resistente a la presión, recubierta de un material que no absorbe calor, para evitar al máximo la transferencia de calor.

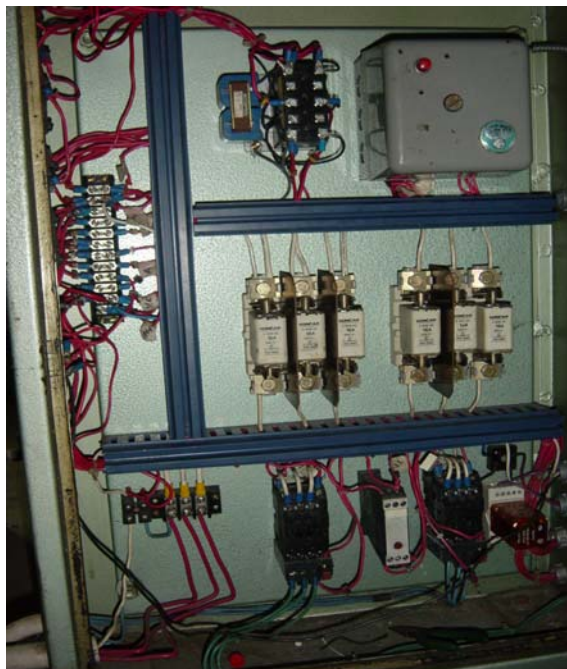
**1.2.5 Sistema de Alimentación de Agua.** Consiste en el sistema que le proporciona a la caldera el agua que ha de convertirse en vapor. Esta agua debe tratarse para eliminar las sales y otras sustancias disueltas que

provocan problemas de sedimentación, corrosión e incrustaciones en los tubos de la caldera.

**1.2.6 Sistema de Control y Seguridad.** Este sistema se encarga de hacer funcionar todos los sistemas anteriormente expuestos, proporcionando seguridad y protección tanto al equipo como al operario (Véase la Figura 3).

El principal mecanismo de control y seguridad de la caldera es el programador de encendido. En general un secuenciador o programador de encendido funciona según se explica en el numeral 3.1 del capítulo 3. Este dispositivo esta encargado de controlar todas las secuencias del proceso de encendido, operación, parada y seguridad de la caldera. En los capítulos siguientes se hará una exposición mas detallada del mismo, dado que el objetivo del proyecto expuesto en ese libro es el diseño de un secuenciador para la caldera en cuestión

**Figura 3. Sistema de Control y Seguridad**



### 1.3 CONTROL DEL PROCESO

Para tener un adecuado control de la operación de una caldera es necesario conocer los factores que determinan el estado de las variables asociadas con la misma; estos factores son principalmente: los flujos de gas, aire, agua y vapor; las presiones, temperaturas y el nivel de agua. Para comprender mejor relaciones entre estos factores y la manera como se afectan entre si, se pueden clasificar en tres categorías: factores a regular, factores de perturbación, factores de control y regulación.

**1.3.1 Factores a Regular.** El funcionamiento de la caldera es seguro mientras estos factores se mantengan en un determinado valor, los mas importantes son: presión de vapor a la salida de la caldera, exceso de aire / combustible y presión del combustible.

**1.3.2 Factores Perturbadores.** Se originan en la demanda de vapor que desequilibra la relación entre la energía que entra en forma de combustible y la que sale en forma de vapor; de esta manera se afectan los factores a regular, que actuarán unos sobre otros.

**1.3.3 Factores de Control.** Con estos se compensa la influencia de los factores perturbadores sobre los factores a regular; los principales a tener en cuenta son:

- ❖ Flujo de combustible: con el, se equilibra la variación de la presión de vapor.
  
- ❖ Flujo de Aire: con el se mantiene una relación aire / combustible adecuada.

- ❖ Flujo de Agua de Alimentación: debe ser igual al flujo de vapor que sale, más las pérdidas para mantener el nivel.
- ❖ Medios para control de temperatura de vapor: varían según el diseño y estructura de la caldera.

Estos factores están presentes en toda la secuencia de operación de la caldera, la cual es dirigida por el programador de encendido.

#### **1.4 PROGRAMADOR DE ENCENDIDO - SISTEMA DE SEGURIDAD DE LLAMA**

El Programador de encendido (Véase la Figura 4), de una caldera es el elemento principal de la programación de funciones de la caldera. Puede definirse como el conjunto de dispositivos que realiza una secuencia única de operaciones de arranque, parada y operación normal; esta secuencia que esta controlada por dispositivos electrónicos, debe evitar que se cometan errores humanos de operación.

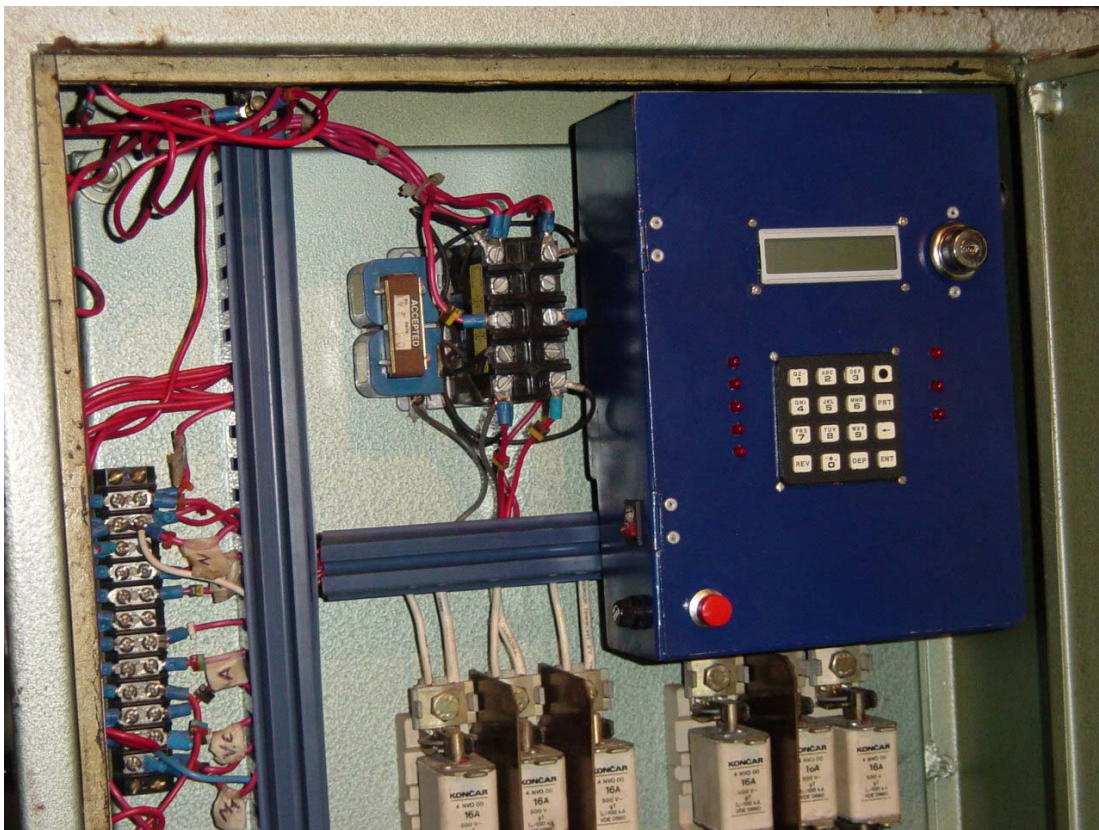
La secuencia involucra todas las actividades o variables que son de alto riesgo y por consiguiente influyen en la seguridad del equipo y del personal.

Las variables que involucran bloqueos a la secuencia de operación de la caldera pueden ser:

- ❖ Presión, y flujos de consumo mínimo y máximo, los cuales operan sobre el combustible.
- ❖ Aire y sus condiciones de operación de flujo y presión mínimos.

- ❖ Tiempo de purga, el cual debe garantizar la expulsión de los gases que se encuentran en la caldera antes de que se inicie el proceso de producción de vapor.
- ❖ Condiciones de operación de la llama en el quemador

**Figura 4. Programador de Encendido**



**1.4.1 Tiempo de Purga.** Un ciclo de purga o barrido de gases en la caldera, tiene como fin extraer por barrido con aire, todo tipo de gas que pueda estar en el horno y en otros lugares de la caldera, antes de iniciar un proceso de producción de vapor, evitando el riesgo de explosión durante la operación de encendido. Las acciones que ejecuta el programador se reportan vía despliegue electrónico.

La purga puede variar entre 30 segundos y 5 minutos dependiendo de la capacidad de producción de la caldera. El aire de barrido es producido por el ventilador que genera el aire para la combustión (Ventilador de tiro forzado de aire). Para la operación anterior es requisito indispensable que todas las válvulas de combustible estén cerradas; esta situación la controla el programador de encendido por medio de bloqueos o micro interruptores eléctricos colocados en cada una de las válvulas de suministro.

Al iniciar la purga, el programador debe haber verificado condiciones mínimas de flujo y presión de aire de combustión y que todas las válvulas de combustible estén cerradas; al final del ciclo el programador da aviso de terminación de la purga para iniciar el proceso de encendido. En este momento se asegura que no existan combustibles al interior de la caldera que puedan ocasionar una explosión durante el encendido.

**1.4.2 Seguridad de Encendido.** Las condiciones para la seguridad de encendido son:

- ❖ Todas las válvulas de control de gas deben estar cerradas
- ❖ Deben estar en operación uno o mas ventiladores
- ❖ Debe establecerse flujo de aire mínimo a través de la caldera.
- ❖ El nivel de agua en la caldera debe ser el adecuado

**1.4.3 Seguridad de Operación.** Las condiciones de seguridad supervisadas por el programador estando en operación la caldera y que provocan decisiones de disparo son:

- ❖ Parada de ventiladores
- ❖ Perdida de presión de gas

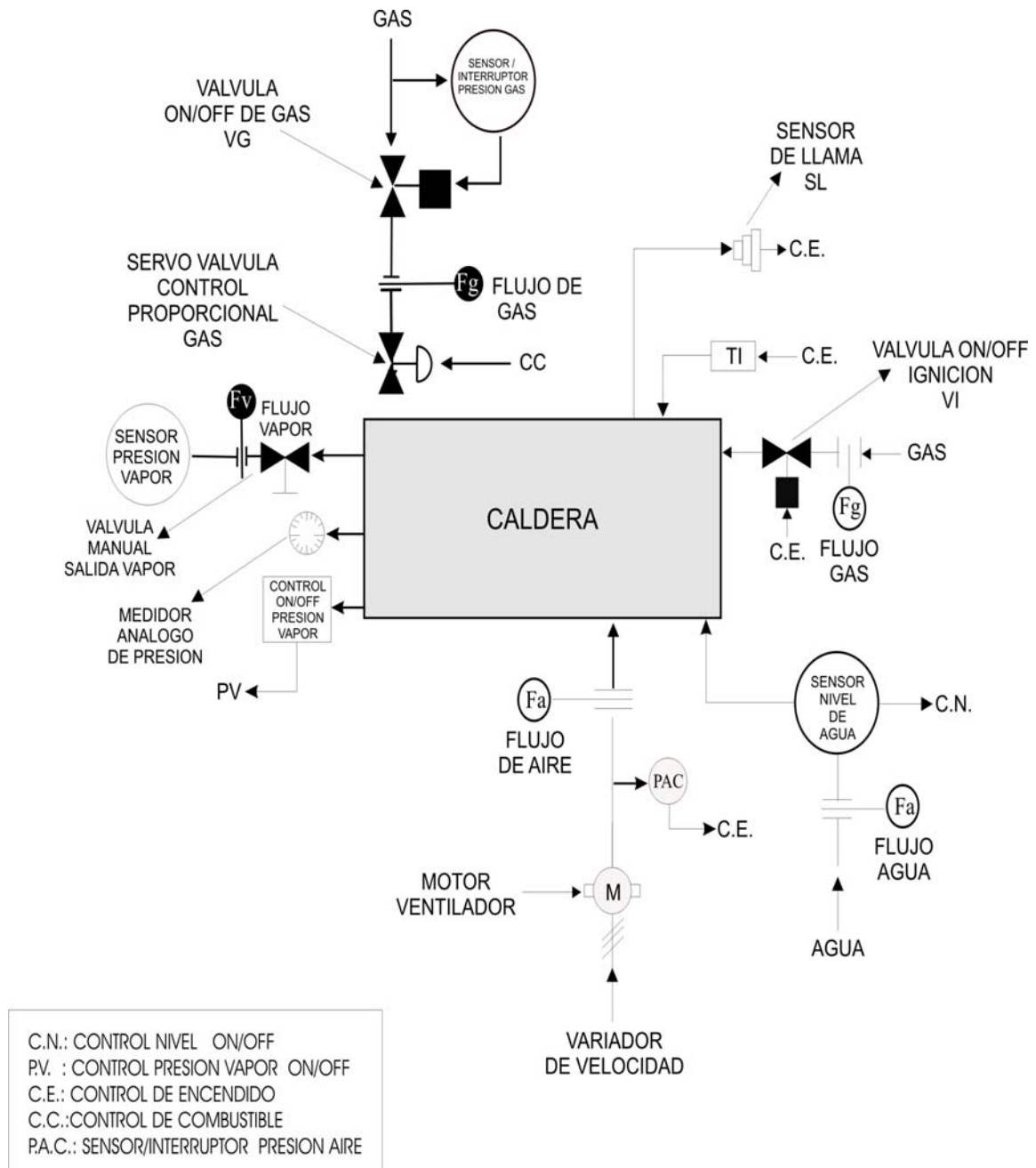
- ❖ Cantidad insuficiente de la mezcla aire/combustible en el encendido de la caldera
- ❖ Presión de vapor por encima del máximo permitido.
- ❖ Bajo nivel de agua (alarma o parada de la caldera)
- ❖ Alto nivel de agua (alarma o parada de la caldera)
- ❖ Operación manual.

La figura 5, es un diagrama lógico y funcional de un programador de encendido, que muestra además una rama del subsistema de gas, junto con las válvulas de corte y de control del mismo. La primera posee un sistema de realimentación que cierra la válvula de corte por sobrepasar los límites permisibles de la presión normal; la segunda esta regulada desde el panel de control y no tiene ninguna relación con el programador. En esta misma figura se muestra el sistema de control de aire como subsistema complementario de un programador de seguridad de encendido.

El programador es un supervisor de la operación de la caldera, ya que cuando los parámetros de operación no se han cumplido, este entra en acción; por ejemplo, si el gas combustible opera entre 20.689 kpas y 34.482 kpas, y el limite mínimo de presión se ha ajustado a 13.793 kpas, un interruptor de presión vigila de manera permanente el valor del mismo, de tal forma que si un quemador de la caldera opera por debajo de este ajuste mínimo, de inmediato el quemador se apagara, cortando el flujo de gas y en consecuencia la llama. Así mismo, si ocurre una subida de la presión del combustible por encima del punto de ajuste máximo, el sistema como lo muestra el diagrama de la figura 3, operara sobre el combustible, apagando la caldera. El subsistema que involucra el nivel de control de agua en la caldera, actúa sobre el programador cuando se detecta bajo nivel. Primero se alerta al operario sobre la condición y en caso de que el nivel siga bajando este se reportara al programador, el cual actuará cerrando la válvula principal

de combustible, apagando la caldera. Cuando el programador de encendido verifica que las condiciones para encender la caldera son adecuadas (suficiente flujo de gas y de aire, nivel de agua adecuado, purga de gases ejecutada, presión de vapor por abajo del máximo permitido) se enciende la caldera e inicia la combustión.

**Figura 5. Diagrama lógico y funcional de un programador de encendido**



## 1.5 CONTROL DE COMBUSTION

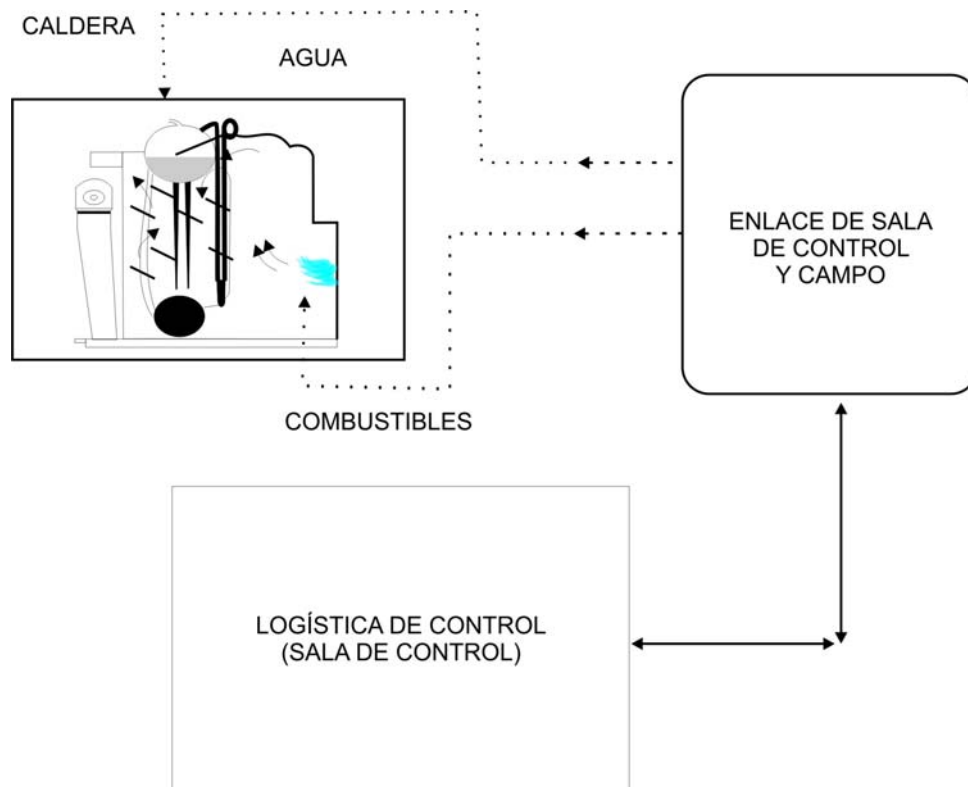
Para tener una combustión adecuada es necesario considerar los siguientes parámetros:

- ❖ Conocimiento operacional de cada uno de los subsistemas que conforman el control de combustión.
- ❖ Conocimiento del combustible usado por la caldera.
- ❖ Asistencia operacional rutinaria.

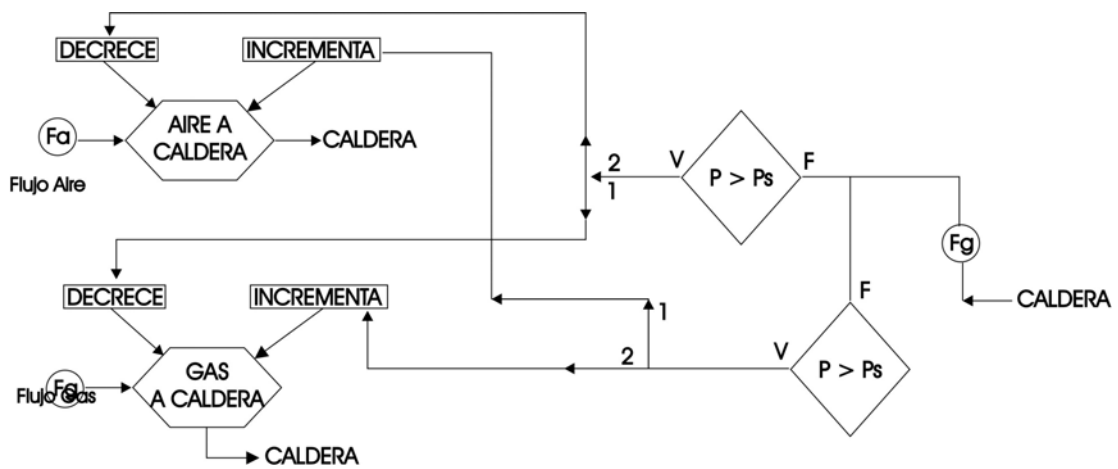
La Figura 6 muestra el control de combustión por medio de un diagrama de bloques; el bloque inferior izquierdo implica las conexiones reales entre los diferentes controladores y su interacción para lograr la seguridad básica de la combustión. En el bloque superior izquierdo se representa la caldera y los puntos donde se encuentran ubicados los parámetros a controlar: el agua y la mezcla aire – combustible; el bloque de la derecha es un diagrama funcional representativo de los instrumentos de campo, que son ajustados por las señales de control desde la sala de mando.

