

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería en Electrónica**



**Florida Ice & Farm Co.**

**“Diseño de un sistema de control automático para mejorar la eficiencia de combustión en una caldera industrial”**

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

**Gustavo Rojas Soto**

**Cartago, Agosto de 2005**

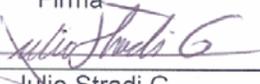
INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA  
PROYECTO DE GRADUACIÓN  
TRIBUNAL EVALUADOR

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

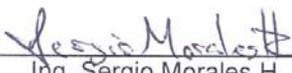
Miembros del Tribunal

Firma  
  
Ing. Victorino Rojas M.

Profesor lector

Firma  
  
Ing. Julio Stradi G.

Profesor lector

Firma  
  
Ing. Sergio Morales H.

Profesor asesor

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

Cartago, 5 de agosto de 2005

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

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

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



Gustavo Rojas Soto

Céd: 2 - 565 - 797

Cartago, 9 de Agosto del 2005

## RESUMEN

La competitividad, el cumplimiento de normas y estándares, el máximo aprovechamiento de los recursos disponibles para producir, y otros factores que son la base para generar nuevas soluciones a los nuevos problemas que enfrenta el ser humano, en su afán de obtener la solución más sencilla, económica y que le brinde los mejores resultados, es que, la investigación a partir de las tecnologías existentes y de los resultados obtenidos hasta hoy en día se convierten en el fundamento para el desarrollo de mejores soluciones.

El área de las ingenierías brinda un aporte en conocimiento muy valioso que puede ser traducido o aplicado a la búsqueda de soluciones que estén al nivel tecnológico que exige la sociedad. El medio ambiente constantemente sufre las consecuencias directas e indirectas del desarrollo tecnológico en el uso de recursos naturales que son procesados (entalpía) a diferentes niveles de transformación generando nuevos materiales que son el producto de las reacciones químicas entre ellos y son devueltos al medio ambiente de modo que no son fácilmente transformados a su estado inicial debido a las propiedades químicas que presentan. Junto con esto está la utilización de energía que es requerida para llevar el proceso o transformación de un recurso natural a un material. Esta energía en muchas ocasiones produce también derivados que contaminan el ambiente (agua, suelo, aire, etc.) provocando una alteración o modificación en el entorno en que el ser humano realiza sus actividades, produciéndole un daño o afectándolo de forma directa.

El proyecto desarrollado se fija en una caldera pirotubular con una potencia de 1000 caballos caldera que es utilizada en una empresa que se dedica a la producción de cerveza, utilizando el vapor para el cocimiento de la materia prima (cereales, lúpulo, etc.), procesos de pasteurización y lavado de cajas y botellas donde se almacena el producto terminado. Esta caldera utiliza aceite combustible número 6 con un contenido de metales contaminantes como el vanadio y el níquel junto con otros elementos que presentan algunos inconvenientes en la combustión.

Con la finalidad de mejorar la eficiencia de combustión para disminuir el consumo de combustible y la producción de gases que se originan en la combustión, los cuales son regulados por las leyes costarricenses es que surge la necesidad de crear un sistema de control más eficiente que el actual, capaz de mejorar la eficiencia de la caldera.

Palabras Clave: Combustión, búnker, eficiencia, microcontrolador, sensor, actuador, transmisor, caldera.

## ABSTRACT

The competitiveness, the fulfillment of procedures and standards, the maximum utilization of the available resources to produce, and other factors that are the base to generate new solutions to the new problems that the human being faces, in your zeal to obtain the solution more simple, economic and that it offers the best results, is that the investigation from the existing technologies and the results obtained up to today they turn into the fundament for the development of better solutions.

The area of the engineering's offers a contribution in very valuable knowledge that can be translated or applied to the search of solutions that are to the technological level that the society demands. The environment constant suffers the direct and indirect consequences of the technological development in the use of natural resources that are tried (enthalpy) at different levels of transformation generating new materials that are the product of the chemical reactions between them and are returned to the environment so that they are not easily transformed at your initial condition due to the chemical properties that they present. Together with this one the utilization of energy that is needed to take the process or transformation of a natural resource to a material. This energy in many occasions produces also derivatives that contaminate the environment (water, soil, air, etc.) causing an alteration or modification in the environment in that the human being realizes your activities, producing a damage or affecting himself directly.

The developed project fixes in a boiler pirotubular with a power of 1000 horses boiler that is used in a company that one dedicates to the production of beer, using the steam for the cooking of the raw material (cereals, hop, etc.), processes of pasteurization and wash of boxes and bottles where the finished product is stored. This boiler uses combustible oil number 6 with metal content pollutants as the vanadium and the nickel together with other elements that present some disadvantages in the combustion.

With the purpose of improving the efficiency of combustion to get a low consumption of fuel and the gas production that they originate in the combustion, which are regulated by the Costa Rican laws there is that it arises the need to create a system of control more efficient than current, capable of improving the efficiency of the boiler.

Keywords: Combustion, bunker, efficiency, microcontroller, sensor, actuator, transmission, steam boiler.

## DEDICATORIA

A mi familia por todo el apoyo que me brindaron durante mi estudio universitario, económico, comprensión y dedicación en los buenos y en los malos momentos, quienes me ayudaron a perseverar y enfrentar algunas de las pruebas más difíciles. En especial a mi madre que ha entregado muchos de sus anhelos y sueños por cumplir los míos. Que Dios los guarde, les muestre la verdad y los conduzca por caminos de justicia siempre.

## AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por haberme dado la sabiduría para ganar cada una de las materias. Quiero agradecerle a mi novia Melissa Fernández por su esmero en verme triunfar continuamente, a mis compañeros de carrera universitaria en especial a Guillermo Zúñiga por haber cumplido juntamente muchas de las tareas asignadas exitosamente. Mis amigos que siempre animaron los momentos de mayor inquietud. A todos los cristianos que pusieron sus oraciones delante de Dios para salir adelante en todo momento. A cada uno de los profesores que dieron su mejor esfuerzo para transmitir sus conocimientos. A todos ellos muchas gracias.

## ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1:	INTRODUCCIÓN-----	13
1.1	Problema existente e importancia de su solución-----	14
1.2	Solución seleccionada-----	18
1.3	Descripción general de la solución-----	22
1.4	Requerimientos y restricciones-----	25
CAPÍTULO 2:	META Y OBJETIVOS-----	26
2.1	Meta-----	26
2.2	Objetivo general-----	26
2.3	Objetivos específicos-----	26
2.3.1	Objetivos de hardware-----	26
2.3.2	Objetivos de software-----	27
2.3.3	Objetivos de documentación-----	27
2.3.4	Objetivos de implementación-----	27
CAPÍTULO 3:	MARCO TEÓRICO-----	28
3.1	Descripción del proceso a mejorar-----	28
3.2	Antecedentes Bibliográficos-----	30
3.3	Descripción de los principales principios físicos y electrónicos relacionados con la solución del problema-----	33
CAPÍTULO 4:	PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO-----	34
4.1	Reconocimiento y definición del problema-----	34
4.2	Obtención y análisis de la información-----	34
4.3	Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución-----	34
4.4	Implementación de la Solución-----	35
4.5	Reevaluación y rediseño-----	36
CAPÍTULO 5:	DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA SOLUCIÓN (EXPLICACIÓN DEL DISEÑO)-----	41
5.1	Análisis de soluciones y selección final-----	41
5.2	Descripción del hardware-----	48
5.2.1	Selección e implementación del controlador-----	48
5.2.2	Acondicionadores de entrada para las señales provenientes del sensor de oxígeno y del transmisor de presión-----	52
5.2.3	Transmisor de presión-----	53
5.2.4	Diseño del Acondicionador de señal-----	58
5.2.5	Sensor de oxígeno-----	60
5.2.6	Etapas de salida para el control de los actuadores-----	64
5.2.7	Convertidor de señal digital a analógico-----	68
5.3	Descripción del software-----	70
CAPÍTULO 6:	ANÁLISIS DE RESULTADOS-----	82
6.1	Resultados-----	82
6.1.1	Obtención de curva característica-----	82
6.1.2	Secuencia de encendido en modo automático-----	84
6.2	Análisis de Resultados-----	89
CAPÍTULO 7:	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES-----	97
7.1	Conclusiones-----	97
7.2	Recomendaciones-----	98
CAPÍTULO 8:	BIBLIOGRAFÍA-----	99
CAPÍTULO 9:	APÉNDICES-----	100
9.1	Abreviaturas-----	100
9.2	Glosario-----	100
9.3	Información sobre la empresa-----	102
9.3.1	Descripción de la Empresa-----	102
9.3.2	A.3.2 Descripción del departamento o sección en la que se realizó el proyecto-----	103
9.4	Manual de Usuario-----	104