Los parámetros que intervienen en el proceso de combustión de la caldera se detallan en la Figura 7. Estos están relacionados con la regulación de la entrada de energía (combustibles y aire) para mantener el suministro continuo de vapor de la caldera al proceso, a condiciones de presión constante, y la eliminación de los riesgos de explosión procurando que los factores perturbadores estén dentro de los rangos de control. Las variables del proceso, marcadas como flujo, son el aire y el combustible. Cada uno de los bloques lógicos trabajara hacia las ramas de las variables de proceso.

**Figura 6. Diagrama de Bloques Control de Combustión.**



**Figura 7. Parámetros Control de Combustión**



Este diagrama lógico de control de combustión se explica de la siguiente manera:

- ❖ Si la presión de vapor  $P$  en el tubo de salida de vapor, es mayor que la presión nominal  $PS$ , definida en el controlador maestro de la caldera, hay exceso de energía: por lo tanto la decisión es  $V(A)$  y ocurre 1º; 1º es la secuencia de reducción del combustible, la cual opera sobre el gas; luego ocurre 2º, que es la reducción del aire de combustión,
- ❖ Inversamente, si la presión  $P$  del tubo de vapor de salida de la caldera, es menor que  $PS$ , la caldera esta perdiendo presión y por lo tanto el sistema intrínsecamente debe suministrar energía. En este caso la inferencia se hace sobre  $B$ . La señal va hacia el sistema de aire, donde primero se realiza el incremento 1º, el cual representa un aumento en el flujo de aire, y posteriormente pasa a 2º, donde se hace incremento sobre el combustible
- ❖ Existe un control central en donde se fija un **set point** ( $PS$ ) o valor prefijado, en el cual debe mantenerse siempre el nivel de vapor.

El sistema integral esta constituido por controladores neumáticos o electrónicos y medidores de flujo, que deben seguir un protocolo para las pruebas y poder así diagnosticar sus fallas, especialmente si el control de combustión esta basado en tecnología de microprocesadores.

En síntesis, el sistema de monitoreo de combustión en estado automático chequea la variable de control básico, que es la presión de salida de vapor de la caldera. Si la variable tiene un desajuste respecto al set point, el sistema de monitoreo en automático toma los correctivos necesarios,

aplicando la logística de seguridad para incrementar la energía; esto quiere decir que si la presión del sistema se incrementa por encima del punto de referencia, el control actúa reduciendo la energía de entrada a la caldera, lo cual hace que reduzca combustible en los quemadores, para posteriormente reducir el aire de combustión. Así el control se reajusta por pasos periódicos hasta igualar el set point en decrecimiento y normalizar la variable afectada.

## 2. HARDWARE

Un secuenciador para el encendido de una caldera puede considerarse un microsistema específico, idóneo para ser implementado por medio de un microcontrolador. Por esta razón se escogió el **Atmel 89C52** como base para el desarrollo de esta etapa del proyecto.

Para la realización del control PID de presión se mantuvo la misma filosofía de diseño y se trabajó con un **microconvertidor 832** de **analog devices**, el cual posee una arquitectura similar al **Atmel 89C52** (arquitectura **Intel 8051**) además de 8 canales de conversión analógica digital y dos de conversión digital analógica, aptos para la lectura de presión y la regulación de la válvula de combustible.

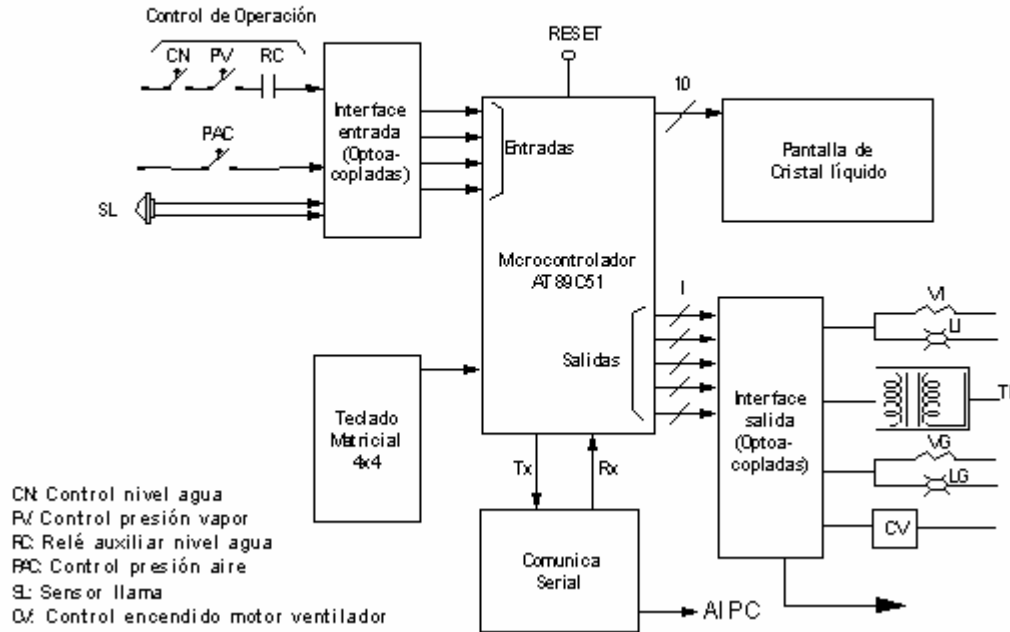
En este capítulo se explicará primero el **hardware** diseñado para el equipo que secuencia el encendido, mantiene prendida y controla la seguridad de la caldera. Posteriormente se expondrá el **hardware** desarrollado para el equipo que realiza el algoritmo PID, con el objetivo de regular la presión.

El capítulo termina con la descripción de los circuitos implementados como fuentes de las distintas tarjetas.

### 2.1 HARDWARE PARA EL SECUENCIADOR DE ENCENDIDO

Los requerimientos para el hardware del secuenciador de encendido se deducen del diagrama de bloques mostrado en la figura 8 y se especifican en la tabla 3.

**Figura 8. Diagrama de bloques secuenciador de encendido**



**Tabla 3. Requerimientos del secuenciador de encendido.**

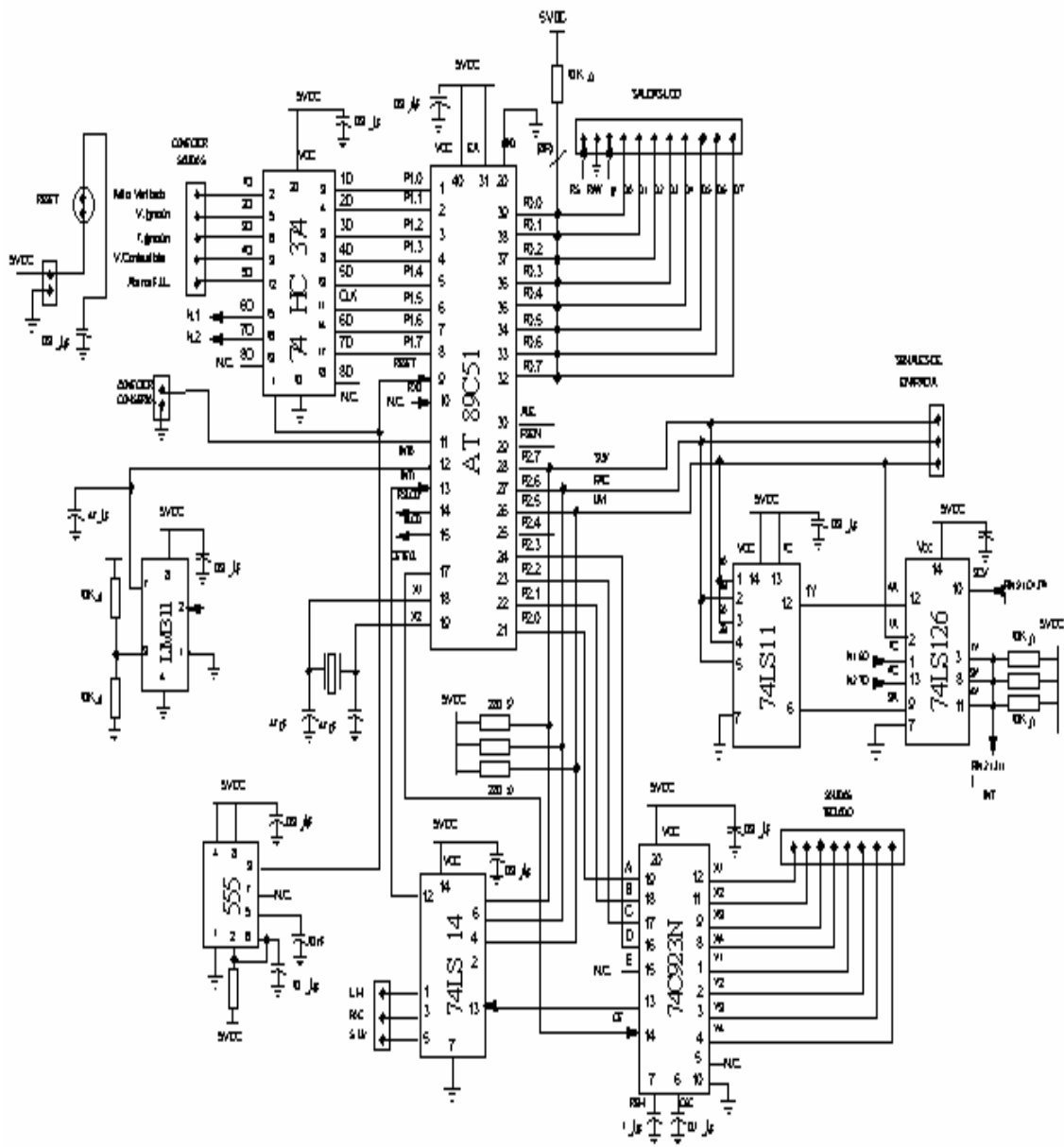
<b>Entradas</b> ( Tres de tipo ON/OFF)	Línea de mando, PAC y sensor de UV
<b>Salidas</b> (Cinco de tipo ON/OFF)	Activan: Motor ventilador, válvula de ignición, transformador de ignición, válvula de combustible y lámpara de alarma.
<b>Teclado Matricial</b>	Permite insertar tiempos de prepurga e ignición, así como seleccionar el modo de operación.
<b>Pantalla LCD</b>	Visualiza el estado de operación del secuenciador.
<b>Comunicación Serial</b>	Reporta a un computador el estado de operación del secuenciador.
<b>Interrupción</b>	Por falla en Línea de mando, PAC y sensor UV (ULTRAVIOLETA).
<b>Interfaces de entrada y de salida</b>	Adaptan las señales del microcontrolador para operar los instrumentos asociados al secuenciador.

Teniendo en cuenta la tabla anterior se organizó el hardware del secuenciador en cuatro tarjetas: tarjeta de control, tarjeta de interfaces, tarjeta de comunicación serial y tarjeta de visualización.

**2.1.1 Tarjeta de Control.** El dispositivo que gobierna esta tarjeta ( y también todo el equipo) es el microcontrolador **Atmel 89C52**. A él llegan, luego de ser adaptadas, las señales de entrada del sistema, la señal de interrupción y los datos del teclado matricial. Así mismo salen las señales que controlan los dispositivos que ejecutan la secuencia de encendido en la caldera, los datos para la pantalla LCD y para la comunicación serial.

La figura 9, muestra el circuito diseñado para la tarjeta de control. Los dispositivos y circuitos mas relevantes de esta tarjeta son descritos a continuación:

Figura 9. Tarjeta de Control



**Microcontrolador Atmel 89C52.** Posee 32 líneas de entrada – salida que se ajustan de forma perfecta a las necesidades del secuenciador desarrollado. Sus principales características son las siguientes:

- ❖ Microcomputador **CMOS** de 8-*bits*.
- ❖ Bajo consumo de potencia (125 mW) y alto desempeño.
- ❖ **8Kbytes** de memoria **flash** de lectura reprogramable, y 256x8 bits de **RAM** interna.
- ❖ Operación estática de 0Hz a 24MHz.
- ❖ 32 líneas de I/O programables.
- ❖ Dos temporizadores / contadores de 16 bits
- ❖ Seis fuentes de interrupción.
- ❖ Canal serial programable.

Al puerto 0 se conecto una pantalla de cristal líquido (**LCD**), mediante la cual el operario puede seguir el desarrollo de la secuencia de encendido de la caldera. Se dispuso también un teclado matricial, conectado al puerto 2 por intermedio del decodificador de teclado 74C923. El operario podrá seleccionar la opción manual por medio del teclado, y una vez ubicado en ésta le es posible programar los tiempos de prepurga y de ignición, apagado total o funcionamiento en cascada.

Las tablas 4, 5, 6 y 7 especifican las funciones de cada **pin** de salida del microcontrolador.

**Tabla 4. Puerto 0 - Bus de Datos LCD**

P0.0	<b>D0</b> (LCD)
P0.1	<b>D1</b> (LCD)
P0.2	<b>D2</b> (LCD)
P0.3	<b>D3</b> (LCD)
P0.4	<b>D4</b> (LCD)
P0.5	<b>D5</b> (LCD)
P0.6	<b>D6</b> (LCD)
P0.7	<b>D7</b> (LCD)

**Tabla 5. Puerto 1 - Salidas**

P1.0	Conectado a un optoacoplador para activar el <b>motor ventilador</b> .
P1.1	Conectado a un optoacoplador para activar la <b>válvula de ignición</b> .
P1.2	Conectado a un optoacoplador para activar el <b>transformador de ignición</b> .
P1.3	Conectado a un optoacoplador para activar la <b>válvula de combustible</b> .
P1.4	Conectado a un optoacoplador para activar <b>alarma por falla en la llama</b> .
P1.5	<b>Reloj para el Latch: 74LS374</b>
P1.6	Habilitar Nivel de interrupción 1
P1.7	Habilitar Nivel de interrupción 2

**Tabla 6. Puerto 2 – Entradas**

P2.0	<b>A(74C923)</b> : Decodificador del teclado.
P2.1	<b>B(74C923)</b> : Decodificador del teclado.
P2.2	<b>C(74C923)</b> : Decodificador del teclado.
P2.3	<b>D(74C923)</b> : Decodificador del teclado.
P2.4	<b>E(74C923)</b> : Decodificador del teclado.(pin disponible)
P2.5	Conectado a un optoacoplador para recibir la señal de la <b>línea de mando</b> .
P2.6	Conectado a un optoacoplador para recibir la señal del <b>PAC</b> .
P2.7	Conectado a un optoacoplador para recibir la señal del <b>sensor de UV</b> .

**Tabla 7. Puerto 3 – Señales de Control**

P3.0	<b>RXD</b> , recepción puerto serie.
P3.1	<b>TXD</b> , recepción puerto serie.
P3.2	<b>INT0</b> , falla en llama, en PAC o caída de línea de mando.
P3.3	<b>INT1</b> , conectado al <b>DA del 74C923</b> para <b>saber cuando se oprimió una tecla</b> .
P3.4	<b>Pin RS LCD</b>
P3.5	<b>Pin E LCD</b>
P3.6	Disponible
P3.7	<b>Pin OE Teclado</b> .

**Modulo LCD (*liquid cristal display*).** Es un modulo de cristal liquido transflexivo tipo **STN**, con luz posterior amarilla verdosa, capacidad de visualización de 16 caracteres x 2 líneas, carácter de matriz de punto de 5x7 y cursor. Otras características son:

- ❖ Interfasable con microprocesadores de 4 o 8 bits.
- ❖ Despliega mas de 226 caracteres y símbolos especiales
- ❖ Abundante **set** de instrucciones
- ❖ Compacto, liviano y de fácil ensamble
- ❖ Opera con una fuente de 5v d.c y bajo consumo de potencia (15mW).

**Circuito Integrado 74C923.** Consiste en un decodificador *CMOS* para teclados de hasta 20 interruptores. Permite eliminar rebotes conectando un condensador a su **pin** KBM, de un valor diez veces mayor al condensador conectado a su oscilador interno (**pin** OSC). Cuenta además con salidas de tercer estado compatibles con **TTL** y bajo consumo de energía (700mW).

El **pin** OE (**output enable**) encargado de habilitar la salida del decodificador, esta conectado al **pin** P3.7 del microcontrolador, y el **pin** DA(**data available**) encargado de dar señal de interrupción al microcontrolador cuando se teclaea cualquier interruptor, esta conectado a un inversor **schmitt trigger** y de este al **pin** P3.3 (**INT1**) del microcontrolador, para permitir una interrupción por nivel bajo.

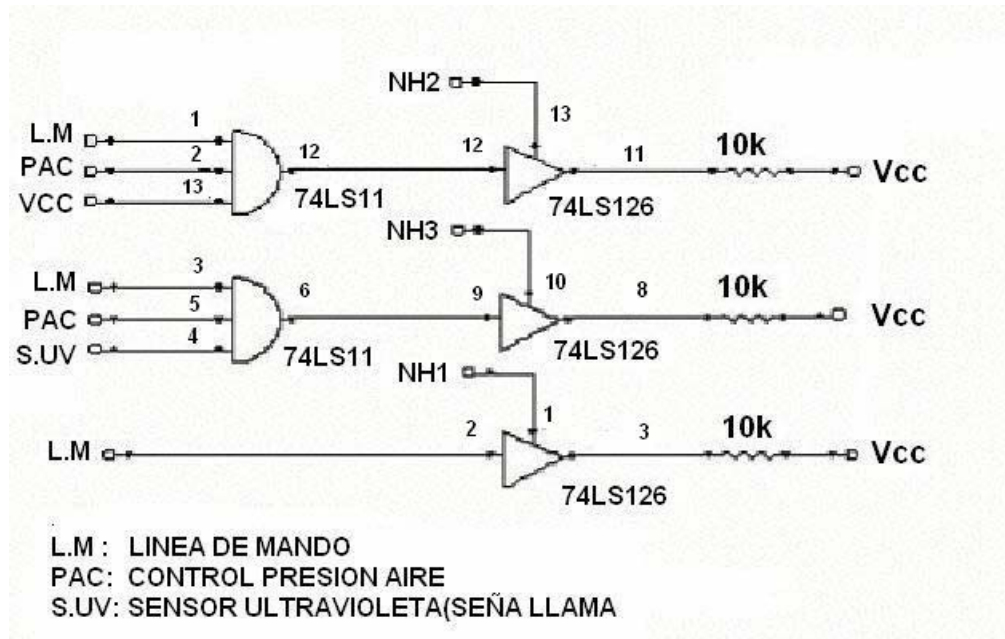
El dispositivo proporciona la lógica necesaria para decodificar las señales que envían todos los interruptores que conforman el teclado matricial y mandarlas al bus de datos del microcontrolador, en forma de una palabra binaria de 5 **bits** a través de las salidas A, B, C, D y E del 74C923. Dado

que el teclado utilizado para el secuenciador es de solo dieciséis interruptores, se han interfazado únicamente las salidas A,B,C,D.

**Lógica de Interrupciones.** En la figura 10 se describe el diagrama eléctrico de la lógica que controla las interrupciones del sistema. Se manejan tres niveles de interrupción:

- ❖ Nivel uno: habilita interrupción solo por caída en línea de mando
- ❖ Nivel dos: habilita interrupción por caída en línea de mando y ventilador
- ❖ Nivel tres: habilita interrupción cuando se habilitan los niveles uno y dos y se presenta caída de fallo por llama.

**Figura 10. Lógica de interrupciones**



La lógica de interrupciones permite por tanto, detectar fallos durante el encendido (línea de mando baja), la prepurga e ignición (motor ventilador apagado o aire insuficiente) y operación normal de la caldera (falla en línea de mando, motor o ausencia de llama)

El comparador LM311 estabiliza la señal de interrupción y junto con el capacitor de 47uf filtra ruido eléctrico y acopla la impedancia de entrada al **pin** INT0 del microcontrolador, logrando que el cero lógico en la línea que pide interrupción sea confiable.

La presencia de llama al inicio del encendido de la caldera es detectada por encuesta y no por **hardware**; sin embargo este hecho también ocasiona interrupción de la secuencia.

**Lógica de Reset.** La figura 9 puede apreciarse el circuito que da **reset** al microcontrolador inmediatamente se energiza la tarjeta de control. El diseño consiste en un monoestable, basado en un 555, con un ancho de pulso de 0,11 milisegundos. Esta señal también es aplicada al **pin** 1 del 74HC374 (**output enable**)

Se hizo necesario implementar este circuito pues se detecto que debía darse un reset inicial al microcontrolador, para que este comenzara sin sobresaltos sus rutinas. Pero dado que en este estado los puertos del microcontrolador se encuentran en un nivel alto (lo cual implica tener activas todas las salidas: motor, válvulas, transformador de ignición) fue preciso enviar también esta señal al OE del integrado 74HC374, el cual memoriza todas las salidas, para que durante el reset estas se encuentren inhabilitadas y en cero lógico. Una vez terminado el reset, el inicio de la rutina en el microcontrolador pone las salidas en “cero” y las activa posteriormente según la secuencia de operación.

**Otras características.** Otras características de la tarjeta de control son:

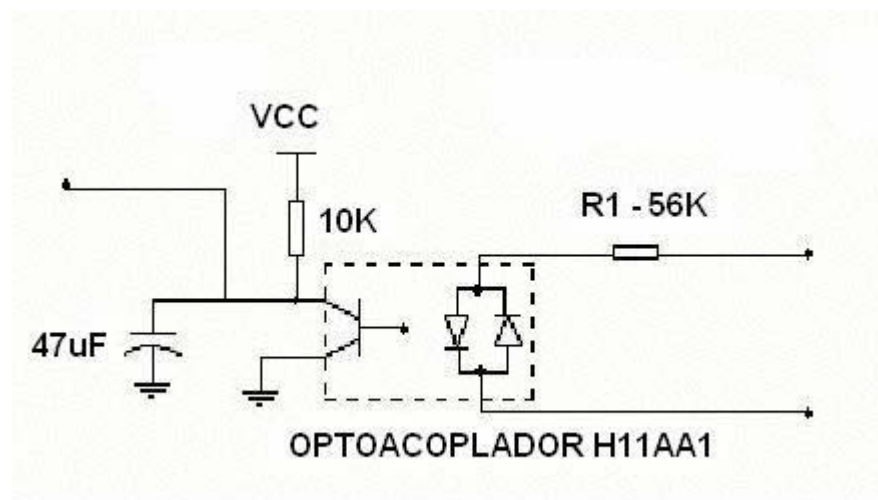
- ❖ Los condensadores de 100nf (de tantalio) entre los pines de alimentación de todos los integrados, y el condensador de 22uf en la entrada de alimentación de la tarjeta, puestos para suprimir ruido eléctrico.

- ❖ El integrado 74HC374 (*latches* tipo D) que estabiliza las salidas del microcontrolador.
- ❖ El integrado 74LS14 (inversores *Schmitt trigger*) que acopla la impedancia de salida de los circuitos que captan las señales de entrada, a la impedancia de los pines del puerto P2.

**2.1.2 Tarjetas de Interfaces.** La tarjeta de interfaces posee tres diseños básicos: circuito de entrada, circuito de salida y circuito de llama, los cuales se exponen a continuación.

**Circuito de entrada.** Durante la secuencia de encendido deben verificarse tres entradas: Línea de mando (autorización de encendido), sensor de presión de aire (verifica que el motor ventilador esta en correcto funcionamiento) y sensor de llama. Para las dos primeras se diseño este circuito, teniendo en cuenta que son señales de 120 voltios a.c - 60 hertz y que el microcontrolador solo reconoce entradas de 5 o 0 voltios d.c

**Figura 11. Entrada**



El circuito de la figura 11 es una lógica inversa, que pone el **pin** cinco del optoacoplador a 5 voltios d.c sin no hay señal y a 0 voltios d.c si la detecta. El inversor ***schmitt trigger*** (puesto en la tarjeta de control) invierte esta lógica, realiza la interfaz con el microcontrolador y alimenta el circuito de visualización.

Algunos cálculos para el circuito de entrada se especifican a continuación:

La máxima corriente de entrada al optoacoplador son 50mA y la mínima 2mA. Estos valores limitan la resistencia R1 a :

$$R1(\max) = 155/0.002 = 77500\Omega \qquad R1(\min) = 155/0.05 = 3100\Omega$$

De los cuales se escogió el valor de 56K $\Omega$ . También es importante detallar que esta resistencia al momento de capturar la señal tiene un voltaje de:

$$V(R) = 155,5^* - 0,7 = 154,8 \text{ VAC}$$

Igual al voltaje AC de línea menos el voltaje de activación del diodo, y por tanto su disipación de potencia es:

$$P(R) = (154,8)^2 / 53K\Omega = 0,45 \text{ W}$$

Teniendo en cuenta esto se asigno una resistencia de 2W

Otro detalle del circuito es el condensador de 47uf, el cual filtra el ruido de 60 **hertz** proveniente de la señal de entrada.

---

\* Este valor resulta de multiplicar el valor rms de la red (110 v a.c) por raíz de dos.

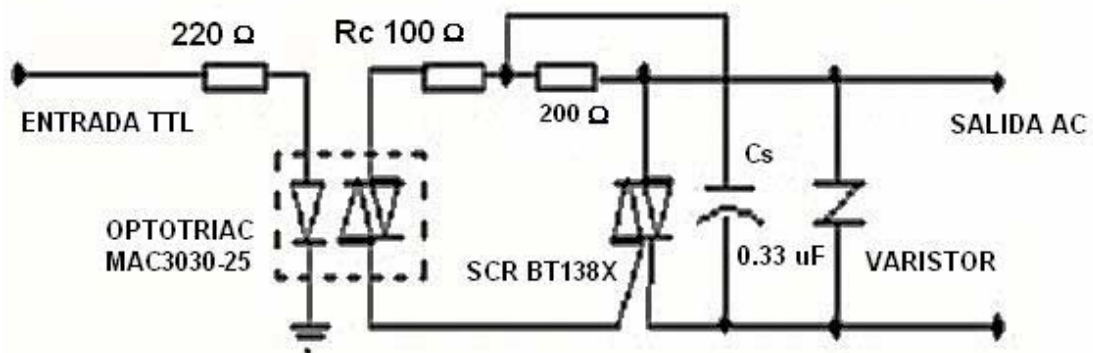
**Circuito de salida.** La secuencia de encendido puede activar cinco salidas: Arranque del motor ventilador, válvula de ignición, transformador de ignición, válvula de combustible y lámpara de alarma. Para el diseño de las interfaces de salida se tuvo en cuenta que estas señales, al igual que las entradas, son activas en 120 voltios AC, 60 *hertz* y que el microcontrolador solo tiene salidas de 5 o 0 voltios DC. El circuito diseñado fue el de la figura 12.

Los parámetros de diseño tenidos en cuenta para el anterior circuito son los siguientes:

- ❖ La corriente máxima de activación para el *optotriac* es 50mA, por lo que la resistencia de 220 ( $\Omega$ ) limita este valor en:

$$5 \text{ V d.c} / 220 \Omega = 22,7 \text{ mA}$$

**Figura 12. Salida**



- ❖ El valor máximo de  $R_c$  se debe calcular de forma que permita el paso de la corriente de disparo del triac  $I_{GT}$ , asegurando que entre los extremos de éste no se exceda la tensión máxima de pico en estado de conducción  $V_{TM} = 1.85 \text{ (V)}$ , y la tensión por encima de la cual no se produce el disparo del opto-triac  $V_{IH} = 40 \text{ (V)}$ .

$$RC_{\max} = \frac{V_{IH} - V_{TM}}{I_{GT}} = \frac{40 - 1.85}{75 \cdot 10^{-3}} = 508.6(\Omega)$$

Experimentalmente se ajusto este valor en  $100\Omega$

Dada la naturaleza inductiva de los relés que activan las válvulas, el motor ventilador y el transformador de ignición, la corriente de carga a través del **triac** se retrasada con respecto a la tensión de red un determinado ángulo. Al dejar de conducir el triac (**turn off**), se genera en la carga un pico de tensión que actúa sobre el triac. Si la velocidad de subida de esta tensión excede a la velocidad de conmutación del **triac**  $dV/dt$  o al valor de  $dV/dt$  estático del acoplador, el **triac** vuelve al estado de conducción, es decir, la carga no puede ser conmutada.

Para dar solución a este problema y proteger el **triac**, se colocó una red **Snubber** entre los extremos del mismo. Esta red resultó crítica para permitir una activación continua de las salidas. Los valores de la red fueron hallados experimentalmente y son los especificados en la figura 12.

Esta red tiene en cuenta el  $dV/dt$  que es igual a la relación entre la tensión de apagado ( $V_{TURN\ OFF}$ ) y la constante de tiempo de la misma ( $RC$ ,  $R_S \cdot C_S$ ):

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_{TURN\ OFF}}{R_S \cdot C_S} \rightarrow R_S \cdot C_S = \frac{V_{TURN\ OFF}}{\frac{dV}{dt}}$$

De la anterior ecuación y tomando una tensión de apagado en  $155,6\text{ V}$ , junto con los valores hallados para la red **snnubber**, se dedujo que en el momento de la activación del sistema los **triacs** tienen un  $dv/dt$  de  $1,57\text{V}/\mu\text{seg}$ .

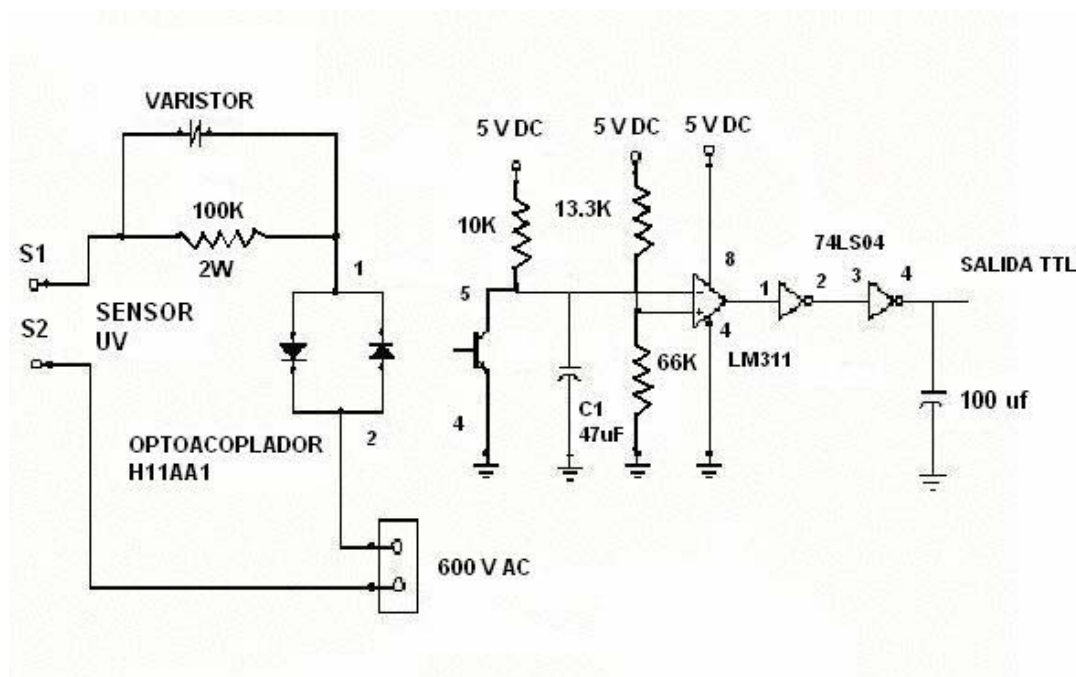
**Circuito de llama.** El circuito de llama convierte la señal que envía el sensor ultravioleta UV – 2, cuando detecta fuego en la caldera, en una señal digital: “1” lógico si no hay llama y “0” si esta es detectada.

Para diseñar el circuito fue necesario caracterizar el sensor:

**Tabla 8. Sensor UV**

Voltaje de operación:	(S1-S2): 560-610 VAC 50/60 Hz
Corriente al detectar llama:	1,45ma – 2ma
Temperatura limite:	Máxima: 200°F (94°C) Mínima: -40°F (-40°C)

**Figura 13. Circuito de LLama**



La corriente especificada en la tabla fue determinada experimentalmente. El voltaje y los rangos de temperatura se obtuvieron de la hoja de datos del

fabricante\*. Teniendo en cuenta la tabla anterior se diseñó el circuito detector de llama. Ver figura 13.

En el diseño del anterior circuito se tuvo en cuenta lo siguiente:

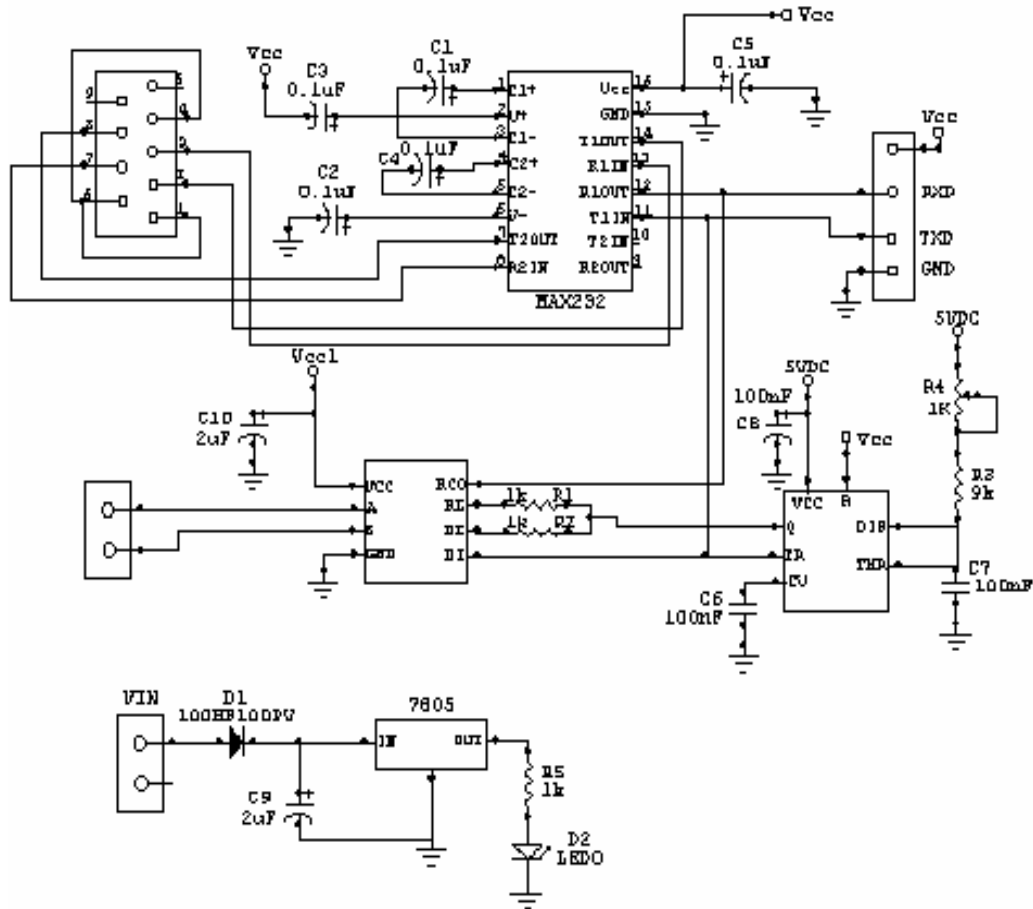
- ❖ La resistencia de 100k puede tener un voltaje máximo de 120 VAC, y una corriente de 4 mA, siendo su máxima potencia de disipación 0,48W. Se escogió por esto una capacidad de 2W.
- ❖ En el momento de encendido (mínima intensidad de llama) el **pin** cinco del optoacoplador se encuentra a 3,9 VDC respecto a tierra. Este valor se comparó con un voltaje de 4,1 VDC en las entradas de un operacional (LM358) para lograr una alta sensibilidad en la detección de llama.
- ❖ La impedancia de salida de este circuito se acopla con la impedancia de entrada de la tarjeta de control por medio de dos inversores.

**2.1.3 Tarjeta para la comunicación serial.** El circuito para la comunicación serial toma las señales Rx y Tx del microcontrolador AT89C52 y las adapta a niveles de comunicación RS232 por medio del integrado MAX232, poniendo las salidas disponibles en un DB9 macho. El circuito implementado es de la figura 14.

---

\* Consultar en [www.fireye.com](http://www.fireye.com) **flame scanners**

Figura 14. Circuito RS232



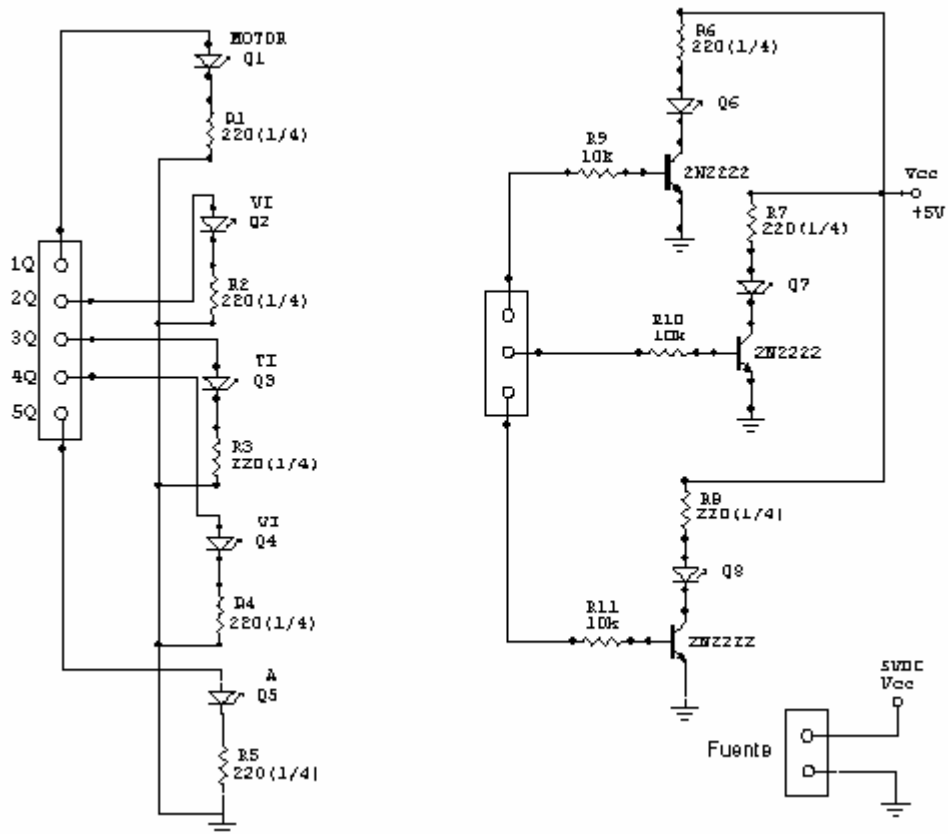
De este circuito es importante destacar la adaptación a niveles 485 lograda con el integrado MAX485. La comunicación 485 es inhabilitada si está activa la RS232, dado que el **pin** RE estaría a VCC y el pin DI a tierra (ver figura 8) Si no esta activa la transferencia RS232, la activación del max485 se logra por medio del integrado 555 configurado como monoestable.

Debe aclararse que el pulso del monoestable debe ser una fracción del tiempo necesario para transmitir un **bit**, con una tolerancia de  $\pm 1/2$  **bit**, por

ejemplo, si la transmisión se hace a 9600 bps (como es el caso para este equipo) un ancho de pulso adecuado es 0,988 ms, dado que 1 **bit** se transmite en 1/9600 s, esto es a 10,416 ms y medio **bit** son 5,208 ms. El valor del pulso es ajustable por medio de un potenciómetro de un 1k $\Omega$

**2.1.4 Tarjeta de Visualización.** Esta tarjeta se implemento con el objetivo de asignar un **led** a cada entrada y a cada salida del sistema de encendido, que indique el estado de operación de las mismas.

**Figura 15. Tarjeta de visualización**



**2.1.5 Ubicación del Equipo en el Panel de Encendido.** La estructura física del secuenciador de encendido se ha diseñado con el fin de facilitar su ubicación en el panel de encendido de la caldera, del cual es su instrumento principal.

Las figuras 16, 17 y 18 muestran el diagrama circuital y esquemático del panel de control y el equipo desarrollado respectivamente.