CAPÍTULO 10:	ANEXOS -----	106
10.1	Relaciones de eficiencia de combustión para diferentes variables -----	106
10.2	D.2 Propiedades del Búnker y el aire considerando algunos de los efectos en la combustión.-----	108
10.3	Efectos del Azufre en la salud humana, producto de la combustión de búnker ---	110
10.4	Descripción del controlador Honeywell Series 7800. -----	111
10.5	Operación del actuador Honeywell -----	112
10.6	D.6 Planos eléctricos del diseño de hardware -----	113

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.2.1	Porcentajes de CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> en una combustión correcta para diferentes tipos de aceites -	32
Tabla 4.5.1	Parámetros y especificaciones del procesador SmartCat BL2100 -----	37
Tabla 4.5.2	Parámetros y especificaciones del variador de velocidad AC Tech 60 hp -----	39
Tabla 5.2.1	Características del transmisión de presión Wika ECO – 1 -----	53
Tabla 5.2.2	Valores de corriente experimentales para la presión de vapor del transmisor de presión marca WIKA con un rango de operación de 0 – 200 p.s.i-----	55
Tabla 5.2.3	Características del transmisión de oxígeno AZ100 operación de 0 – 100% -----	60
Tabla 5.2.4	Posición del aspa en función de la corriente de entrada-----	65
Tabla 5.2.5	Posición del aspa en función del voltaje de entrada -----	65
Tabla 6.1.1	Datos obtenidos para la curva característica de la caldera Kewanee -----	82
Tabla 6.1.2	Apertura de la válvula de combustible en el tiempo para el encendido (Modulación) -----	84
Tabla 6.1.3	Valores obtenidos para la modulación después de alcanzar la presión de operación en porcentaje de apertura del combustible y entrada de aire (Modulación) -----	85
Tabla 6.1.4	Datos del porcentaje de apertura y aire a partir de la operación manual de la caldera para variar la presión de vapor en la salida-----	87
Tabla 10.1.1	Resultados analíticos de la caldera Kewanee 1000 hp (06 / 12 / 2004) -----	106
Tabla 10.2.1	Propiedades del Búnker aceite # 6 -----	108
Tabla 10.2.2	Composición del Aire-----	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1 Diagrama de bloques del proceso de generación de vapor de agua y agua caliente ----	15
Figura 1.1.2 Descripción del Proceso de Combustión -----	16
Figura 1.2.1 Esquema del control actual de la caldera Kewanee -----	19
Figura 1.2.2 Secuencia de encendido, marcha y apagado de la caldera Kewanee, programador Honeywell 7800-----	20
Figura 1.2.3 Caldera Kewanee 1000 hp -----	22
Figura 1.3.1 Modulación del controlador Honeywell con actuador series 90 -----	23
Figura 1.3.2 Modulación del controlador diseñado utilizando 2 actuadores series 90 -----	23
Figura 1.3.3 Diagrama de bloques de la solución diseñada y desarrollada-----	24
Figura 3.1.1 Diagrama de flujo de la secuencia de operación de la caldera Kewanee 1000 hp -----	28
Figura 3.1.2 Control proporcional de presión para la posición del motor modulador -----	29
Figura 4.5.1 a) LCD/Equipad b)Kit de desarrollo SmarCat BL2100-----	37
Figura 4.5.2 Variador de velocidad 60 hp maraca AC Tech -----	39
Figura 5.1.1 Esquema fundamental de los actuadores que intervienen en el proceso de combustión	41
Figura 5.1.2 Control de combustión utilizando dos etapas o controladores diferentes-----	44
Figura 5.1.3 Etapa de control implementada para mejorar la eficiencia de combustión -----	46
Figura 5.2.1 Microcontrolador PIC16F877A -----	48
Figura 5.2.2 Controlador diseñado utilizando microcontroladores microchip PIC16F877 -----	50
Figura 5.2.3 Selección de canales analógicos para la conversión A/D interna en PIC16F877-----	52
Figura 5.2.4 Transmisor de presión WIKA 0 – 200 p.s.i código #8292426-----	53
Figura 5.2.5 Conexión del transmisor de presión con fuente de alimentación y acondicionador de señal (CAS)-----	54
Figura 5.2.6 Funciones de entrada y salida para el diseño del acondicionador de señal para el actuador de presión WIKA. -----	56
Figura 5.2.7 Diagrama de bloques para el acondicionador de señal-----	58
Figura 5.2.8 Circuito acondicionador de señal para el transmisor de presión-----	59
Figura 5.2.9 Sensor y analizador de oxígeno AZ100 marca ABB -----	60
Figura 5.2.10 Funciones de entrada y salida para el diseño del acondicionador de señal para el actuador de Oxígeno Z100-----	61
Figura 5.2.11 Diagrama de bloques para el acondicionador de señal -----	63
Figura 5.2.12 Circuito acondicionador del transmisor de oxígeno-----	63
Figura 5.2.13 Motor modulador Honeywell IV M9484F1007-----	64
Figura 5.2.14 Motor odutrol serie 90 (0-135 ohm) con control 4-20 mA-----	64
Figura 5.2.15 Voltaje de entrada generado por la fuente de corriente de 4 – 20 mA -----	66
Figura 5.2.16 Posición del motor modulador en función de la corriente de entrada producido por la fuente de alimentación -----	66
Figura 5.2.17 Fuente de control y circuito controlador de posición-----	66
Figura 5.2.18 Convertidor digital analógico MC1408-8-----	68
Figura 5.2.19 Etapa de acople para el manejo del motor modulador de aire y combustible-----	69
Figura 5.3.1 Diagrama de flujo del programa del microcontrolador PIC16F877 #1 -----	71
Figura 5.3.2 Diagrama de flujo de la subrutina de control para la selección de operación (Manual – Automático) -----	72
Figura 5.3.3 Diagrama de flujo de la subrutina para cargar la curva característica de la caldera Aire- Combustible -----	74
Figura 5.3.4 Diagrama de flujo para la selección del valor de aire para la curva característica -----	75
Figura 5.3.5 Diagrama de flujo de la selección y almacenamiento del valor de oxígeno de operación de la caldera Kewanee 1000 hp -----	76
Figura 5.3.6 Diagrama de flujo de la microrutina programada para la selección del valor de presión de vapor de salida de la caldera -----	76
Figura 5.3.7 Diagrama de flujo de la microrutina para la operación manual, programado en PIC16F877 #2-----	77

Figura 5.3.8 Diagrama de flujo de la microrutina para la operación automática, programado en PIC16F877 #2-----	78
Figura 5.3.9 Diagrama de flujo de la rutina de verificación de variables para el control automático, programado en el PIC16F877 # 2-----	79
Figura 6.1.1 Curva característica de la caldera Kewanee relación Aire – Combustible-----	83
Figura 6.1.2 Gráfica de encendido en función del tiempo para la etapa de modulación-----	84
Figura 6.1.3 Grafica de apertura del aire y combustible para etapa de modulación automática-----	86
Figura 6.1.4 Grafica de apertura del aire y combustible para etapa de modulación manual -----	88
Figura 9.3.1 Organigrama de la Empresa -----	102
Figura 9.3.2 Organigrama del la empresa y área de desarrollo del proyecto (calderas)-----	103
Figura 10.1.1 Eficiencia de Combustión para el exceso de oxígeno para diferentes combustibles--	106
Figura 10.1.2 Eficiencia de combustión para la temperatura de salida de los gases -----	107
Figura 10.4.1 Estructura interna del controlador Honeywell -----	111
Figura 10.5.1 Circuito de control para el motor modulador M9484E-----	112

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

El desarrollo de la ingeniería ha evolucionado el mercado de los productos (software y hardware) para el control de sistemas que ejecutan procesos productivos. Ante la inminente preocupación y competencia es que el método científico, el ingenieril y todos los métodos que abarcan las ciencias, designan procedimientos para la implementación de soluciones que mejoren los resultados actuales.