## **2.2 HARDWARE PARA EL CONTROL DE PRESION**

Regular la presión de vapor en la caldera conlleva variar la mezcla aire combustible a la entrada de la misma, controlando para esto la velocidad del motor ventilador y la apertura de la válvula de combustible; esto implica:

- ❖ Establecer el valor deseado de presión.
- ❖ Especificar las constantes proporcional, integral y derivativa para el algoritmo PID.
- ❖ Leer la presión del vapor de salida
- ❖ Ejecutar el algoritmo PID
- ❖ Regular la apertura de la válvula de combustible
- ❖ Regular la señal del variador de velocidad del motor ventilador,

De los puntos anteriores se deduce que son necesarios, además del microcontrolador que ejecuta el algoritmo PID, un teclado, circuitos de

Figura 16. Diagrama Circuitual Panel de Control

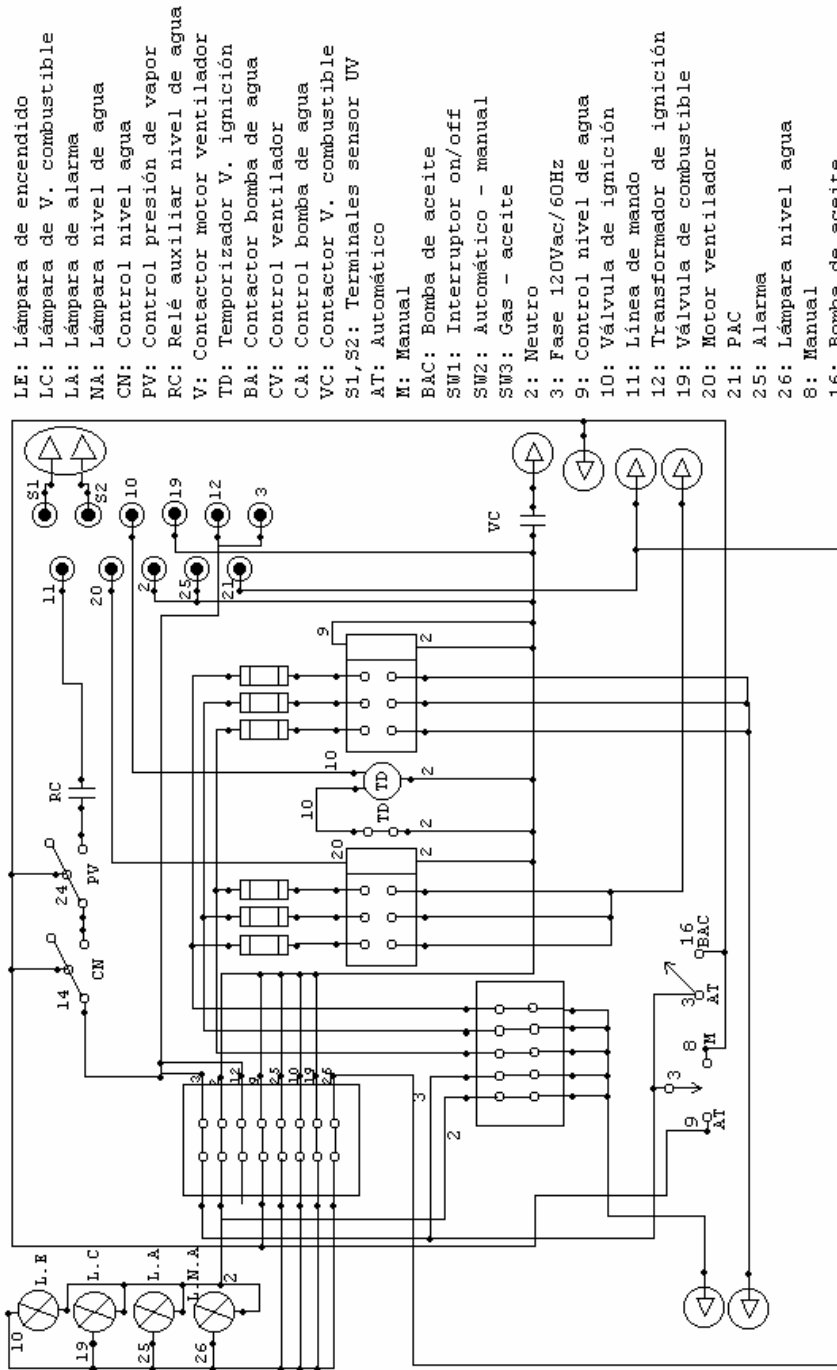
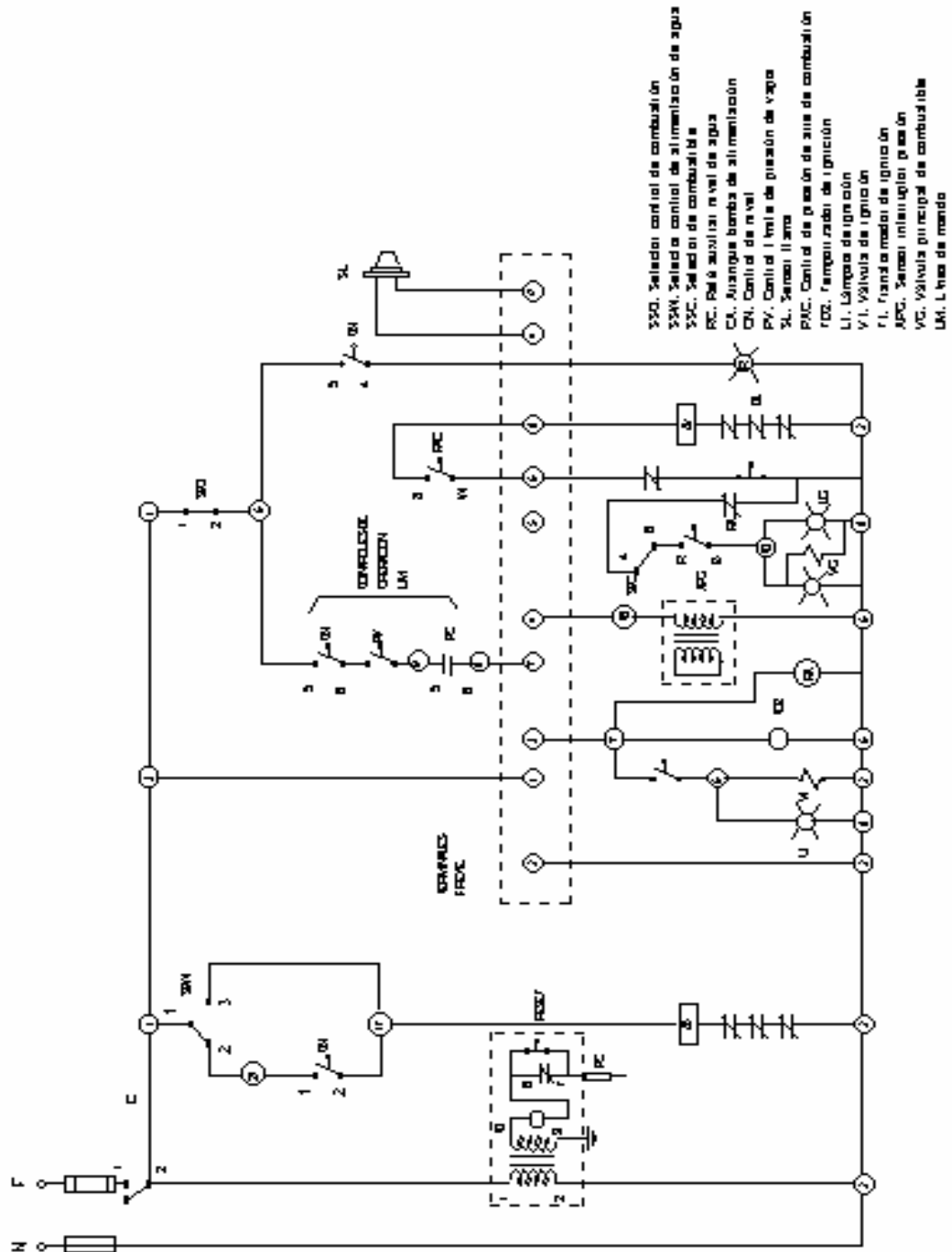
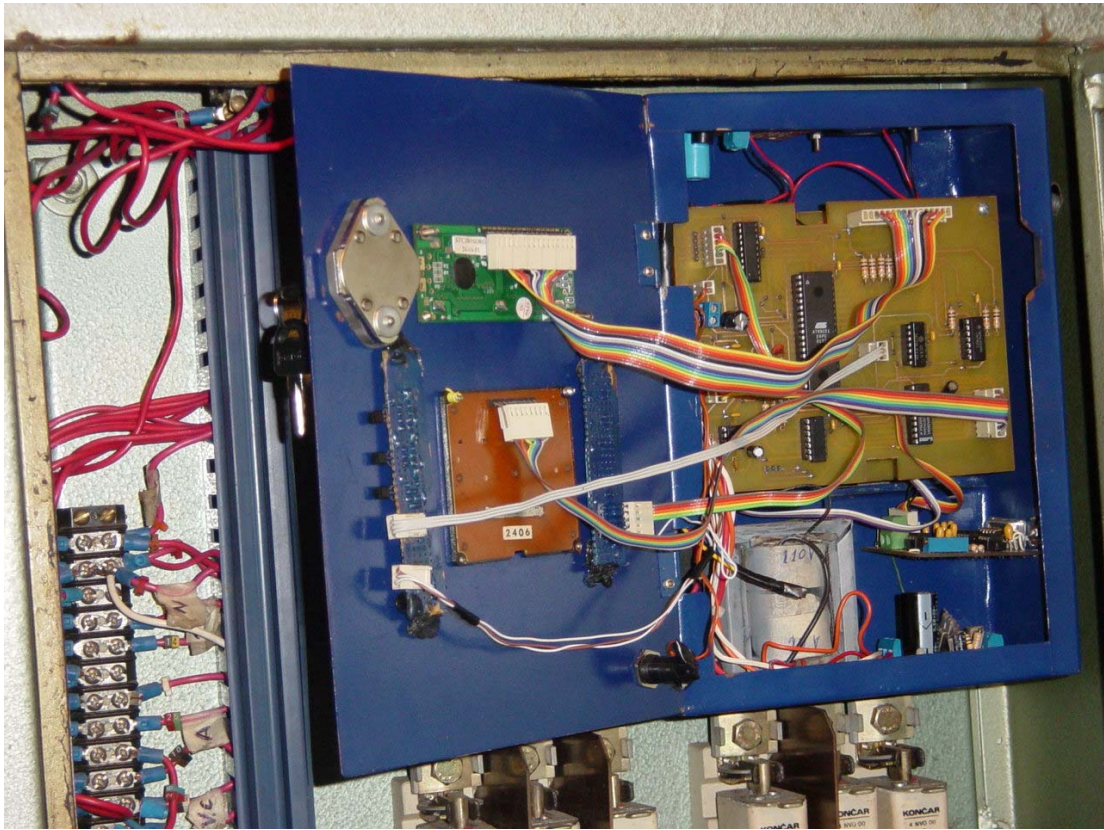


Figura 17. Diagrama Esquemático Panel de Control



**Figura 18. Equipo programador de Encendido desarrollado.**



visualización, un conversor análogo digital (lectura de presión) y dos conversores digital análogo (válvula y variador de velocidad), así como circuitos acondicionadores de señal.

A continuación se darán algunas especificaciones del microcontrolador usado en esta fase del proyecto y de las demás tarjetas asociadas al mismo.

**2.2.1 Microconvertidor 832.** El microconvertidor 832 de *analog device* es un microcontrolador con arquitectura 8052\* que cuenta además con:

- ❖ 8 canales de conversión análoga, de 12 **bits** y hasta 247 KSPS.
- ❖ Dos canales de conversión digital – análoga de 12 **bit**
- ❖ Salida dual PWM – DACs ☒ ➔
- ❖ 62K**bytes** para memoria de programa, tipo **Flash/EE**
- ❖ 4**bytes** para memoria de datos, tipo **Flash/EE**
- ❖ **UART** I<sup>2</sup>C y SPI I/O
- ❖ **Watch dog timer (WDT)**
- ❖ Bajo consumo de potencia.
- ❖ Programación serial y paralela.

Entre otras características. Este microcontrolador está ubicado en su tarjeta programadora.

La siguiente tabla describe los principales pines usados para este sistema:

**Tabla 9. Pines 832**

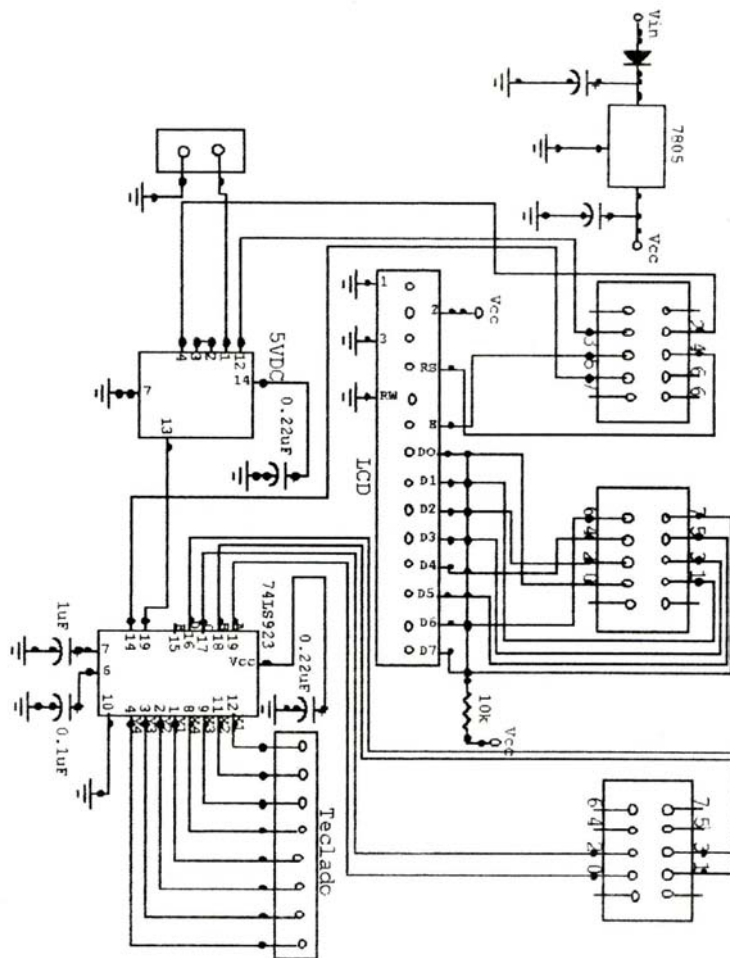
P0 (Puerto Cero)	<b>Bus de Datos LCD (D0 – D7)</b>
P1.0 (Convertor A/D )	Lectura señal sensor de presión.
P2.0 –P2.4	<b>Bus de Datos Teclado</b>
P3.0	<b>RXD</b> , recepción puerto serie.
P3.1	<b>TXD</b> , recepción puerto serie.
P3.3	<b>INT1</b> , conectado al <b>DA del 74C923</b> para <b>saber cuando se oprimió una tecla.</b>
P3.4	<b>PIN RS LCD</b>
P3.5	<b>PIN E LCD</b>
P3.7	<b>PIN OE del Teclado</b>
DAC0	Señal para el variador de velocidad
DAC1	Control de apertura Válvula de combustible

\* La arquitectura 8052 implica que el “corazón” de este microcontrolador es un “intel 8752”, idéntico al atmel 89C52.

De la tabla anterior se puede concluir que el 832 esta interfazado con circuitos digitales y circuitos análogos, para lo cual se diseñaron dos tarjetas básicas, detalladas a continuación:

**2.2.2 Interfaz Digital.** Esta tarjeta se muestra en la figura 19 y consta esencialmente de resistencias del **pull up** para el bus de datos del LCD, del integrado 74C923 (especificado en el ítem 2.1.1) para el manejo del teclado, y del integrado 74LS14 para acoplar la señal de interrupción.

**Figura 19. Interfaz digital con el 832**



**2.2.3 Interfaz Analógica.** Esta tarjeta debe encargarse de interfazar las entradas y salidas del microcontrolador con el sensor de presión, la válvula de combustible y el variador de velocidad. Fué importante por tanto, conocer las características de estos instrumentos, para realizar un adecuado diseño de la tarjeta acondicionadora de señal:

**Sensor de Presión.** Ver figura 20. El sistema de control de presión en la caldera utiliza para lectura de la misma un sensor marca SETRA, el cual esta diseñado para ser usado con cualquier gas o liquido compatible con el acero inoxidable. Sus características son las siguientes:

**Tabla 10. Sensor de Presión**

<b>Aplicación</b>	Transmisor de presión
<b>Modelo</b>	206 – Serie 362282
<b>Rango</b>	0 a 1724.13 kpas
<b>Alimentación</b>	24 VDC
<b>Salida</b>	4 a 20 mA

**Figura 20. Sensor de Presión.**



**Válvula de Combustible.** Esta válvula posee dos opciones de operación, manual y automática, así como un interruptor que determina el sentido de giro: horario o antihorario. Sus Características son especificadas en la tabla 2, capítulo uno.

**Variador de Velocidad.** Como su nombre lo indica este instrumento permite variar la velocidad del motor ventilador, que suministra oxígeno al proceso de combustión en la caldera. Algunas de sus características son las siguientes:

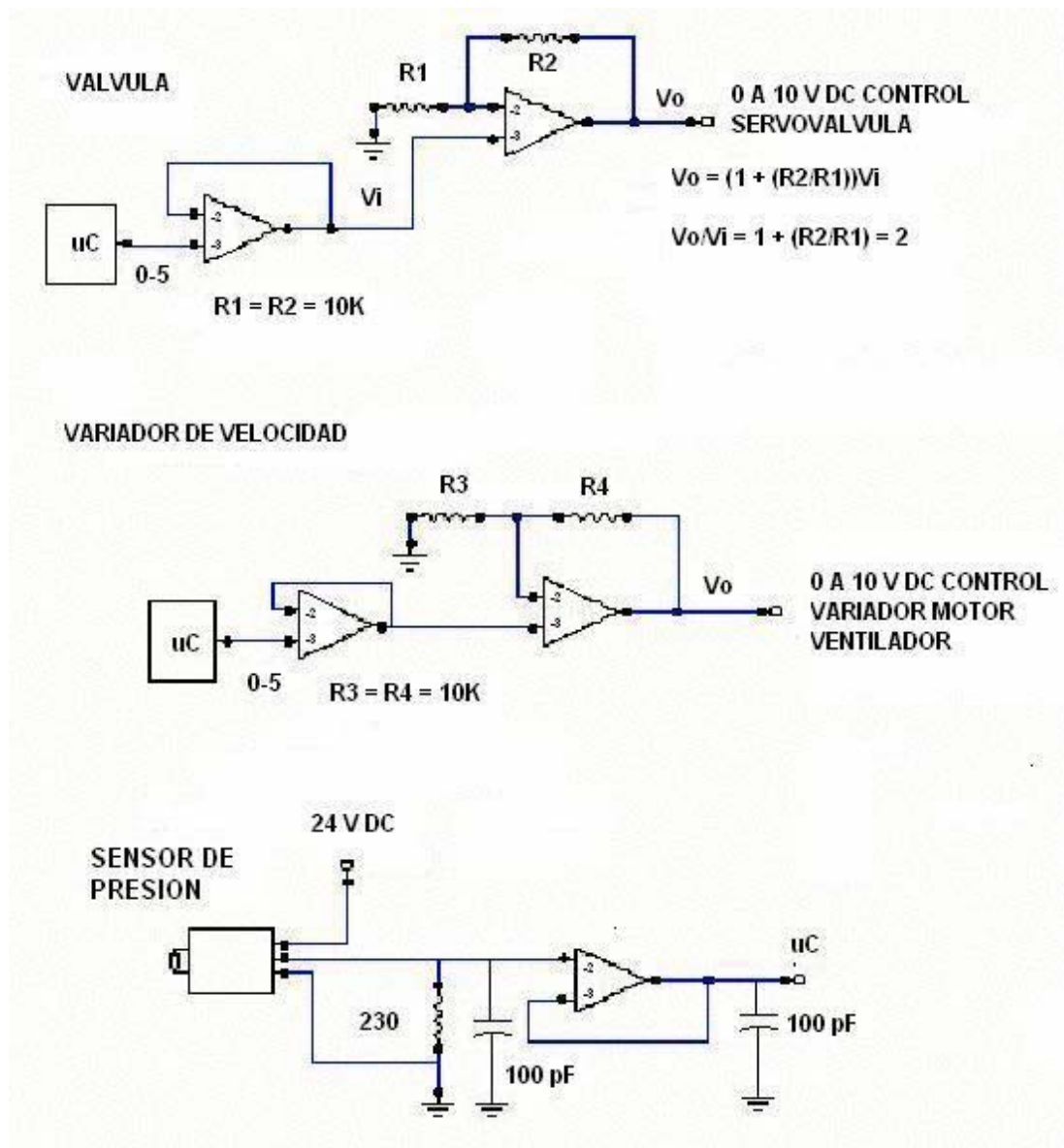
**Tabla 11. Variador de Velocidad**

<b>Marca</b>	Altivar ATV16U41M2
<b>Tensión de Alimentación</b>	208 – 10%...240 +10% VAC
<b>Frecuencia de Alimentación</b>	50/60 Hz +- 2
<b>Frecuencia de Salida</b>	0.1 a 200 Hz 0.2
<b>Consigna de Velocidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Una entrada analógica de tensión, 0 –10 V, impedancia <math>\geq 30K\Omega</math></li> <li>❖ Una entrada analógica de intensidad 0-20 mA o 4 – 20 mA, impedancia <math>250\Omega</math></li> </ul>

De las tablas anteriores se deduce que la señal que controla la apertura de la válvula de combustible y la señal que actúa en el variador de velocidad para incrementar o disminuir la velocidad del motor ventilador, deben ser señales de 0 a 10 VDC. Sin embargo las salidas DA del 832 pueden tener una máxima excursión de 5 VDC. Así mismo, la señal que el sensor envía es de 4 a 20 mA, mientras que los canales análogos del 832 leen de 0 a 5V.

Con base en lo especificado se diseñaron los circuitos de la figura 21.

Figura 21. Circuitos acondicionadores.



Con los circuitos acondicionadores se concluye la explicación de las tarjetas de control e interfaz usadas para los sistemas de encendido y regulación de presión. Se analiza a continuación, los circuitos fuente empleados para dichos sistemas.

## 2.3 FUENTES DE ALIMENTACION

Se realizó el montaje de tres fuentes: 5VDC, +-15VDC y 24VDC, con el fin de alimentar el secuenciador de encendido (5VDC), el microcontrolador 832 (5VDC), los operacionales de la tarjeta acondicionadora de señal (+-15VDC), el sensor de presión (24VDC) y la válvula de combustible (24VDC).

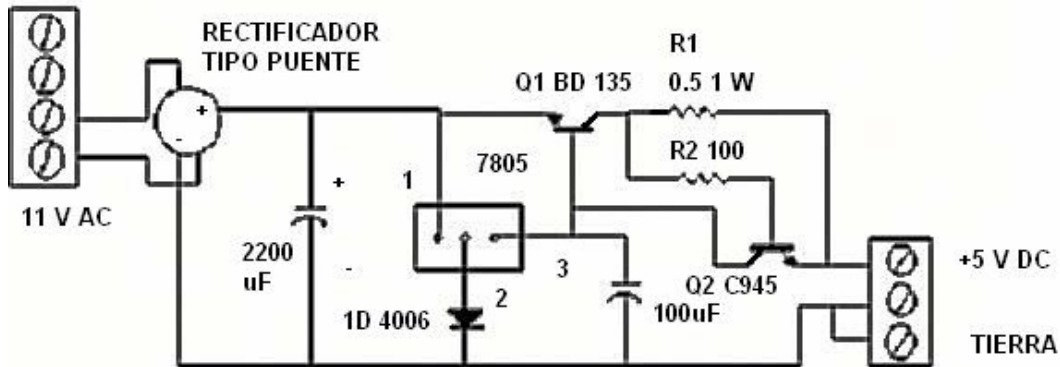
**2.3.1 Fuentes 5 VDC.** La potencia que debe suministrar esta tarjeta se determinó a partir de la siguiente tabla:

**Tabla 12. Potencia de los elementos del secuenciador de encendido**

CANTIDAD	REFERENCIA	CORRIENTE mA	POTENCIA (max) mW
1	74HC374	16	4
1	AT89C52	25	125
1	LM311	9	135
1	LM358	9	135
2	555	12	135
2	74LS14	12	2
1	74C923	1,1	700
1	74LS11	6	2
1	74LS126	6	4
5	MOC3010	50	500
3	H11AA1	30	300
1	MAX232	10	200
1	MAX485	10	200
1	LCD	3	15
8	LEDs	128	655
	<b>TOTAL</b>	<b>327,1</b>	<b>3112</b>

El circuito implementado fue el siguiente:

**Figura 22. Fuente de 5vdc**



Se puso un diodo común entre masa y el terminal 2 del regulador, permitiendo que este suministre 5,6 VDC. Este voltaje es aplicado a la base de Q1, el cual es un transistor de potencia tipo BT135, utilizado para “derivar” los terminales de entrada y salida del regulador con el fin de no sobrecargarlo. Como la juntura base emisor de Q1 produce una caída de tensión de 0,6V, se tendrá a la salida de este 5VDC.

Q2 y R2 protegen a Q1, limitando la corriente de salida a 1 A. Si se supera este nivel, Q2 se satura y cortocircuita la juntura base emisor de Q1, llevándolo a corte.

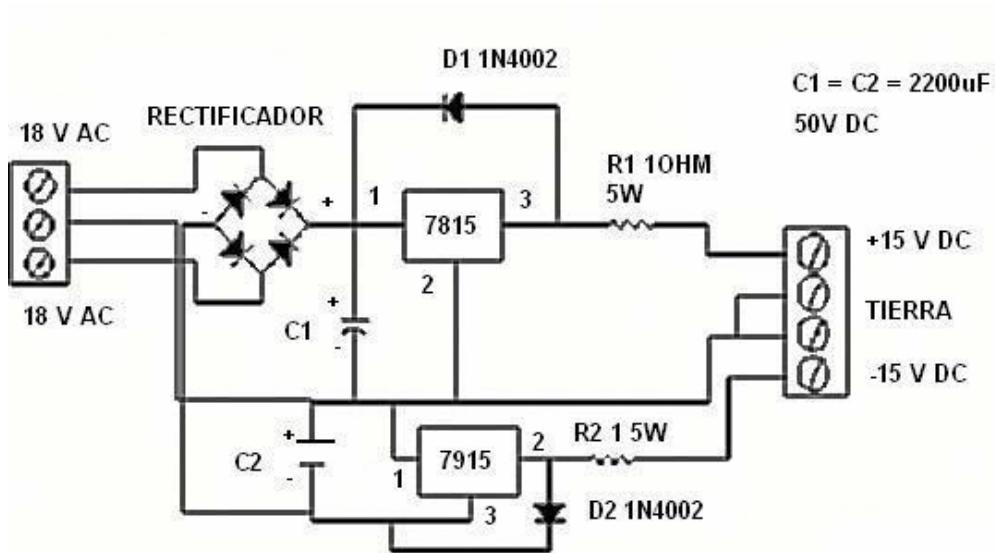
El transformador tiene en el secundario una salida de 600 Voltios AC –10mA, para alimentar el sensor de llama, y una de 10 VAC – 1A para alimentar la fuente de 5VDC. Así mismo, el regulador 7805 puede suministrar hasta 1 A, estableciendo como potencia máxima de suministro de la tarjeta:

$$P(W) = 1 \text{ A} \times 5 \text{ VDC} = 5\text{W}$$

La cual es suficiente para las necesidades del sistema secuenciador de encendido. Para alimentar el microconvertidor 832 y sus circuitos asociados, se utilizó la misma tarjeta, dado que los requerimientos de potencia para este sistema son menores.

**2.3.2 Fuente de +-15 VDC.** Esta fuente debe alimentar la tarjeta acondicionadora de señal, la cual dispone de 5 operacionales, que pueden disipar hasta 2500 mW. El circuito implementado fue el siguiente:

**Figura 23. Fuente de +-15VDC**

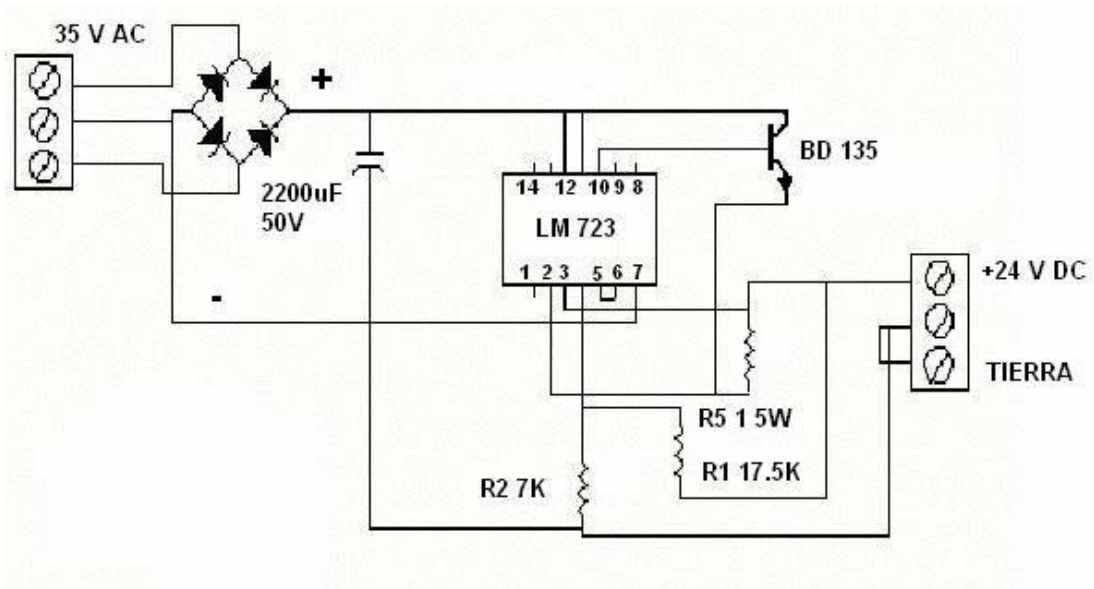


Los reguladores puestos en la fuente permiten un suministro de hasta 1 A suficiente para las necesidades de los acondicionadores.

**2.3.3 Fuente 24 VDC.** Esta fuente alimenta el sensor de presión y el actuador de la válvula que regula el combustible. El sensor y la válvula necesitan mínimo 20 mA cada uno. La fuente fue diseñada a partir de un re

gulator variable LM723, ajustando su salida a 24 VDC. El suministro de corriente que permite este regulador es de 150 mA

**Figura 24. Fuente de +24VDC**



### 3. SOFTWARE

En este capítulo se explican los algoritmos relacionados con el encendido y control de presión, desarrollados para operar la caldera por medio de los microcontroladores **ATMEL 89C52** y **Analog Devices 832**, respectivamente.

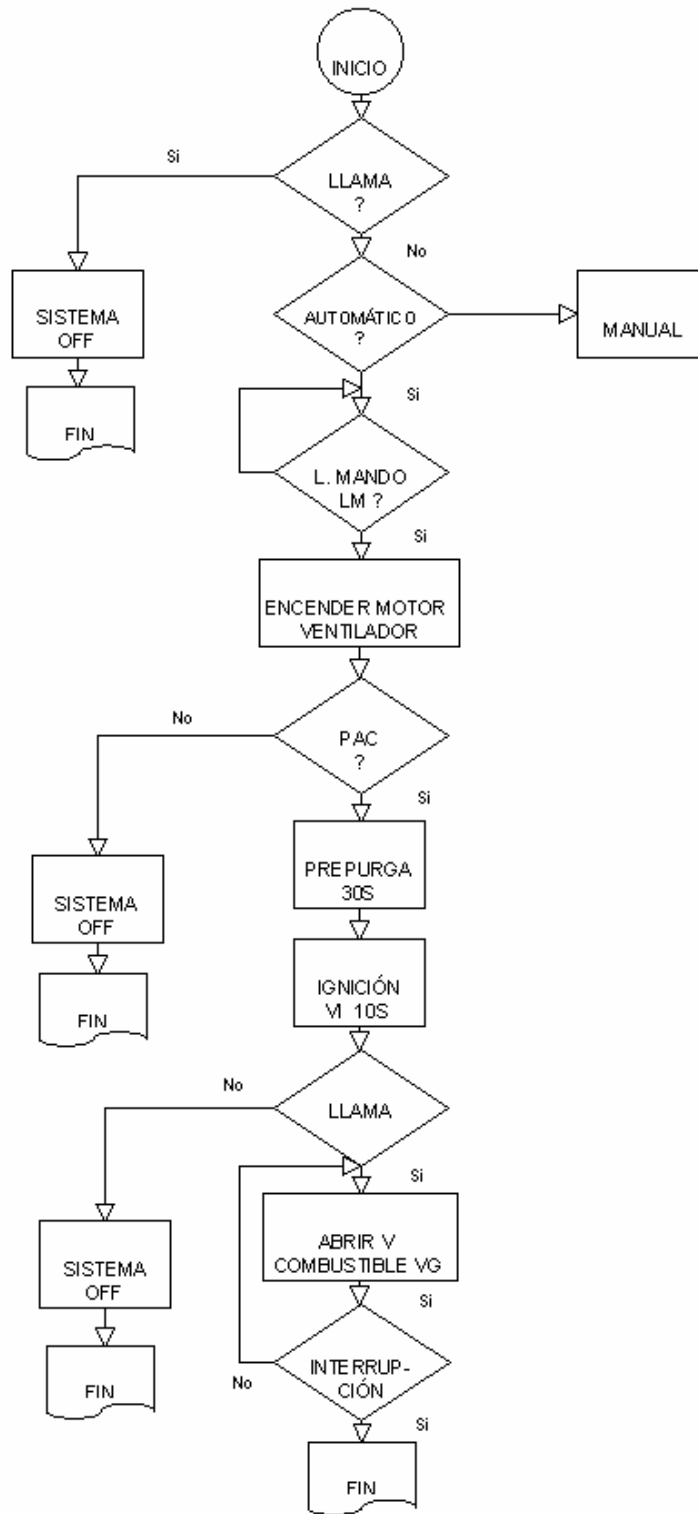
De la operación de encendido se exponen las rutinas de inicio y autodiagnóstico, captura de datos del teclado, selección manual o automática, contador decremental, apagado y comunicación serial.

De la operación de control de presión se detalla el sistema a controlar, así como las rutinas de arranque, operación por decimal, algoritmo PID y regulación del motor ventilador.

Se hace también una breve descripción del proceso de programación y carga de los archivos binarios en el microcontrolador **ATMEL 89C51** y el microconvertidor 832 de **Analog Devices**.

Por último se explicara un algoritmo desarrollado en **labview** para permitir que el equipo que regula el encendido de la caldera pueda reportar su estado de operación a un **PC**.

Figura 25. Algoritmo de Encendido



### 3.1 SECUENCIA DE ENCENDIDO

La operación de encendido de la caldera debe seguir una estricta secuencia de pasos, que inician por verificar la no existencia de llama previa al encendido, un adecuado nivel de agua, y una presión de vapor por debajo del valor máximo permitido. El algoritmo de encendido se expone en la figura 25.

Este algoritmo puede explicarse a través del siguiente orden:

1. Verificación del estado del circuito de control de operación, este circuito indica si la presión y el nivel de agua en la caldera son aptos para iniciar el encendido, en este caso el circuito tendrá en su salida un valor de 120V AC.
2. Si el circuito de control de operación esta cerrado (salida en 120V AC), se activa el circuito de control de un motor ventilador. Se debe comprobar que este mantenga una presión de aire adecuada para poder iniciar un periodo de prepurga.
3. El periodo de prepurga consiste en un tiempo durante el cual, se expulsan de la caldera los gases residuales que hayan podido quedar de un proceso de quemado anterior. Su duración puede variar entre 30 segundos y 90 segundos.
4. Una vez terminado el tiempo de prepurga, se inicia el periodo de ignición, el cual consiste en la energización del transformador para generar un arco eléctrico, y en la apertura de la válvula de ignición, para generar llama.

5. Una vez detectada la presencia de llama, se activa la válvula de combustible para iniciar el proceso de quemado en la caldera. En este momento se desenergiza la válvula de ignición, si la caldera opera solamente con gas. En el caso de que la caldera opere con gas y **fuel oil** la válvula de ignición (VI) permanecerá abierta.
6. En el momento que ocurra un fallo en la llama, deberán apagarse las válvulas de combustible abiertas y el motor ventilador. En algunos casos podrá intentarse un nuevo encendido o si se prefiere el apagado será total, así mismo si la línea del circuito del control de operación se cae, indicando una presión o nivel de agua inadecuados, deberá detenerse el quemado de la caldera y esperar a que las condiciones se restablezcan para intentar un nuevo encendido.

La ejecución del anterior algoritmo implica el desarrollo de otras rutinas, las cuales se explican a continuación.

### **3.2 RUTINAS DE ENCENDIDO**

Las siguientes rutinas fueron implementadas en el microcontrolador **Atmel 89C52**, con el objetivo de realizar una adecuada secuencia de encendido.

**3.2.1 Inicio.** La operación de inicio verifica si se ha llegado a este punto por un **reset** previo o si es la primera vez que se ejecuta la secuencia de encendido.

El bit 8H de la memoria **RAM** del microcontrolador **Atmel 89C52** se pone a uno cuando se ejecuta por primera vez la operación de la caldera; si un funcionamiento inadecuado del microcontrolador genera un **reset** no deseado, el programa podrá verificarlo preguntando por el estado del bit 8H,

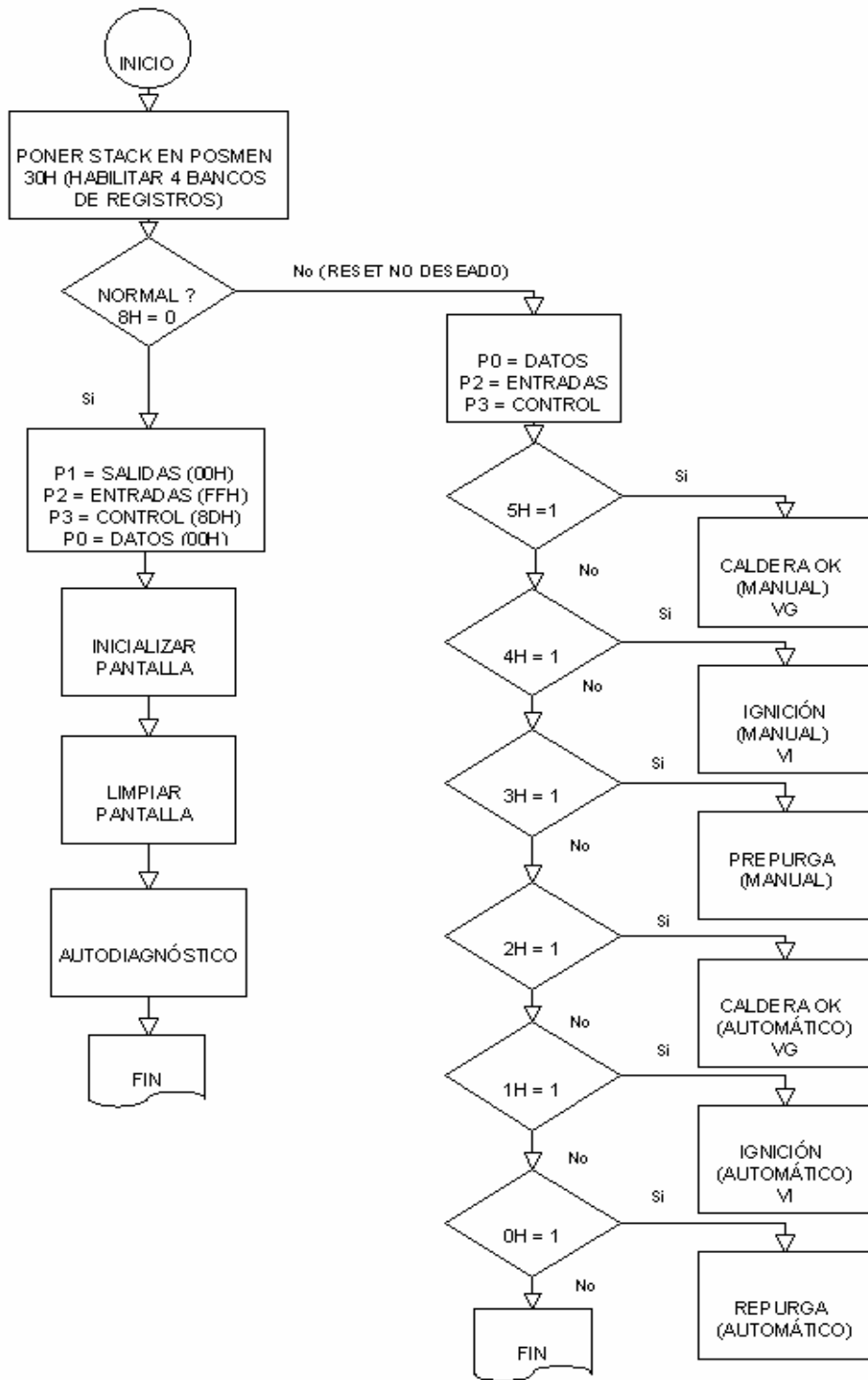
dado que un reset no borra la memoria **RAM** del microcontrolador. Así mismo podrá saber a que punto del programa debe volver, examinando el estado de los bits 0H,1H,2H,3H,4H Y 5H, los cuales indicaran si al momento del **reset** no deseado el microcontrolador ejecutaba la rutina de prepurga, ignicion o caldera operando, para las secuencias automática y manual respectivamente.