El diseño creado e implementado es precisamente esto lo que logra hacer, tomar un sistema de control que no brinda los mejores resultados en lo referente a monitorización de emisión de gases, donde la eficiencia depende gran parte del diseño de fábrica y de ajustes mecánicos para la obtención del punto óptimo de operación.

En este documento se presenta cada uno de los pasos realizados para la obtención y cumplimiento de los objetivos planteados. Con la recolección de información del funcionamiento de la caldera y de cada uno de los factores que intervienen en el proceso para la producción de vapor de agua, es que se inicia el desarrollo del proyecto, todo esto con el fin de no dejar de lado ni pasar por encima los detalles mínimos que después de mucho trabajo impliquen un rediseño, aunque difícilmente se llega a los resultados deseados se minimiza la inversión de tiempo y dinero extra.

En una combustión existen tres elementos necesarios, el oxígeno, una chispa o llama y un material orgánico, una vez mezclados estos tres elementos se presentan reacciones químicas que proporcionan emisiones de gases y descomposición de materiales. En un sistema de combustión de calderas sucede lo mismo, se tiene un combustible del tipo aceite # 6 que es un derivado del petróleo, una llama chispa que genera una llama y el aire que contiene cantidades suficientes de oxígeno para efectuar la combustión.

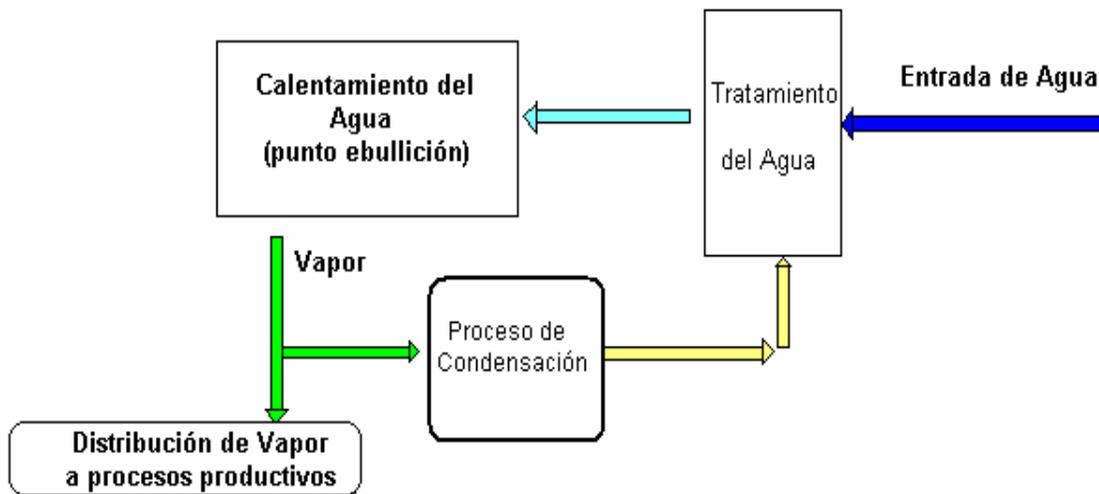
En principio una combinación de estos donde se pueda obtener un equilibrio determinara la eficiencia de la combustión, donde no exista ni un exceso de aire ni tampoco un exceso de combustible, sino que estén en sus valores adecuados para obtener el punto de máxima eficiencia.

Paso a paso se determina cada uno de los bloques diseñados y el acople entre cada uno de ellos para obtener finalmente el diseño completo del sistema de control que maneja el sistema de combustión de la caldera.

### **1.1 Problema existente e importancia de su solución**

La tendencia de la industria es poder producir a un bajo costo disminuyendo los recursos utilizados. En la empresa Florida Ice & Farm tienen fuertes políticas de ahorro mediante la eficiencia en los procesos productivos. En la actualidad la empresa tiene algún tipo de pérdidas económicas por la mala utilización o falta de control en algunas de sus áreas de producción energética. Específicamente para la producción de cerveza se requiere energía para el cocimiento de la materia prima (mosto), el lavado de botellas (esterilización) y otros procesos que requieren de agua caliente o vapor de agua.

Para la producción del vapor de agua y agua caliente se sigue un procedimiento muy elaborado para obtener la energía necesaria en cada proceso de producción de cerveza que lo necesita.



**Figura 1.1.1** Diagrama de bloques del proceso de generación de vapor de agua y agua caliente

Con este esquema de la Figura 1.1.1 se obtiene una idea muy general de procesos requerido para la generación del agua caliente y vapor de agua en algunos de los procesos para la producción de cerveza.

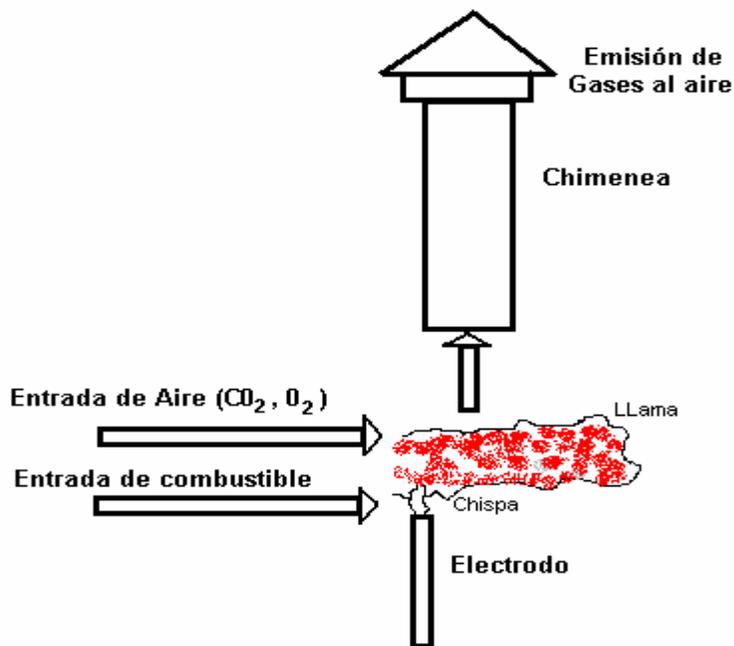
La cantidad de recursos necesarios en este proceso son bastante elevados. Los recursos consumidos son aproximadamente 2000 litros por hora, 280 galones de combustible por hora, gas para el preencendido de las calderas, energía eléctrica para el movimiento de motores de alto consumo de potencia (motores trifásicos 60 hp), además de otros fenómenos físicos y químicos presentes en el proceso de combustión que requieren energía.

En la actualidad el proceso tiene un control que activa una secuencia de procedimiento para la puesta en marcha de de las calderas<sup>1</sup> que son las encargadas de calentar el agua para producir el vapor.

<sup>1</sup> Contenedor metálico que utiliza la transferencia de calor para llevar el agua que tiene contenida hasta el punto de ebullición para generar vapor de agua.

Esta secuencia toma en cuenta una serie de tiempos, señales provenientes de sensores de temperatura, presión, luz, nivel del agua dentro del tanque de calentamiento. Todo esto lo realiza un sistema de control que se encarga de encender y apagar el sistema mediante electro-válvulas (paso de gas, combustible y aire), electrodos (generar chispa) a partir de las variables monitoreadas.

El problema nace o radica fundamentalmente en el proceso de combustión, debido a que existe un porcentaje de aire y combustible que son óptimos para generar una llama que caliente lo necesario para llevar al punto de ebullición el agua. Esto con el fin de que no exista un exceso de consumo de combustible que pueda generar una incorrecta combustión para el proceso requerido y como consecuencia la emisión de gases contaminantes hacia el aire. El sistema de control actual esta obsoleto y no tiene precisión del proceso de combustión por lo que hace ineficiente el funcionamiento de la caldera.



**Figura 1.1.2** Descripción del Proceso de Combustión

El control existente se encarga únicamente de monitorear la presión, nivel de agua y temperatura en diferentes puntos de la caldera y funciona como un control on-off (encendido-apagado) para regular su funcionamiento. A partir de estos datos el sistema de control hace las proyecciones necesarias para determinar que válvula debe abrir o cerrar para mantener la combustión en el valor deseado. Este sistema es muy ineficiente ya que por desgaste de los resortes, piezas mecánicas, e inclusive en la composición del combustible no regula de forma precisa la emisión de gases que se generan en la combustión.