Esta parte del programa garantiza según lo explicado confiabilidad para el sistema, en el evento de presentarse un **reset** no programado en el microcontrolador. El algoritmo es el de la figura 26

Es importante notar que para un inicio normal, el puerto de salida P1 (el cual activa las válvulas de gas, el transformador de ignición y el motor ventilador) es puesto a cero (limpiado), en tanto que para el caso de un **reset** no deseado P1 no es alterado. En el inicio se configuran también el puerto P0 como puerto de salida (datos LCD), el puerto P2 como puerto de entrada (línea de mando, PAC, sensor UV y teclado) y el puerto P3 como puerto de control (interrupciones y comunicación serial).

**3.2.2 Autodiagnóstico.** El autodiagnóstico (rutina AUTO) es la parte del programa que comprueba que el microcontrolador ejecuta normalmente las operaciones básicas de mover (**MOV**), adicionar (**ADD**) y comparar y saltar (**CJNE**). Si las operaciones son correctas se pasara a escoger entre la secuencia manual o automática, de lo contrario se terminara la ejecución del programa.

Figura 26. Algoritmo de Inicio



**3.2.3 Selección Automático Manual.** La selección Automático Manual corresponde a la rutina SELEC (ORIGEN 0500H) Esta rutina envía un mensaje a la pantalla que visualiza las opciones “AUTOMÁTICO (1)” y “MANUAL (2)”.

Si el usuario selecciona por medio del teclado los números uno o dos y seguidamente tecldea la letra **enter**, se asignaran las rutinas respectivas. Si el usuario tecldea un numero distinto a 1 o 2 y luego **enter** o si tecldea un número de dos cifras, aparecerá el mensaje “TECLA NO VALIDA”.

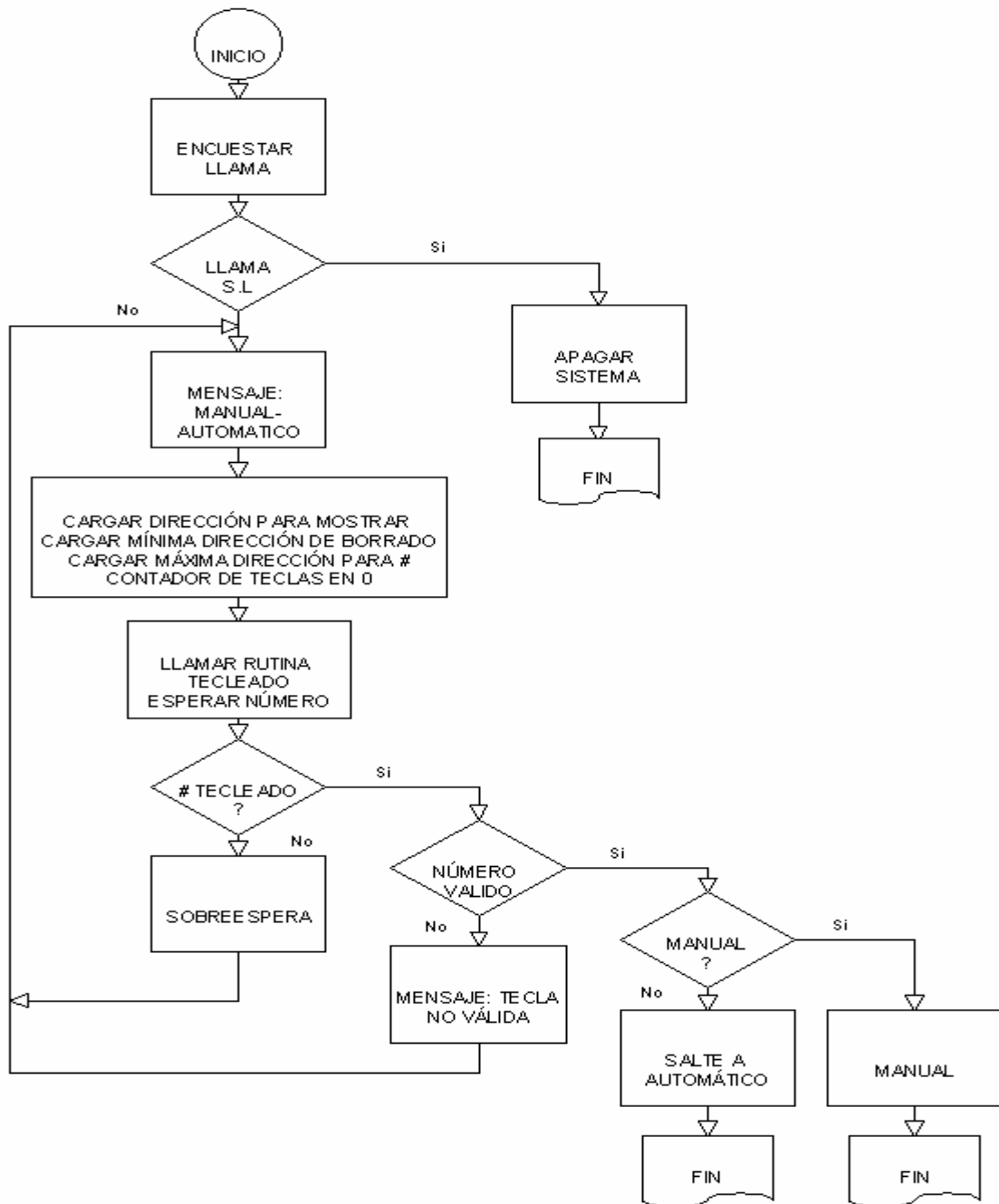
Si el usuario tecldea un numero pero no tecldea la tecla **enter**, aparecerá en pantalla el mensaje “SOBREESPERA” y se volverá a mostrar el mensaje inicial con las opciones Automático y Manual. El algoritmo de esta operación se muestra en la figura 27.

**3.2.4 Captura de datos del teclado.** La captura de datos del teclado se realiza por medio de la interrupción número uno del microcontrolador, INTE1(ORIGIN 0050H), y de la rutina TECLADO (ORIGIN 006AH).

Al llamar a la rutina TECLADO esta habilita la interrupción INTE1, en espera de que se teclee un numero. INTE1 captura los datos del teclado que han sido decodificados por el integrado 74LM923; pero si luego de cuatro segundos no se ha tecldeado ningún numero, se finaliza la rutina y se indica esto poniendo el registro R5 del banco de registros uno en FFH.

La rutina teclado permite también visualizar en pantalla el numero que se ha tecldeado y borrarlo luego si se marca la tecla “flecha izquierda”.

Figura 27. Algoritmo Selección Manual Automático



Si una vez teclado el número se marca enter, la rutina TECLADO calcula el valor hexadecimal de dicho número; por ejemplo, si se tecleo primero el número dos (2) y luego el número cinco (5), TECLADO multiplicará dos por diez ( $2 \times 10$ ) y el resultado lo adicionará a cinco, para obtener el número veinticinco (25 o 19H).

La rutina TECLADO tiene en cuenta los valores puestos en las direcciones de memoria 72H,73H,75H,77H,79H y el registro R7 del banco de registros uno, las cuales indican número de teclas esperadas, identificador de enter válido, mínima dirección para visualizar y borrar en pantalla, máxima dirección en pantalla para visualizar, máxima dirección en pantalla para borrar, y dirección para visualizar en pantalla números marcados, respectivamente. Estos valores deben ser cargados antes de llamar a la rutina TECLADO y permiten determinar después si el valor teclado es válido o no. Este algoritmo se muestra en la figura 28.

**3.2.5 Contador Decremental.** Esta rutina se utiliza para visualizar el valor del tiempo de prepurga en la caldera, en forma de un contador decremental.

La rutina CONTADOR toma de la posición de memoria 65H la dirección donde debe mostrar el número, y de la posición 66H el número con el que inicia el conteo.

La operación se basa en dividir el valor de conteo en diez (AH), sumar 30H al residuo y al cociente para convertirlos en valores ASCII, visualizar en pantalla el residuo y el cociente, decrementar el número y repetir la operación hasta llegar a cero. El algoritmo implementado fue el de la figura 29

Figura 28. Algoritmo Teclado

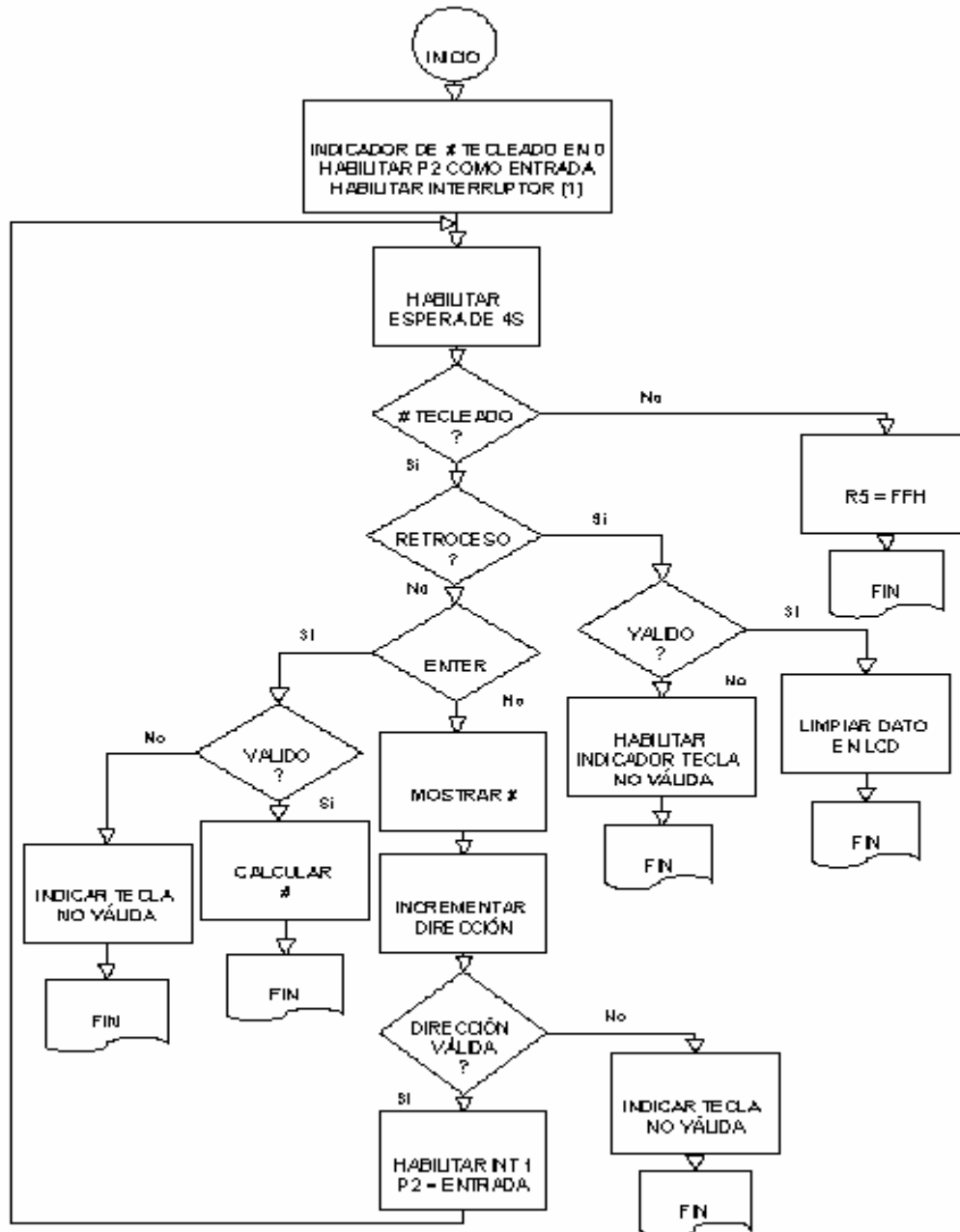
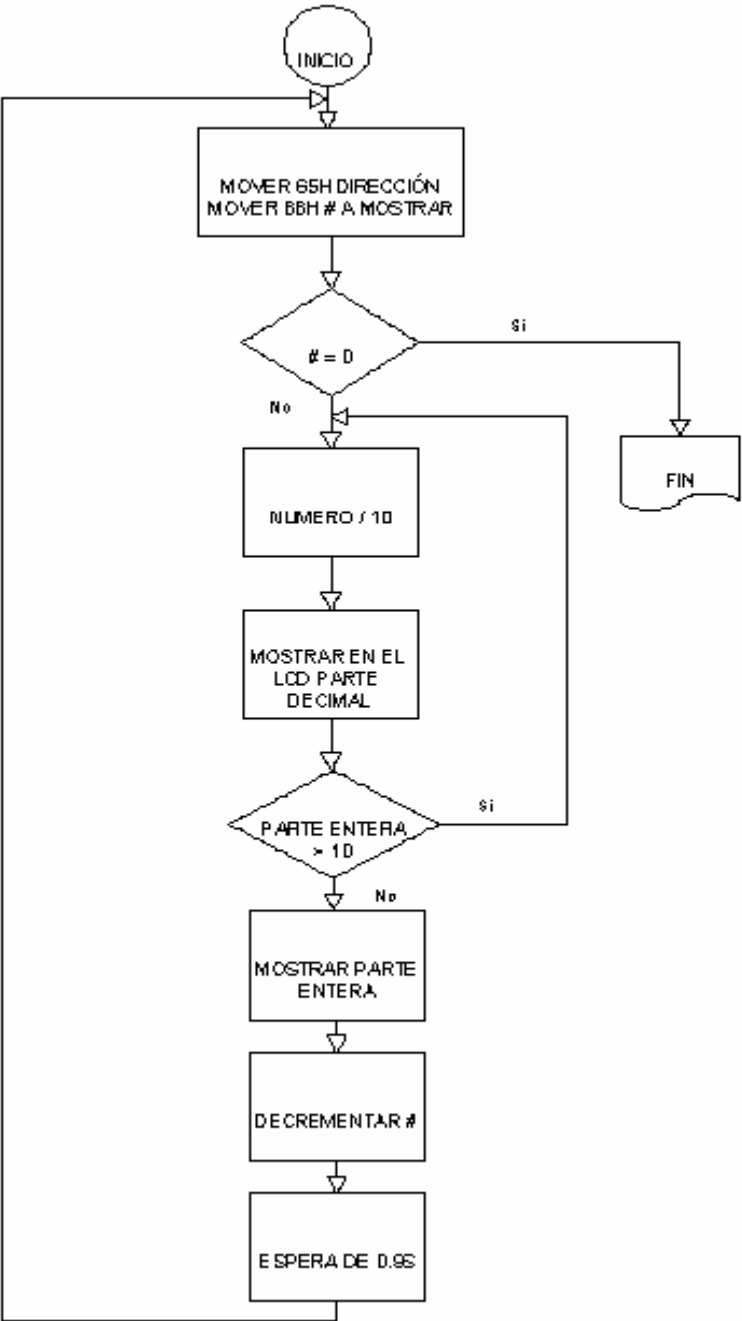


Figura 29. Algoritmo Contador



**3.2.6 Transmisión Serial.** La transmisión serial inicia configurando los registros asociados con la comunicación serial, PCON, SCON, TMOD Y TCON, que determinan el modo y la velocidad de transmisión, por medio de la rutina TRANSMITIR. El valor a transmitir se mueve al registro SBUF, y por medio de la rutina FINTRA se establece el fin de la transmisión examinando el bit SCON.1.

El modo de transmisión del equipo es *half duplex*, a 9200 baudios y en el estándar RS232: diez bits, un bit de inicio, ocho bits de datos y un bit de parada.

B INI	DB0	DB1	DB2	DB3	DB4	DB5	DB6	DB7	B FIN
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-------

**3.2.7 Apagar.** En el programa se establecieron tres rutinas para apagar la caldera, una con alarma, otra sin alarma, y una final con alarma y bloqueo.

Estas rutinas desahabilitan las interrupciones, ponen todas las salidas en “cero” (cierra las válvulas de gas, desenergiza el transformador de ignición y el motor ventilador), la dirección 20H en cero con el fin de limpiar los bits 0H a 8H para en caso de un falso reset no volver a la operación anterior, según se explico en el ítem 3.2.1, y enciende la alarma (*pin* P1.4)

En caso de bloqueo se espera que por teclado se desbloquee el equipo, para lo cual se habilita la interrupción por teclado INTE1. El bloqueo se produce cuando se detecta llama en la caldera al inicio de la operación de encendido y cuando no se detecta luego de un periodo de ignición.

**3.2.8 Rutina Automática – Manual.** Las rutinas Automática (AUTOMAT 0785H) y Manual (MANUAL 094AH, MANUAL1 0BB0H) realizan la secuencia de encendido especificada en el ítem 3.1, con la diferencia que la rutina

automática toma por defecto los valores de 30 segundos y 10 segundos para la prepurga y la ignición, en tanto que en la rutina manual se pueden escoger estos tiempos, de manera similar a como se selecciona la operación manual o automática, especificada en el ítem 3.2.2

Explicadas las rutinas mas importantes de la operación de encendido, se exponen a continuación las rutinas dedicadas a la regulación de la presión en la caldera.

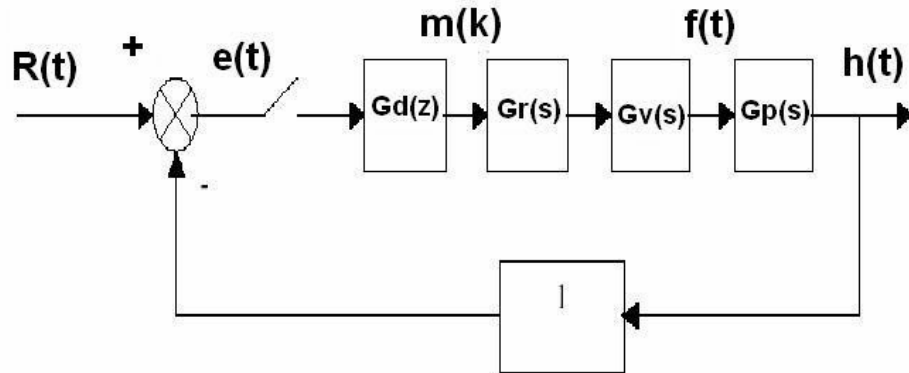
### **3.3 SECUENCIA DE CONTROL DE PRESION**

Para realizar el control de presión en la caldera se desarrollo un algoritmo PID. Este algoritmo regula la apertura de la válvula de gas. Sin embargo el control de presión implica también regular la cantidad de aire (oxígeno) en la combustión, para lo cual se determino experimentalmente que valores de voltaje de apertura de la válvula de combustibles, corresponden a los valores de voltaje de control del variador de velocidad del motor ventilador, en una combustión adecuada (llama azul). Este procedimiento se explicará en el ítem Motor. Por ahora debe entenderse que el control PID actuara sobre la válvula de gas y que otra rutina convertirá estos valores a los adecuados para regular el variador de velocidad y lograr así la presión deseada y una buena combustión.