Una mala combustión en las calderas genera pérdidas económicas por el consumo extra de combustible y contaminación en el aire, lo que tiene implicaciones legales importantes que son reguladas por le MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía) y el Ministerio de Salud que pueden significar multas importante e inclusive la detención de la operación de las calderas, paralizando por completo el proceso productivo de forma general.

Si el problema es resuelto se obtienen los siguientes resultados:

Disminución en el consumo de combustible (búnker, aceite #6).

Estar dentro de los rangos establecidos por la ley N° 30222-S-MINAE.

Estar en armonía con el ambiente y con la salud de los empleados de la empresa y vecinos de la comunidad.

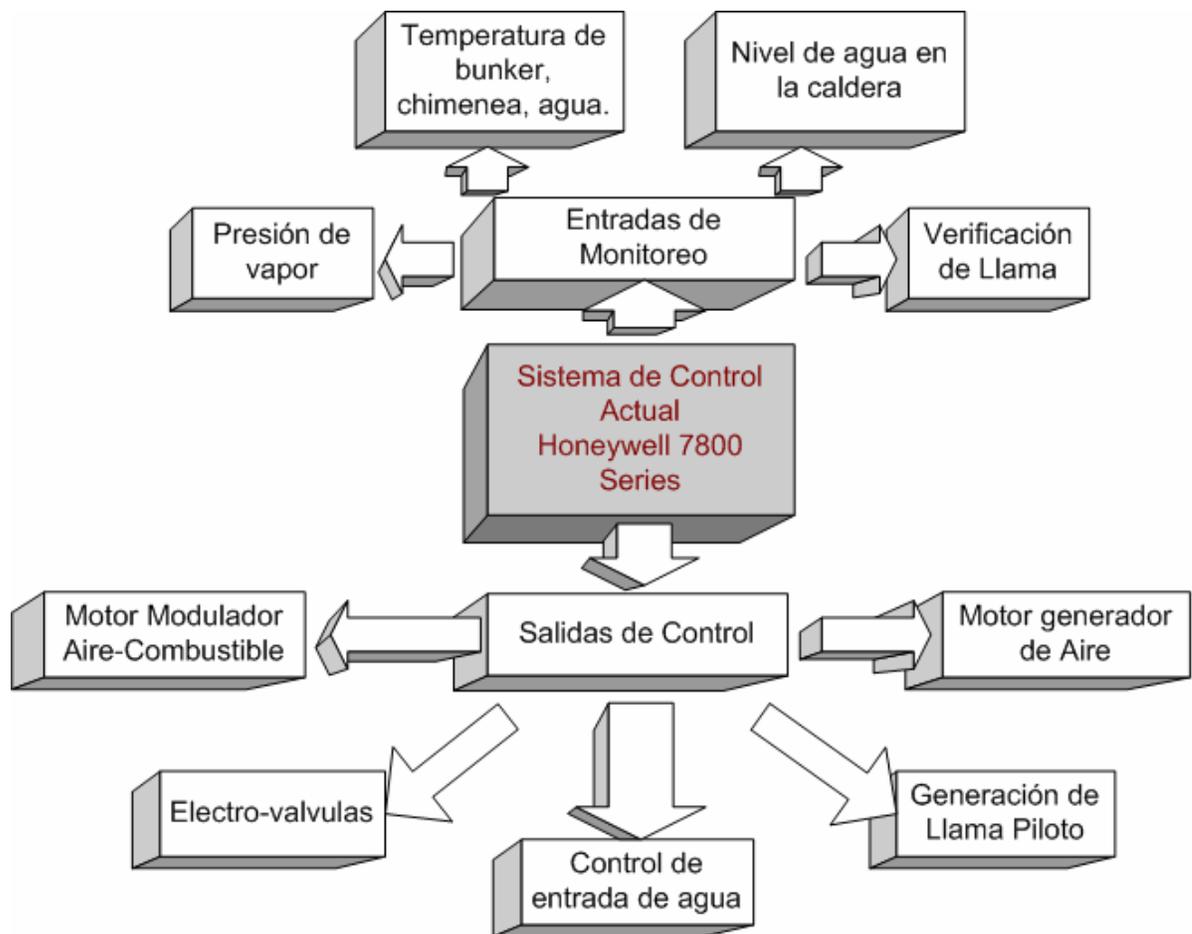
Decremento de la energía eléctrica para producir el aire el los quemadores de la caldera

## 1.2 Solución seleccionada

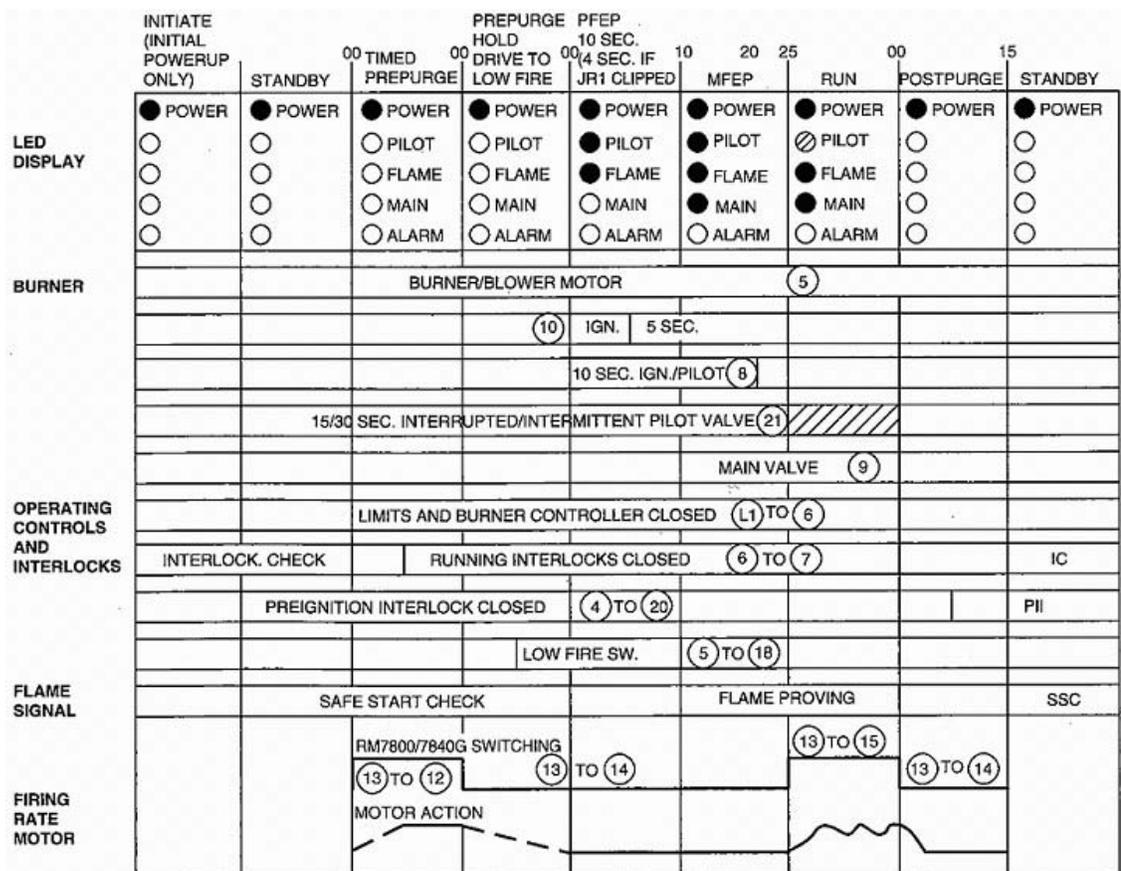
En primera instancia se procedió a la adquisición de datos e información para conocer el funcionamiento completo de la caldera, incluyendo la utilización del vapor de agua en los procesos productivos.

### Características del controlador actual de la caldera

El controlador actual marca Honeywell se encarga de monitorear la temperatura en diferentes puntos de la caldera, chimenea, combustible, agua. Además verifica la presión de vapor de la caldera, la presencia de llama y el nivel de agua presente en las tuberías por donde circula la misma. Tomando cada una de estas variables le permite determinar o controlar las variables de salida como lo es la apertura o cierre de electro-válvulas para el paso de combustible, aire y agua. También se encarga del manejo de la acción del actuador que controla la relación aire-combustible dependiendo de la presión de vapor actual del sistema mediante un control proporcional que retroalimenta el sistema. La generación de la llama piloto, la temporización de cada uno de los pasos y acciones para el encendido y apagado son manejados por el controlador quien también determina la presencia de errores en el sistema generando una detención o indicación por medio de alarmas de la falla existente.



**Figura 1.2.1** Esquema del control actual de la caldera Kewanee



**Figura 1.2.2** Secuencia de encendido, marcha y apagado de la caldera Kewanee, programador Honeywell 7800

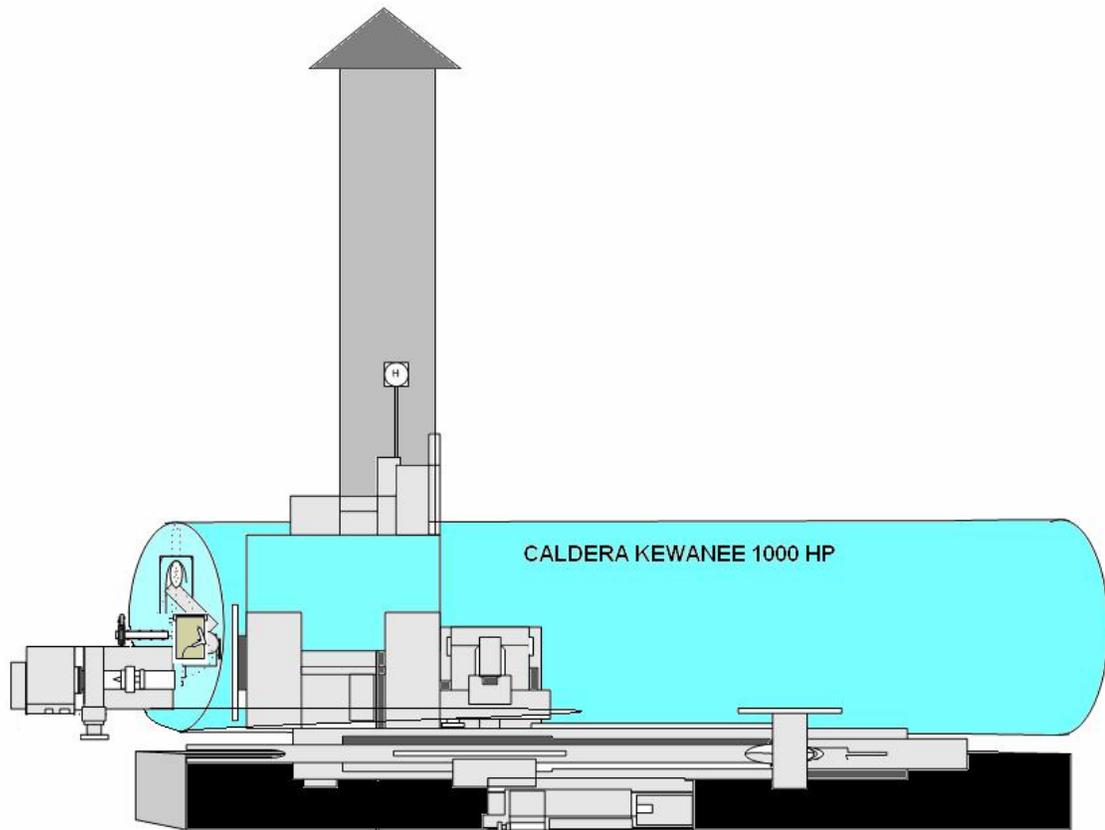
La secuencia de encendido lleva una serie de pasos, entre los cuales esta la verificación de las variables de entrada en su valor correcto como lo es la temperatura del búnker, la presencia de agua dentro de la caldera, la presión del búnker, presión del aire para la aspersion, temperatura del agua en la entrada de la caldera. Después de verificar estas variables y si están en los valores mínimos o máximos permitidos se inicia la prepurga o tiempo en que se introduce la máxima cantidad de aire dentro de la caldera manteniendo la entrada de combustible cerrada mediante las electroválvulas esto con la finalidad de eliminar posibles gases almacenados producto de la combustión o reacciones químicas que hayan permanecido en las tuberías durante la detención o no funcionamiento de la caldera, para esto se recurre o se lleva a la caldera a lo que se conoce como alto

fuego(máxima apertura del motor modulador para la entrada de aire y la entrada de combustible) por un tiempo de 30 segundos.

Después de haber depurado el aire dentro de la caldera el controlador envía una señal para cerrar de forma completa la entrada de aire y de combustible, que es la condición denominada de bajo fuego (mínima apertura del motor modulador para la entrada de aire y la entrada de combustible) mantenida durante un tiempo de 30 segundos, ver Figura 1.2.2.

Se genera una llama piloto mediante un electrodo y una entrada de gas que es manejada con una electroválvula, después de 10 segundos el sistema verifica la presencia de la llama piloto mediante un sensor ultravioleta, si es detectada correctamente se procede a la apertura de las electroválvulas para el ingreso de combustible y pasando el sistema al control proporcional que es dependiente de la presión de la caldera utilizando un controlador diferencial de presión que es conocida como la modulación (La posición del motor modulador depende de la presión de vapor actual). En este estado el controlador verifica si la llama presente corresponde a la generada por el combustible y si la respuesta es afirmativa cierra la entrada de gas para dejar operando la caldera con el búnker. Hasta que no se de una condición de parada por una falla o por el operador el sistema continuara en la modulación.

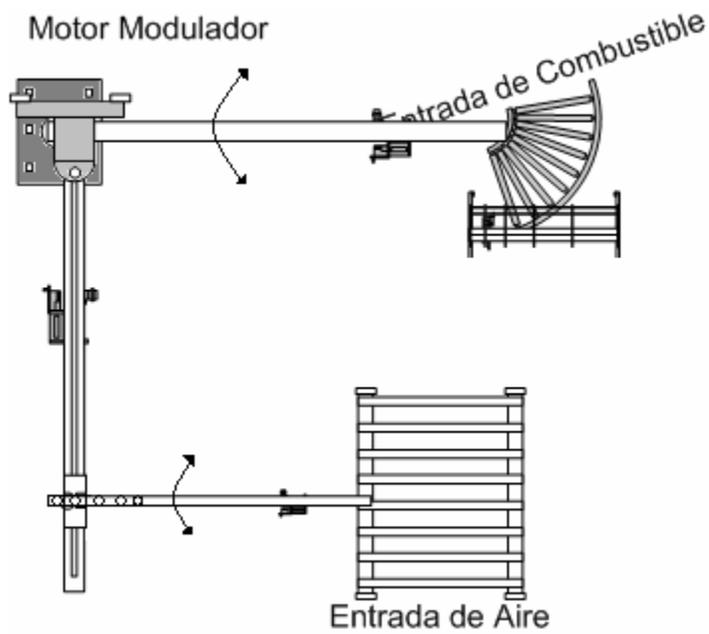
Durante la modulación el sistema puede entrar al control manual mediante la reubicación de un interruptor activado por el operador que le da el paso a mantener la posición del motor modulador donde lo requiera, desde bajo fuego hasta alto fuego.