El sistema esta desarrollado para que el usuario del mismo introduzca los valores de las constantes del controlador.

**3.3.1 Sistema a Controlar.** Antes de construir cualquier controlador, es necesario establecer el diagrama de bloques que define el sistema a controlar; para el control de presión en la caldera pirotubular se estableció el siguiente esquema:

**Figura 30. Esquema de Control**



Este esquema típico de control esta conformado por las funciones de transferencia relacionadas con el control de presión, la entrada (valor de presión de vapor deseado a la salida de la caldera), la salida (valor de presión medido a la salida de la caldera) y una retroalimentación unitaria.

Para la figura 30 se define:

- ❖ **r(t)**: Señal de referencia (entrada)
- ❖ **e(t)**: Error. Diferencia entre la señal de entrada y la de salida.
- ❖ **GD(Z)**: Función de transferencia del controlador (PID)
- ❖ **GR(s)**: Función de transferencia del retenedor de orden cero. (DAC)
- ❖ **GV(s)**: Función de transferencia de la servoválvula proporcional de gas.
- ❖ **m(k)**: Voltaje que se debe aplicar a la válvula que regula el paso de gas a la caldera, para general el flujo de gas y la cantidad de aire necesario, con el fin de alcanzar la presión que indique el control PID.
- ❖ **f(t)** : Flujo de gas que se debe suministrar al sistema para compensar el error.
- ❖ **GP(S)**: Función de transferencia de la planta.

❖ **h(t)** : Estado actual del sistema.

La retroalimentación unitaria en este sistema consiste en la lectura de presión hecha por medio de un conversor A/D del **u832**. Experimentalmente se estableció que al cabo de 20 minutos la caldera alcanza una presión de 100 psi. Este valor determina por tanto una frecuencia en la variación de presión de 1psi cada 12 segundos. Si tomamos 12 segundos como el periodo de cambio de presión en la caldera, obtenemos una frecuencia de:

$$F_p = 1/12 = 0,083\text{Hz}$$

En el programa implementado se estableció para el conversor una frecuencia de muestreo de 99,8 Khz, muy por encima de la frecuencia de **nyquist** (1,66hz) con el fin de permitir una mayor maniobrabilidad al control del sistema. Es importante aclarar que el conversor opera de forma continua, de tal manera que aunque entre la lectura de presión, el calculo del valor PID y la apertura de la válvula exista un tiempo mucho mayor al inverso de la frecuencia de muestreo, esta permanecerá constante.

Los valores de las constantes proporcional, integral y derivativa se ajustaron experimentalmente, teniendo en cuenta que los conversores utilizados son de doce **bits**. Una posible ecuación sería:

$$GD(Z) = 0.5 + 0.19/(1-Z^{-1}) + 0.01*(1-Z^{-1})$$

Donde 0.5 es el valor de la constante proporcional, 0.19 es el valor de La constante integral y .0.01 es el valor de la constante derivativa.

Sin embargo es importante aclarar que estas constantes pueden variarse siempre por el usuario, al inicio del algoritmo de control.

Para implementar este sistema y específicamente el controlador PID, se hizo necesario desarrollar varias rutinas en el **microconvertidor 832**, las cuales se exponen a continuación.

**3.3.2 Rutina de Arranque.** Para arrancar adecuadamente la caldera el motor ventilador debe tener su velocidad nominal en un 70%, y la válvula debe tener una abertura de 0.55. Estos valores fueron determinados experimentalmente y corresponden a un voltaje de 7 Vdc en el variador y 6.4 Vdc en la válvula; según se explico en el capítulo anterior, los conversores digital – análogo del microcontrolador solo suministrarán la mitad de estos voltajes, los cuales son amplificados en el tarjeta acondicionadora. Esto implica que los DAC deben cargarse en B32H y A3CH.

El conversor DAC0 del microconvertidor, maneja el voltaje de control de la velocidad en el variador, y el conversor DAC1 el voltaje de control en la servovalvula.

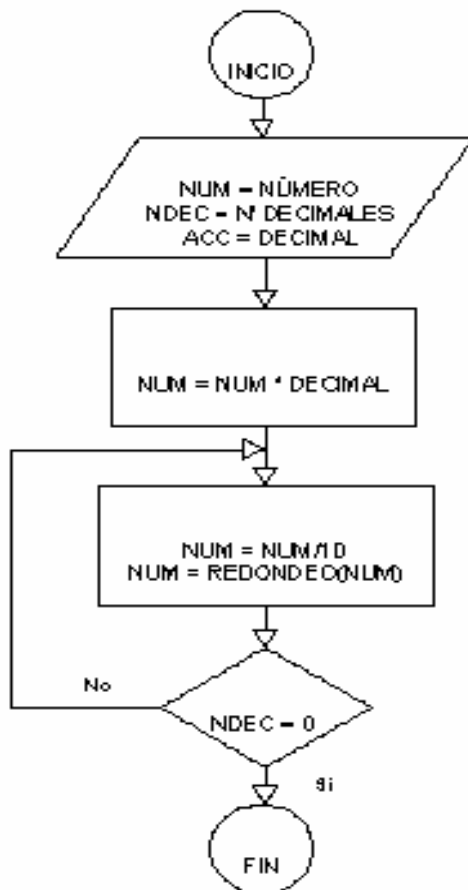
**3.3.3 Rutina Decimal.** Esta rutina permite multiplicar cualquier número entre 0H y FFFH (0 – 4095), esto es, todo numero de hasta 12 bits, por un decimal puro, por ejemplo 0.9, 0.007, 0.0008 etc. El número de ceros a la izquierda podría ser en teoría 256, pero dado que el máximo multiplicador es 4095, no tiene sentido hacer una operación con mas de cinco ceros a la izquierda, como por ejemplo  $4095 \times 0.000009$ , por que el resultado seria cero ( $0,03 \sim 0$ ).  $4095 \times 0.00009$  también daría cero porque el residuo es menor que cinco ( $0,36, 3 < 5$ , entonces  $0,36 \sim 0$ ). En cambio  $4095$  por  $0.0009$  daría 4 ( $3,6 \sim 4$ ).

El algoritmo se divide en dos partes, multiplicación por entero y divisiones por diez con redondeo al final. Así, si se desea multiplicar 75 por 0,09, la rutina multiplica primero 75 por 9, y luego realiza dos divisiones sucesivas por diez.

La rutina necesita que previamente se cargue en NUMH y NUML las partes alta y baja del número a multiplicar en hexadecimal, respectivamente, en NDEC el número de divisiones por diez, y en el acumulador el valor entero del decimal.

Esta rutina facilita la operación con decimales, haciendo posible una multiplicación por cualquiera de ellos, por ejemplo si deseásemos multiplicar FFFH (4095) por 0,999, bastaría con multiplicar primero FFFH x 0,9, luego FFFH x 0,09, después FFFH x 0,009 y finalmente sumar los tres resultados. El diagrama de flujo elaborado es el siguiente.

**.Figura 31. Diagrama de flujo rutina decimal**



**3.3.4 Introducción de las constantes PID.** Para introducir las constantes proporcional, integral y derivativa se elaboro una rutina similar a la rutina TECLADO explicada en el ítem 3.2.3, anexándosele la opción de reconocer punto decimal y almacenar hasta tres decimales por constante. La parte entera de cada constante se limito a 1 y la parte decimal entre 0,000 y 0,999, dado que experimentalmente se hallo este rango valido para realizar control sin perder estabilidad en el sistema.

Cada decimal es almacenado en una posición de memoria, para permitir con ayuda de la rutina DECIMAL la multiplicación por cada una de las constantes.

**3.3.5 Rutina PID.** El algoritmo de control PID permite regular la combustión de la caldera y por ende la presión de la misma. El algoritmo actúa sobre la válvula de combustible en tanto que el variador de velocidad del motor ventilador es regulado por otra rutina, que tiene como entrada los valores obtenidos del algoritmo PID. La rutina PID se ha dividido en dos partes:

**Primera Parte.** La primera parte del algoritmo ajusta el valor de presión insertado por teclado, a su correspondiente hexadecimal, con el cual se opera el algoritmo PID. Para determinar la ecuación de ajuste se tomaron experimentalmente los siguientes datos:

**Tabla 13. Datos experimentales para el ajuste de los valores de presión**

<b>VOLTAJE SENSOR (V D.C)</b>	<b>PRESION PSIs</b>	<b>RESOLUCION V/LSB</b>	<b>V. DECIMAL – SAL DIGITAL</b>	<b>VALOR HEX</b>
1,18	0	0,001221001	966,42	3C6
1,27	6,33		1040,13	410
1,35	13		1105,65	451
1,48	20		1212,12	4BC
1,53	25		1253,07	4E5
1,61	30		1318,59	526
1,71	35		1400,49	578
1,78	40		1457,82	5B1
1,84	45		1506,96	5E2
1,93	50		1580,67	62C
2	55		1638	666
2,07	60		1695,33	69F
2,16	65		1769,04	6E9
2,22	70		1818,18	71A
2,3	75		1883,7	75B
2,37	80		1941,03	795
2,44	85		1998,36	7CE
2,48	87		2031,12	7EF

Se realizó una interpolación lineal entre el valor de presión (columna dos) y el valor decimal de la salida digital (columna cuatro) y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\mathbf{VD = 12,3*P + 959 \text{ o } VD = C,3*P + 3BFH}$$

donde VD es el valor digital o hexadecimal, con el cual se puede operar la rutina PID en el microcontrolador, y P es el **set point** de presión. El coeficiente de determinación obtenido para la ecuación fue de 0,9994\*

---

\* El coeficiente de determinación compara los valores estimados y los valores reales. Fluctúa entre 0 y 1. Si es un la correlación es perfecta.

**Segunda Parte.** Calculado el valor hexadecimal para el **set point**, se desarrolla el algoritmo PID. Para esto se debe tener en cuenta que la señal de control en un instante de muestreo  $n$  de frecuencia fija es igual a :

$$U(n) = K_c e(n) + K_i s(n) + K_d [e(n) - e(n-1)]$$

Donde:

- ❖  **$e(n)$**  es el error actual, medido como la diferencia entre el valor deseado de presión y el valor medido por el sensor.
- ❖ **La acción proporcional es:**  $K_c e(n)$  siendo  $K_c$  la constante proporcional.
- ❖ **La acción integral es:**  $K_i s(n)$ , siendo  $K_i$  la constante integral y  $s(n) = s(n-1) + e(n)$ , la suma de los errores desde el instante 0 hasta el instante  $n$ .
- ❖ **La acción derivativa es:**  $K_d [e(n) - e(n-1)]$  siendo  $K_d$  la constante derivativa y  $e(n-1)$  el error anterior.

Por esto al desarrollar el algoritmo se calcula y pondera por separado el error, la suma de los errores (integral) y la diferencia del error actual y el anterior (derivativo) Finalmente se halla el valor PID sumando los resultados anteriores.

Este valor PID se encuentra en dos posiciones de memoria: en PIDL (la parte baja) y PIDH (la parte alta)

Se han tenido en cuenta todas las posibilidades en los signos de las operaciones, verbigracia: error negativo, derivativo negativo, suma positiva, etc., al tiempo que se ha hecho la corrección para los valores máximos y mínimos que puede tomar el valor PID, los cuales están determinados por el numero de bits de los conversores y las características propias del sistema, esto es de la combustión en la caldera. Experimentalmente se hallo que:

**Tabla 14. Valores De Apertura del Motor Ventilador y la Servoválvula**

VALORES MAXIMOS	VALORES MINIMOS
<b>VALVULA</b> 100% de apertura (DAC1 en FFFH)	<b>VALVULA</b> 30% de apertura (DAC1 en 733H)
<b>MOTOR</b> 100% de su velocidad nominal (DAC0 en FFFH)	<b>MOTOR</b> 51% de su velocidad nominal (DAC0 en 82CH)

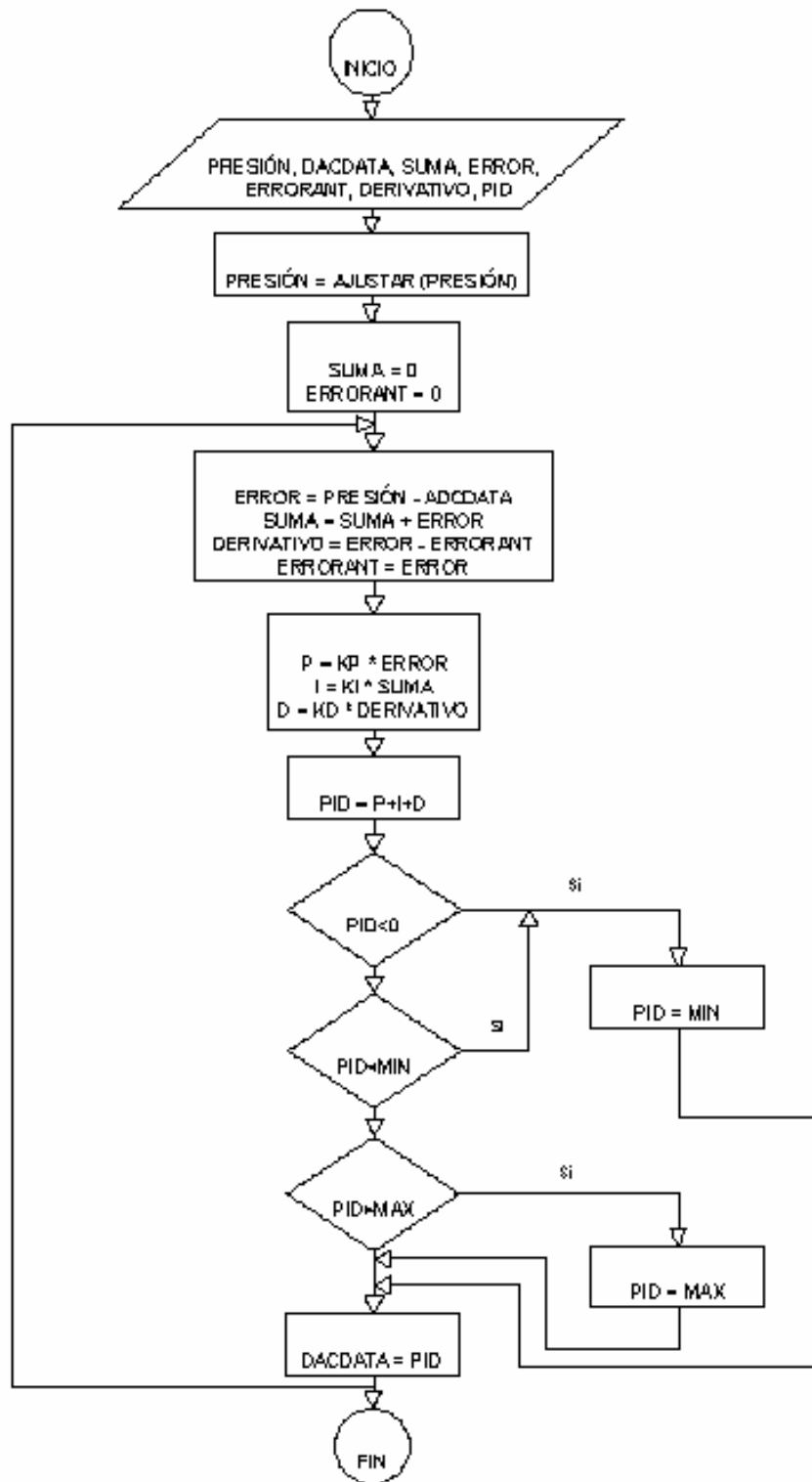
Valores por encima del máximo no son posibles dado que los conversores DA son de doce bits, y valores por abajo del mínimo no son posibles porque no producen combustión en la caldera.

El siguiente es el algoritmo implementado (Véase la Figura 32).

**3.3.6 Rutina Motor.** Dado que regular la combustión implica variar la mezcla aire - combustible que entra a la caldera, una vez obtenido del algoritmo PID el valor de apertura de la válvula de combustible, debe determinarse el valor correspondiente para el voltaje que regula la velocidad del motor ventilador.

De manera experimental se determino que la relación aire – gas no es lineal y que cambia según se este en incremento o decremento combustible. Una combustión adecuada puede verificarse al observar por la mirilla de la caldera si la llama generada es azul y constante, y si la operación de quemado se da sin sobresaltos.

Figura 32. Algoritmo PID



La curva aire gas fue linealizada para poder programarla en el **aduc** 832, obteniéndose las siguientes ecuaciones:

**Aumento de Combustible:**

**$MOTOR = 0,2*VALVULA + 9C1H$  o  $MOTOR = 0,2* VALVULA +6.1(V DC)$**   
(pid entre 800h y A3Ch)

**$MOTOR = 0,24*VALVULA + 93EH$  o  $MOTOR = 0,24*VALVULA + 5.8(V DC)$**   
(pid entre A3Ch y CCCh)

**$MOTOR = 0,43*VALVULA + 831H$  o  $MOTOR = 0,43*VALVULA + 5.1(V DC)$**   
(pid entre CCCh y FFFh)

**Disminución del Combustible:**

**$MOTOR = 0,24*VALVULA + 93EH$  o  $MOTOR = 0,24*VALVULA + 5.8(V DC)$**   
(pid entre CCCh y FFFh)

**$MOTOR = 0,2*VALVULA + 9C1H$  o  $MOTOR = 0,2* VALVULA +6.1(V DC)$**   
(pid entre 800h y CC)

Siendo MOTOR el voltaje de control del variador de velocidad del motor ventilador, y VALVULA el voltaje de control de la servoválvula de combustible que corresponde al valor PID calculado en el programa. La ecuación en voltios se obtiene al multiplicar los valores en hexadecimal por la resolución de los conversores DA (5/4095 para 12 bits) y por 2 dado que los voltajes de control varían de 0 a 10 V DC y no de 0 a 5 V DC.

Durante el funcionamiento del equipo se verifico que la relación aire – gas es mas estable durante el incremento de combustible para las ecuaciones establecidas. Sin embargo es aconsejable realizar mas estudios sobre esta relación, a fin de establecer funciones de apertura y cierre ideales. Al respecto el equipo diseñado permite variar por programación la pendiente de las funciones establecidas o implementar otras, dado que el aduc832 es reprogramable.

Las rutinas explicadas en los ítems 3.2 y 3.3 deben cargarse en los microcontroladores, para poder operar los equipos. El siguiente ítem expone como realizar esta operación.

### **3.4 ESCRITURA Y EJECUCION DE LOS PROGRAMAS**

Para la operación de encendido se desarrollo el programa **CALDER1** el cual incluye las rutinas expuestas en el ítem 3.2, y para la operación de control de presión se elaboró el programa **SECU1** el cual incluye las rutinas expuestas en el ítem 3.3.

Para escribir y ejecutar los programas se ejecutan tres pasos:

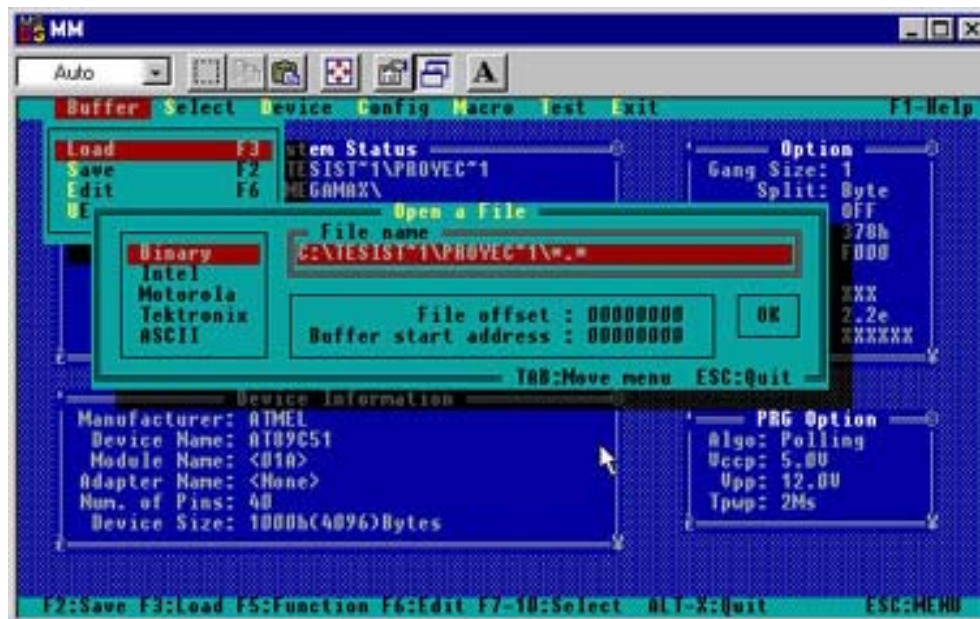
- ❖ **Operación de Editado.** En este paso se escriben los programas fuente. Para esta operación se utiliza un editor de notas (por ej. el bloc de notas de **Windows**) que permita escribir el programa utilizando exclusivamente caracteres ASCII. Los archivos que se obtengan se salvan con la extensión .ASM (para el caso CALDER1.ASM y SECU1.ASM)
- ❖ **Operación de Ensamblado:** La operación de ensamblado convierte el archivo fuente en un archivo hexadecimal (extensión .HEX) en el cual podrá ser cargado el microcontrolador. Este paso se llevo a cabo con la ayuda de un programa llamado “Ensamblador asm51”.
- ❖ **Operación de Ejecución:** La ejecución de los programas implica que estos sean cargados en la memoria EEPROM de los microcontroladores por medio del software y hardware adecuado.