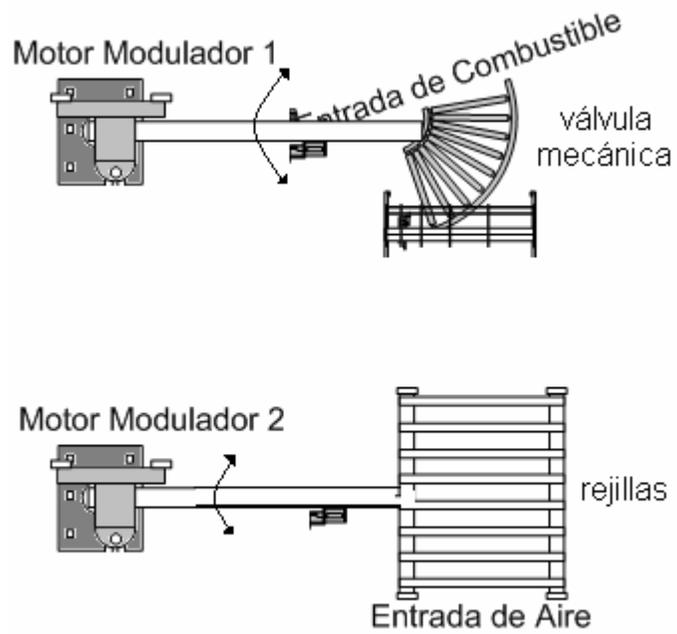
**Figura 1.2.3** Caldera Kewanee 1000 hp

### **1.3 Descripción general de la solución**

Para mejorar el proceso de combustión de la caldera hay que tomar las señales y variables que intervienen en dicho proceso, esto con el fin de mantener el funcionamiento actual del controlador. Estas variables son: presión y oxígeno que son las que proporcionan la carga de la caldera para la cantidad de libras por pulgada cuadrada (p.s.i) y la cantidad de oxígeno liberada en la combustión al quemar el búnker, respectivamente. Esto conlleva a desconectar o eliminar el control que tiene actualmente la caldera para el manejo utilizando un solo motor modulador (MODUTROL IV) que es el que actualmente maneja el ingreso de combustible y de aire hacia la llama.



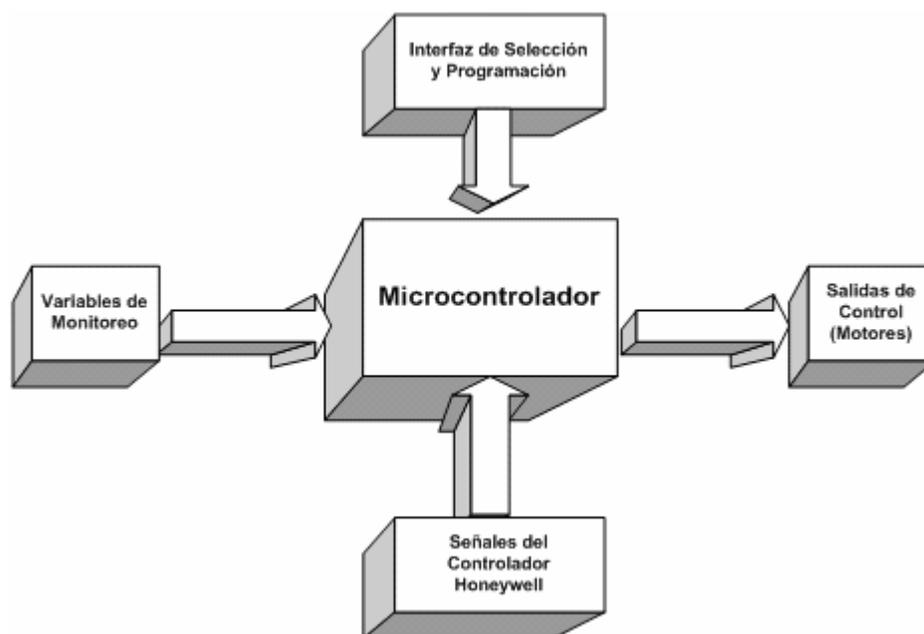
**Figura 1.3.1** Modulación del controlador Honeywell con actuador series 90



**Figura 1.3.2** Modulación del controlador diseñado utilizando 2 actuadores series 90

En la Figura 1.3.1 se muestra la dependencia entre la relación aire-combustible mediante una proporción angular entre ejes o varillas que varía de 0 a 90° para el combustible (válvula mecánica) y de 0 a 50° para el aire (rejillas). Es en este punto donde el ajuste se convierte en una condición difícil o inestable con el tiempo debido a desgastes mecánicos por el movimiento de las piezas junto con una alteración de las dos variables de entrada, cuando en realidad solo es necesario modificar una de ellas o las dos y esperar la respuesta de la caldera para establecer el punto óptimo de operación.

Esto se puede mejorar utilizando dos salidas independientes para el manejo de el combustible y el aire, la Figura 1.3.2 muestra en detalle la forma de sustituir el acople entre estas dos variables de salida. Esto se logra con un monitoreo o sensado del valor de oxígeno y la presión de la caldera, valores que son procesados por un controlador para modificar cada una de las variables de salida a controlar, manteniendo estable la combustión en su punto de eficiencia óptimo.



**Figura 1.3.3** Diagrama de bloques de la solución diseñada y desarrollada

#### 1.4 Requerimientos y restricciones

- Realizar una investigación para conocer la condición actual del proceso de combustión.
- Se debe monitorear el valor de la concentración de oxígeno que es emitido por la chimenea al realizarse la combustión.
- Se debe disminuir el consumo de combustible (búnker) al mejorar la combustión.
- Los gases emitidos hacia el exterior por la chimenea deben ser los permitidos por la ley para no dañar el medio ambiente.
- El sistema de control a implementar debe tener la capacidad de funcionar de forma paralela con el sistema de control actual.
- El valor de presión de vapor de agua debe ser variable (seleccionado por el operador).

## **CAPÍTULO 2: META Y OBJETIVOS**

### **2.1 Meta**

Obtener una mayor eficiencia en la producción de vapor de agua en una caldera para disminuir los costos en la producción, administrando mejor los recursos disponibles en la empresa, cumpliendo con las normas establecidas por la ley en lo referente a emisión de gases hacia el aire.

### **2.2 Objetivo general**

Diseñar un prototipo en una caldera con un sistema de control automático que sea capaz de mejorar la eficiencia<sup>2</sup> en el proceso de combustión, manteniendo la emisión de gases en un rango permisible por la ley.

### **2.3 Objetivos específicos**

#### **2.3.1 Objetivos de hardware**

- Realizar un estudio de las variables sensadas y señales a controlar para la selección del controlador a utilizar.
  
- Selección de los sensores que cumplan con los requerimientos necesarios.
  
- Diseñar una etapa de control para realizar la secuencia de operación de la caldera.
  
- Hacer una simulación de las señales a controlar a partir de las variables sensadas.

---

<sup>2</sup> Disminuir los costos mediante el ahorro energético en el consumo de combustible y energía eléctrica (generación del aire).

### **2.3.2 Objetivos de software**

- Realizar las rutinas de programación del controlador.
- Seleccionar un protocolo de comunicación entre el controlador y una computadora PC.
- Desarrollar un programa en alto nivel para monitorear en tiempo real los niveles de emisión de gases.

### **2.3.3 Objetivos de documentación**

- Realizar el informe final del proyecto.
- Hacer un manual de usuario para el operador de la caldera, con las especificaciones de funcionamiento y principales características.
- Hacer un documento con las especificaciones eléctricas y lógicas del sistema de control implementado.

### **2.3.4 Objetivos de implementación**

- Montaje del diseño de control en una placa de acrílico cada una de las etapas diseñadas.
- Conexión con cada uno de los actuadores (motores moduladores) en las salidas para el manejo de la entrada de aire y combustible a la caldera.
- Conexión del transmisor de presión a la entrada del controlador como una de las variables retroalimentadas del sistema.

## CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

### 3.1 Descripción del proceso a mejorar

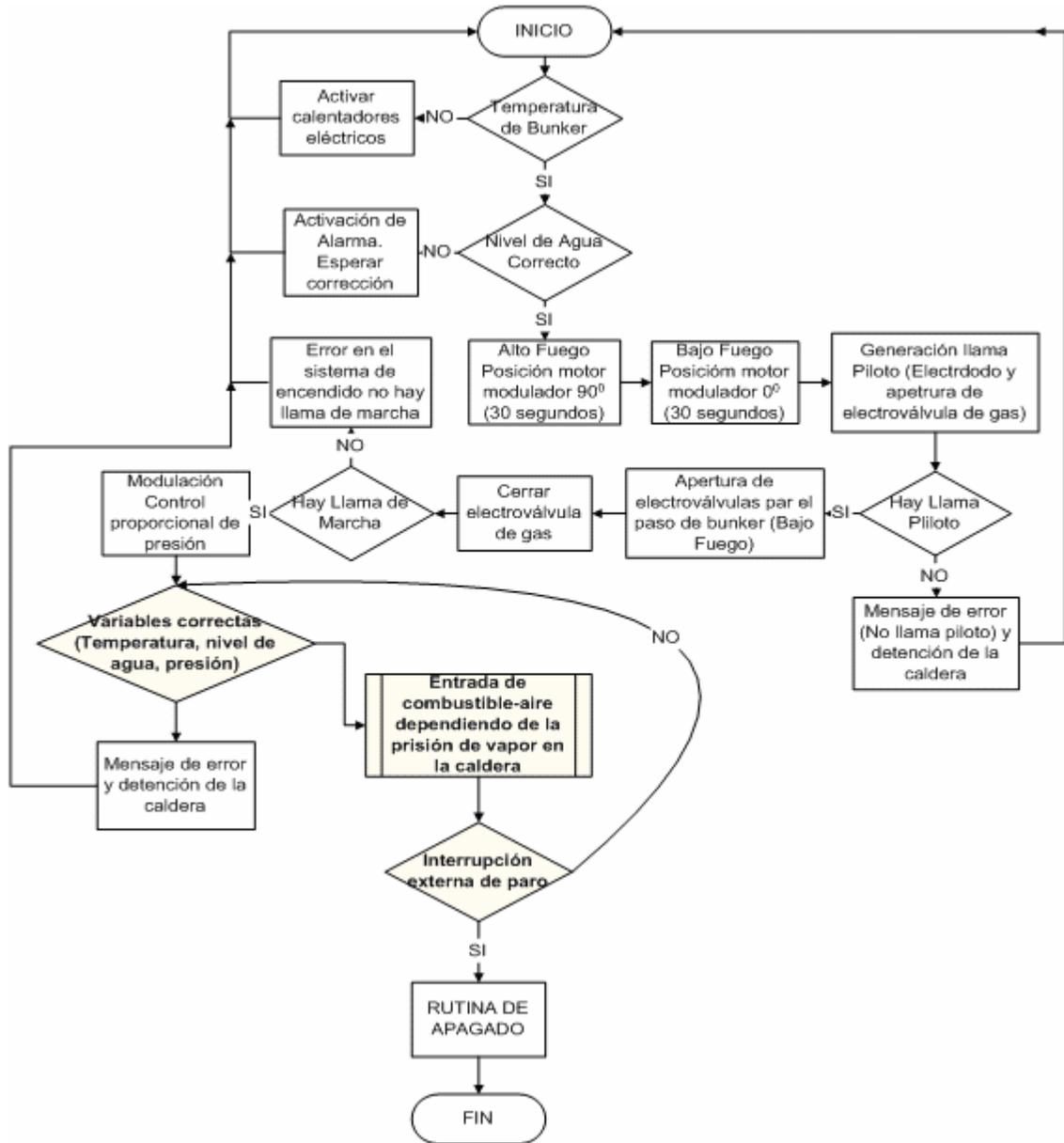
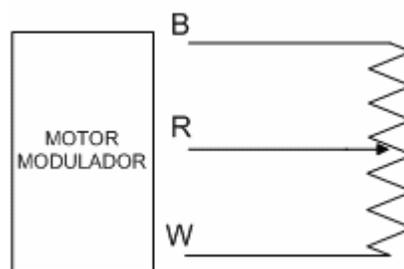


Figura 3.1.1 Diagrama de flujo de la secuencia de operación de la caldera Kewanee 1000 hp

En la Figura 3.1.1 se describe el proceso o rutina que ejecuta el controlador marca Honeywell para llevar a la operación la caldera generadora de vapor de agua. En los cuadros más oscuros es donde precisamente se realizan los nuevos cambios y

modificaciones, se incluyen 2 nuevas variables de monitoreo para cerrar el lazo de control para determinar el valor en que debe estar el aire y el combustible de entrada. Como se mencionó anteriormente el control que utiliza es un potenciómetro (resistencia variable) que indica la cantidad de presión de vapor que esta generando la caldera, de modo que para una presión mínima (inferior a 20 p.s.i) el motor modulador se ubica en alto fuego y para una presión máxima (superior a 90 p.s.i) el motor se localiza de acuerdo al valor proporcional entregado por el diferencial de resistencia entre los terminales del mismo.



**Figura 3.1.2** Control proporcional de presión para la posición del motor modulador

Durante la operación o puesta en marcha el sistema se encarga de verificar cada uno de los sensores que están situados en la caldera, todos ellos se encienden y se apagan cuando lo requieren, se pueden distinguir 2 tipos de sensores: los modificadores de proceso y los de emergencia. Los que modifican el proceso son el nivel de agua, presión de agua, presión de aire de dispersión. Cuando se presenta un exceso de temperatura, falta de llama, temperatura inadecuada del combustible, el sistema reacciona de modo que detiene el funcionamiento inmediato de la caldera hasta que el problema sea resuelto.

En la secuencia de apagado se cierran las electroválvulas de combustible, el motor modulador cierra la válvula mecánica de aire de dispersión y combustible, se cierra la electroválvula de entrada de agua caliente. Una vez cerradas las electroválvulas el motor generador de aire se mantiene durante 20 segundos para la limpieza de gases residuales producto de la combustión.

## 3.2 Antecedentes Bibliográficos

### Eficiencia de una Caldera

Se define como la razón por el calor absorbido por el agua de alimentación al convertirse en vapor en la caldera, y la energía total disponible del combustible suministrado. Es decir, la eficiencia es una medida del aprovechamiento del combustible por la caldera al generar una determinada cantidad de vapor.

Parámetros que afectan la eficiencia de una caldera.

- Nivel de exceso de aire.
- Régimen de Fuego (50%-80% de capacidad).
- Temperatura de los gases de chimenea.
- Temperatura del agua de alimentación.
- Temperatura del aire de combustión.
- Suciedad en superficies de transmisión de calor.
- Purga (limpieza de las impurezas del agua).
- Perdidas de calor en el exterior de la caldera.
- Combustible.

Pruebas de eficiencia de Combustión.

- Nivel de exceso de aire.
- Eficiencia de Combustión.
- Mediciones de la eficiencia de combustión.

*Muestreo de gases en la chimenea.*

*Exceso de aire.*

*Monóxido de Carbono (CO).*

*Opacidad del humo (Densidad del humo).*

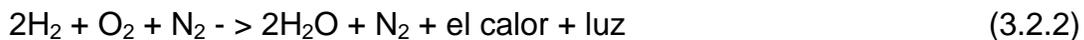
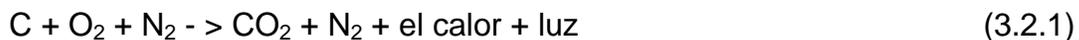
*Apariencia de la llama.*

## Combustión

Es la forma de liberar energía química del combustible. Es el proceso de transformación de energía a través de una rápida oxidación. Para que se de la combustión de un aceite se requieren de tres elementos: el combustible, oxígeno y calor. El trabajo del quemador o boquilla de aspersión es mantener una correcta proporción de cada uno de estos elementos para poder una eficiente combustión. El combustible debe tener una temperatura adecuada (200° F) en una etapa de calentamiento antes de llegar al quemador. El combustible se debe mezclar con la cantidad necesaria de aire.

El tipo de aceite utilizado en las calderas es el número 6 que es de uso común para aplicaciones de quemado en la industria nacional.

El combustible utilizado (aceite número 6) está compuesto de aproximadamente 87% de carbono (C) y 13% de hidrógeno (H). El aire está compuesto de aproximadamente 78% el nitrógeno (N) y 21% oxígeno (O). El proceso de la combustión correcto se describe las siguientes ecuaciones químicas de reacción.



De un punto de vista teórico todo el nitrógeno a través de toda la reacción permanece inalterado.

Sin embargo la combustión no es perfecta por lo que se genera monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx). Otro de los derivados o productos de la combustión es el agua (H2O) que puede generar problemas significativos dentro del sistema por su condensación. El azufre esta presente en el combustible y produce

dióxido (SO<sub>2</sub>) o trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>), y uniendo esta relación de azufre con agua se produce ácido sulfúrico que puede dañar las tuberías o el sistema en general.