**3.4.1 Ejecución en el ATMEL 89C52.** Para programar el microcontrolador **ATMEL 89C52** se debe convertir el archivo hexadecimal a su equivalente

binario (CALDER1.BIN) lo cual se hizo por medio del software “hexbin.exe”. Una vez hecho esto se utilizo el programador universal MEGAMAX (-4G) y el software MM.EXE para programar el dispositivo.

La comunicación entre el **MEGAMAX** y el **PC** se hace por el puerto paralelo; a su vez la programación de este microcontrolador también es paralela, a través de los puertos P0, P1 y P2.

**Figura 33. mm.exe (programador ATMEL 89C52)**



**3.4.2 Ejecución en el Microconvertidor 832.** A diferencia del **ATMEL 89C52** el **u832** puede programarse por el puerto serie del computador, razón por la cual solo se necesita una interfaz serial RS232 como la descrita en el capítulo anterior y un software para descargar el programa, que para el caso fue el “**Windows serial downloader**” (WSD.EXE) desarrollado en **labview** por **Analog Device**.

El WSD.EXE tiene una plantilla con las opciones: configuración, donde se determinan las características de la comunicación serial: puerto, velocidad, etc., **reset**, descarga (**download**) y ejecución (**run**). La opción de configuración y la plantilla principal se muestran a continuación:

Figura 34. Configuración u832

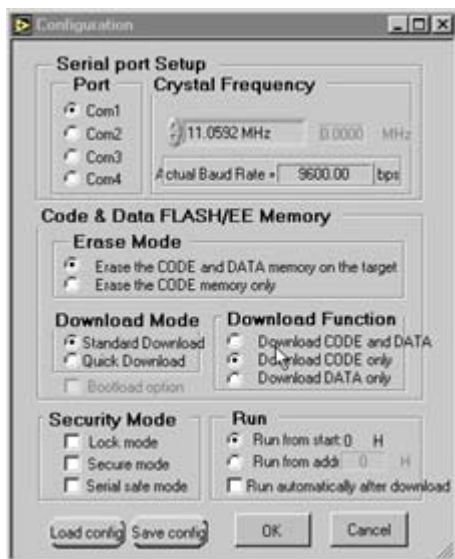
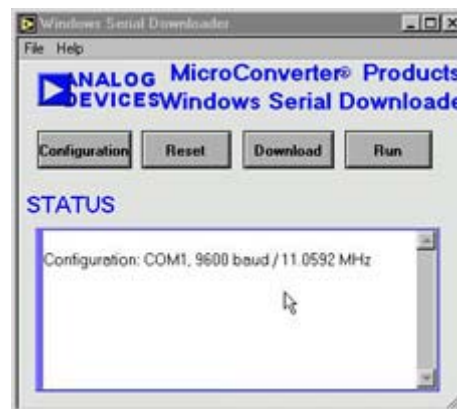


Figura 35. Programador wsd.exe



Para programar el u832, luego aplicar un **reset** y un pulso en el pin PSEN, se selecciona **Reset** en el WSD.EXE, acción que borra la memoria **Flash** del microcontrolador, y acto seguido por medio de **Download** se carga el programa deseado (para el caso SECU1.HEX)

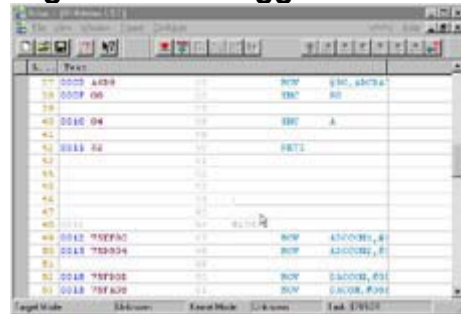
**3.4.3 Depuradores y Emuladores.** La programación de los microcontroladores se facilita bastante con la ayuda de un buen software depurador y emulador. En el desarrollo del proyecto se trabajó con los programas “Debugger51” que es un programa de libre distribución, depurador y emulador para los microcontroladores de arquitectura similar al 8051, y

“Accutron” de la empresa **Accutron Limited**, en su versión libre\*. Con ayuda de estos programas es posible corregir los programas línea por línea, antes de ser cargados a los respectivos dispositivos.

Figura 36. Debugger51



Figura 37. Debugger Accutron



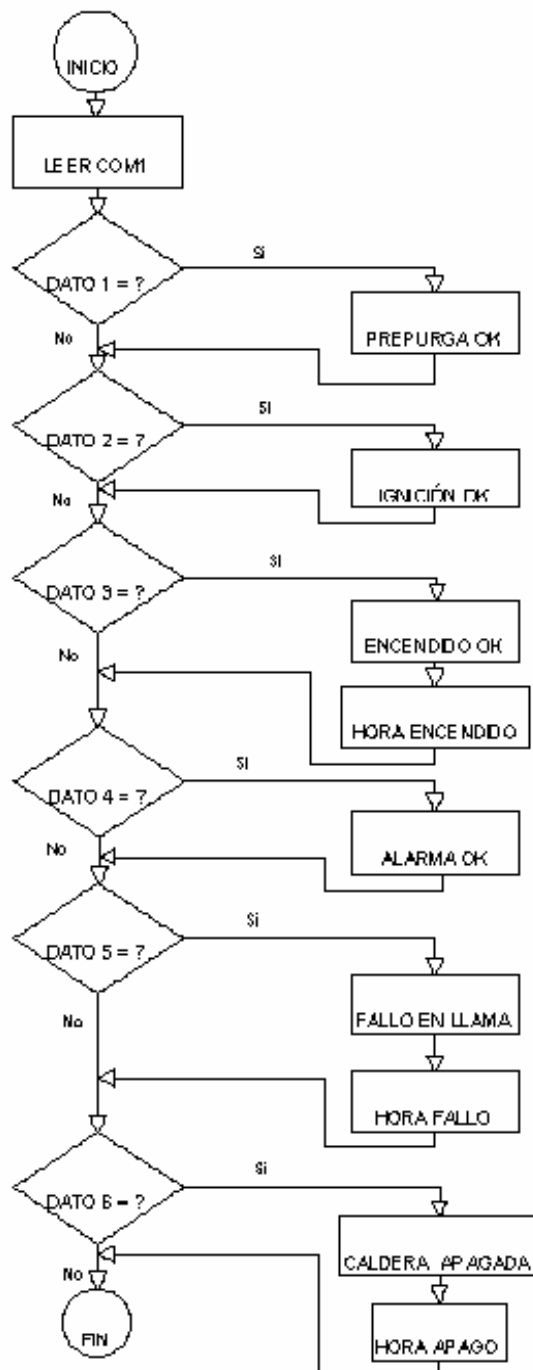
Explicadas las rutinas y la forma de cargarlas en los respectivos microcontroladores, se terminara este capitulo mostrando el algoritmo desarrollado en **labview**, para que el equipo que regula el encendido de la caldera reporte su estado a un PC.

### 3.5 COMUNICACIÓN SERIAL CON EL PC USANDO LABVIEW

El equipo que realiza el encendido de la caldera y mantiene encendida la misma, comunica por el puerto serie el estado de su operación, enviando una dato cada vez que se produce prepurga, ignición, fallo en llama, alarma, encendido y apagado de la caldera. Los datos anteriores son recibidos por el computador y por medio de un sencillo algoritmo en **labview** se visualiza el estado de operación de la caldera y se registra la hora de encendido, apagado y fallo en llama, esto siempre y cuando el PC se haya conectado al equipo durante la ocurrencia de estos eventos. El algoritmo hecho en **labview** fue el siguiente:

\* Mayor información en [www.amwaw.edu.pl/~adybkows](http://www.amwaw.edu.pl/~adybkows) y en [www.accutron.com](http://www.accutron.com) sobre el debugger51 y el degugger Accutron respectivamente.

Figura 38. Algoritmo Comunicación Serial con el PC.



## CONCLUSIONES

- Los equipos electrónicos desarrollados se han acoplado correctamente a las condiciones de trabajo del laboratorio de plantas térmicas (ambiente eléctricamente ruidoso) y ejecutado sus acciones de control de la manera esperada.
- El programador diseñado a partir de un *atmel* 89c51 realiza la secuencia de encendido de la caldera, manteniéndola en este estado mientras ninguna de sus variables de operación (llama, presión de aire o línea de mando) se hallen en un valor no apto para ello. De igual manera se ha logrado el reporte de la secuencia de encendido al **PC** por medio de una interfaz RS232 y *labview*, permitiéndose también el registro en un archivo de texto de la hora y fecha de encendido y apagado ò fallo de la caldera.
- Se consiguió caracterizar el Sensor de llama de la caldera, y se estableció que necesita una alimentación de 600 V AC, y que en presencia de llama circula por el una corriente que varía entre 2 y 4 mA, en dependencia de la intensidad de llama.
- Para el Sensor de llama se diseñó un circuito electrónico, basado en opto acoplador, comparadores e inversores, que permitió convertir sus valores de operación en niveles lógicos TTL aptos para ser entendidos por un microcontrolador. La sensibilidad alcanzada con dicho circuito permite detectar llama hasta distancias superiores a 2 m.

- El circuito diseñado para dar reset al programador de encendido y la rutina programada en el microcontrolador para secuenciar las acciones a seguir luego del mismo, aprovechando que la memoria **ram** de este no se borra luego de un reset, permiten un inicio de operación seguro en la caldera y un retorno rápido a su punto de operación cuando el microcontrolador se resetea por efecto del ruido eléctrico.
  
- Se diseñó una lógica de interrupciones en tres niveles: Línea de Mando, Línea de Mando y PAC, y Línea de mando, PAC y Llama. Esta lógica apaga la caldera cuando ocurre una falla en el PAC o en la llama y reinicia la secuencia si la línea de mando cae a un nivel bajo.
  
- Una conclusión importante obtenida de los circuitos de acople diseñados entre las entradas/salidas del microcontrolador (señales lógicas **TTL**) y las salidas/entradas de los controladores de la caldera (señales lógicas de 120 – 600 V AC) es que no basta con optoacoplar las líneas. A pesar de esto se encontró ruido de 60 HZ que fue eliminado por medio de capacitores electrolíticos de 47 uf a 100 uf.
  
- Se debe resaltar el cuidado en el diseño del circuito impreso y en la disposición de los circuitos en las tarjetas. Líneas de alterna cerca de las líneas TTL, pueden generar un voltaje en estas últimas en concordancia con la ley de Lenz ( $v = - \mathbf{NA} (dB/dt)^*$ ). Un caso evidenciado fue la alteración de la salida del circuito de llama, en el cual por la cercanía a las líneas de alimentación (600 VAC) se generaba un voltaje de 14 V AC 60 Hz. El caso fue corregido

---

\* donde A es el area del lazo de corriente implicado y N puede tomarse como 1

cambiando la disposición de los dispositivos implicados para alejarlos de las líneas de AC y filtrar las salidas TTL con condensadores electrolíticos de 100 uf.

- Se logró que el controlador de presión de vapor posicione la servoválvula proporcional de control de gas y la velocidad del motor ventilador por medio del variador de velocidad altivar, en los valores idóneos para un correcto encendido. De igual manera regula el paso del gas a la caldera y la cantidad de aire que se mezcla con este durante la combustión, en dependencia del valor nominal de presión seleccionado y de las constantes de control proporcional, integral y derivativa escogidas por el usuario.
- El controlador de presión diseñado permite también cambiar de forma dinámica durante el proceso de operación de la caldera, el valor del **set point** de presión y los valores de las constantes de control.
- Anexo al control de presión se ha desarrollado un algoritmo que permite la visualización de la presión de la caldera en este mismo equipo. Esta lectura de presión tiene un **offset** de 1 PSI, medido en condiciones de presión de vapor nula. Su resolución es también de 1 PSI, esto es, el mínimo cambio de presión que es visible en pantalla es 1 PSI. Esta posibilidad de lectura de presión permite sobre todo una verificación visual de la acción del algoritmo PID.
- Para una lectura adecuada de presión se diseñó un circuito de acople entre la salida del Sensor y la entrada al conversor en el u832, basado en un amplificador operacional. Se encontró que el circuito funciona

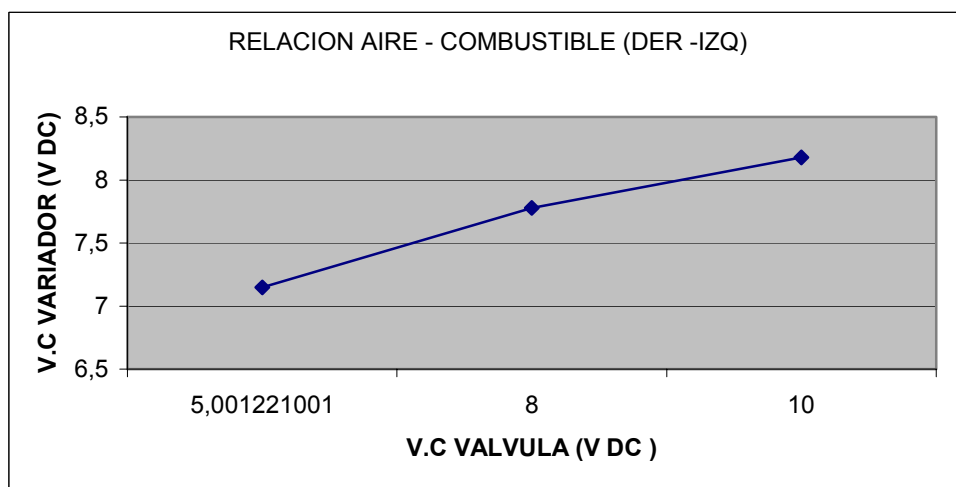
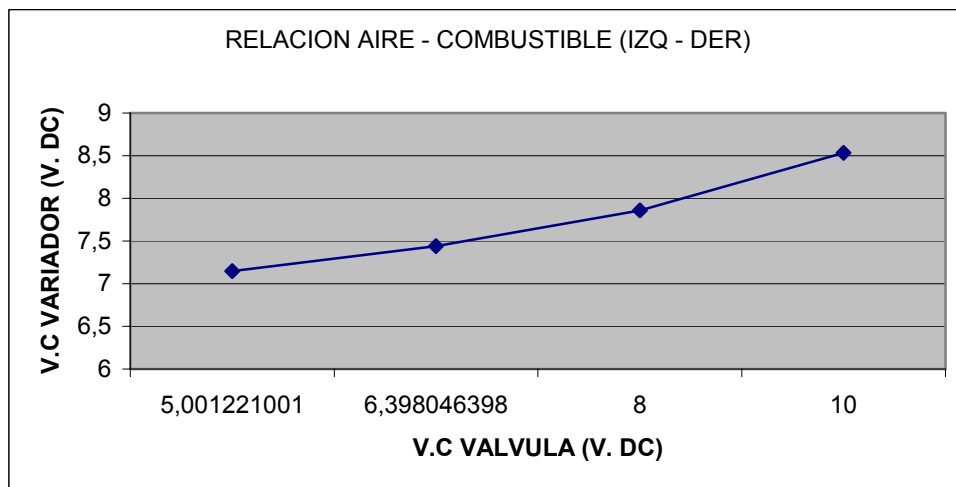
con mínimo error cuando el operacional es JFET (vg LF353) y la entrada y la salida se filtran con capacitores de tantalio de 100 pf.

- Los condensadores de tantalio tienen un valor de capacitancia de mayor precisión, y filtran mejor los ruidos de baja frecuencia que los cerámicos. Son recomendables para filtrar la alimentación de los integrados, en los circuitos RS232 y en los circuitos de acople de señal.
- Para el Sensor de presión utilizado y el conversor análogo digital del microconvertidor 832 (12 bits, resolución de 0,001221001 V/LSB) se estableció la siguiente ecuación de ajuste:

$$\text{▪ } \mathbf{VD = 12,3 * P + 959} \text{ o } \mathbf{VD = C,3 * P + 3BFH}$$

- Siendo **VD** el valor decimal equivalente al valor hexadecimal con el cual puede operar el algoritmo PID, y **P** es el **set point** de presión establecido por el operario del equipo.
- Los valores mínimos de apertura de la servoválvula de control de gas y de velocidad del motor ventilador para que la caldera se mantenga encendida se establecieron en 0.3 (en un rango de 0 a 1, 33% de apertura) para la Válvula, y en 5 (en un rango de 0 a 10, 50% de la velocidad máxima) para el variador de velocidad del motor ventilador.
- De igual manera los valores de inicio de combustión fueron establecidos experimentalmente en 0.55 para la servoválvula (55% de apertura) y en 7 para el variador de velocidad (70% de la velocidad máxima)

- Se logró establecer experimentalmente una relación matemática entre la apertura de la servoválvula de control de combustible y la velocidad del motor ventilador necesaria para que se produzca equilibrio en la mezcla aire – gas, con el fin de obtener una combustión apropiada (llama azul). La graficas obtenidas fueron las siguientes:



- Se recomienda continuar el estudio de la relación aire – gas con el fin de obtener ecuaciones de apertura y cierre ideales. Se comprobó que

el algoritmo PID regula bien la apertura de la válvula de combustible, pero que este por si solo no puede controlar la relación aire combustible, razón por lo cual se establecieron funciones empíricas. El desarrollo del proyecto muestra viable un posterior estudio que controle esta relación por medio de un control **Fuzzy**, manteniendo el algoritmo PID para la servoválvula.

- En el desarrollo del algoritmo PID es necesario tener en cuenta que la acción debe parar si la sumatoria de la integral excede el máximo permitido (valor máximo de apertura de la servoválvula) y el siguiente error es positivo. En este caso los valores de salida deben permanecer constantes en el máximo hasta que se obtenga un error negativo.
- De otra manera, si la sumatoria de la acción integral esta en el mínimo (mínimo valor de apertura de la servoválvula) y el error es negativo, el algoritmo PID debe parar y mantener los valores de apertura en sus puntos mínimos, para que no se apague la caldera por falta de gas.

## **BIBLIOGRAFIA**

**OPERACIÓN DE CALDERAS INDUSTRIALES**, Gonzalo Rodríguez Guerrero, ECOE Ediciones, primera edición, Bogotá, abril de 2000.

**INTRODUCCION A LOS MICROCONTROLADORES**, José Adolfo González Vázquez, McGraw – Hill, tercera edición, año 2000.

**EMBEDDED APPLICATIONS**, Intel, Intel Literature Center, año 1999.

**INSTRUMENTACION INDUSTRIAL**, Antonio Creus, Alfa Omega. 1999.

**LABVIEW, PROGRAMACIÓN GRÁFICA PARA EL CONTROL DE INSTRUMENTACIÓN**, LAZARO, Antonio, Manuel, Paraninfo, España 1996.

**AUTOMATAS PROGRAMABLES**, Balcells, Josep Romeral, José Luis, Alfa omega, marcombo, España 1997.

**OPTIMIZACION DEL SISTEMA DE REGULACION Y CONTROL DE COMBUSTION EN LA CALDERA DEL LABORATORIO DE PLANTAS TERMICAS**, Mario Alexander Sandoval Pacheco, Néstor José León Niño, TESIS DE GRADO ING. MECANICA UIS 1995