**Tabla 3.2.1** Porcentajes de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en una combustión correcta para diferentes tipos de aceites

<b>Tipo de Aceite</b>	<b>%CO<sub>2</sub></b>	<b>%O<sub>2</sub></b>	<b>Humo generado</b>
#2	11-12.5	3.5-6	0-2
#4-5-6	11.5-13.5	3.5-6	0-4

Los NO<sub>x</sub> (Óxidos de Nitrógeno)

El término general de los óxidos de nitrógeno engloba desde un punto de vista formal los siguientes compuestos: NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y NO<sub>3</sub>, siendo éste último inestable. Sin embargo, generalmente dicho término se aplica solo al NO y al NO<sub>2</sub> por su presencia mayoritaria y facilidad de transformación mutua en presencia de O<sub>2</sub> del aire (E. Seinfeld, Contaminación Atmosférica, Ed. McGraw-Hill, (1978)).

Las técnicas desarrolladas para controlar las emisiones de los NO<sub>x</sub> se pueden clasificar en dos grupos, aquellas consistentes en modificaciones en la combustión para reducir la formación de los NO<sub>x</sub> "medidas primarias" o aquellas consistentes en el tratamiento de efluentes para eliminar los NO<sub>x</sub> "medidas secundarias".

Modificaciones en la combustión, tales como quemadores de baja producción de NO<sub>x</sub>, recirculación del gas, requemado del aceite de inyección de agua o vapor entre otros, se han aplicado de un modo generalizado en numerosas centrales térmicas. Sin embargo, la reducción de NO<sub>x</sub> alcanzada no sobrepasa más del 50-60 %, de manera que no se cumplen las estrictas legislaciones existentes. En este caso, cuando las técnicas empleadas para evitar la formación de los NO<sub>x</sub> no son suficientemente eficaces, es necesario adoptar "medidas secundarias", que se basan en la retención de los NO<sub>x</sub> o en su transformación en compuestos o elementos inocuos.

### **3.3 Descripción de los principales principios físicos y electrónicos relacionados con la solución del problema**

En la parte de control automático se consideran aspectos físicos para obtener un modelo matemático general de la planta y del sistema de regulación que incluye masas de barras, electroválvulas mecánicas, motores ac (corriente alterna) para poder determinar el tiempo de respuesta del sistema. A partir de estos datos se diseñan los reguladores que se necesitan. La etapa de sensado contempla aspectos importantes porque se trata de medición de parámetros producidos a partir de procesos o reacciones químicas para lo cual se debe tener un estudio de los fenómenos involucrados en el proceso de la combustión.

De la misma forma para la etapa de potencia se implementan reguladores para la alimentación o energía que se debe entregar al motor generador de aire y el motor modulador. Cada uno de estos motores tiene involucrados gran cantidad de principios físicos como lo son la generación de campos electromagnéticos producidos por sus bobinados, fuerza o torque del motor, velocidad, entre otros de los aspectos que son tomados en cuenta para el diseño de la etapa de control de cada uno de los elementos presentes en el proyecto.

De manera similar para los circuitos integrados que se utilizan en el proyecto se consideran aspectos o características eléctricas y lógicas para los dispositivos lógico-programables o microcontroladores de desarrollo que son necesarios para implementar el diseño. Se consideran las señales analógicas y digitales de entrada-salida de cada uno de los módulos en que se divide la solución con el fin de poder determinar el acople entre cada uno de los dispositivos.

## **CAPÍTULO 4: PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO**

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

- Entrevistas con el ingeniero de mantenimiento de la empresa para reconocer el problema o posibles problemas dentro de la planta de producción.
- Definir el área del problema, procesos y personas involucradas.
- Estudios de la medición de emisión de gases realizados por servicios contratados por la empresa (en ocasiones anteriores).
- Determinar el impacto que tiene para la empresa el solucionar el problema.

### **4.2 Obtención y análisis de la información**

- Entrevistas con el o los encargados de operar las calderas.
- Entrevistas con el ingeniero de mantenimiento del área donde se encuentran las calderas (Casa Maquinas).
- Lectura y estudio de los manuales de la caldera a modificar (Kewanee).
- Obtención de información sobre procesos químicos (combustión) y operación de calderas para su eficiencia, a través de Internet.
- Obtención de características de sensores y controladores a partir de los requerimientos del proyecto.
- Determinar el costo de los principales elementos del sistema a implementar.
- Realizar una tabla de los datos actuales de consumo de potencia y emisión de gases de la caldera

### **4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución**

- Entrevistas con los ingenieros de la empresa para determinar los requerimientos del proyecto o solución.
- Estudio de los procesos involucrados en la generación de vapor a través de la caldera.

- Determinar el ámbito de acción (electrónica).
- Consulta a asesor del proyecto para delimitar la solución y alternativas para modificarlo.
- Determinar los costos del proyecto.
- Factibilidad de tener los dispositivos electrónicos, equipo, materiales o recursos necesarios para el proyecto en el momento que se requieren.
- Tener un parámetro del tiempo que se requiere para la implementación de la solución.
- Presentar un documento o informe que justifique la selección de los sensores y del controlador a utilizar.

#### **4.4 Implementación de la Solución**

- Medir los parámetros actuales de consumo de combustible y energía eléctrica para la caldera KEWANEE.
- Diseñar el acople entre la etapa de potencia y la etapa de control.
- Hacer una simulación de la etapa de control para determinar si las señales de salida funcionan correctamente.
- Presentar un reporte de los datos obtenidos de la simulación para las señales de salida.
- Realizar las microrutinas de programación para el controlador para el manejo de los motores moduladores para la entrada de aire y combustible.
- Desarrollar las microrutinas para el manejo del display y del teclado.
- Probar el funcionamiento del controlador utilizando una rutina de prueba de las variables de entrada.
- Diseñar el acople<sup>3</sup> entre el analizador de gases y la etapa de control.
- Diseñar el acople entre el transmisor de presión y el microcontrolador.

---

<sup>3</sup> Este acople se refiere a los acondicionadores de señal para convertir las señales de corriente a voltaje en los valores deseados de 4-20 mA a 0-5 V en los rangos de operación.

- Implementar el sistema de control con las entradas y salidas del sistema (protoboard).
- Realizar un reporte de los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas.
- Hacer una simulación a nivel de laboratorio con el sistema completo.
- Hacer una presentación a las personas de la empresa involucradas con el proyecto.

#### **4.5 Reevaluación y rediseño**

El prototipo desarrollado cuenta con una gran flexibilidad y manejo de las variables monitoreadas y las salidas controladas.

Para un posible rediseño se recomienda tomar en cuenta alguna de las soluciones propuestas al inicio del proyecto entre las cuales se encuentran:

-Utilización de un kit de desarrollo: contiene un procesador de la marca rabbit, en este caso el SmartCat BL2100 que contiene una pantalla del tipo LCD y un teclado con 7 teclas que están conectados como dispositivos periféricos, junto con otras características que se mencionan en la siguiente lista:

**Tabla 4.5.1** Parámetros y especificaciones del procesador SmartCat BL2100

<b>Características</b>	<b>BL2100<sup>4</sup></b>
Procesador	Rabbit 2000T @ 22.1 MHz
Puerto Ethernet	10Base-T, RJ-45, link and activity LEDs
Memoria Flash	256K (estandard)
Memoria SRAM	128K (estandard)
Bateria Respaldo	Socketed 3-V lithium coin-type, 265 mA.h, supports RTC and SRAM
Pantalla / Teclado	122 x 32 graphic LCD in two stacked sections (with programmable backlight), relegendable keypad with 7-key/7-LED interface
Entradas digitales	24: protected to $\pm 36$ V DC
Salidas digitales	16: source/sink 200 mA each, 36 V DC max.
Entradas analógicas	11 at 1 MW, 12-bit resolution, $\pm 10$ V DC, up to 4,100 samples/sec.
Puerto Serie	4 total: two 3-wire (or one 5-wire) RS-232, 1 RS-485, and one 5 V CMOS-compatible (programming)
Salidas analógicas	Four 12-bit resolution, 0-10 V DC*, update rate 12 kHz
Reloj en tiempo real	SI
Temporizadores	Five 8-bit timers (four cascadable from the first) and one 10-bit timer with 2 match registers
Alimentación	9-36 V DC, 1.5 W max. (without display), 3 W max. (with display)



**Figura 4.5.1** a) LCD/Equipad b) Kit de desarrollo SmarCat BL2100

Otro de los puntos en la solución propuesta para obtener un ahorro por concepto de energía eléctrica consiste en utilizar un elemento que varíe la cantidad de aire que

<sup>4</sup> Datos del fabricante, obtenido de la página <http://www.zworld.com/products/bl2100/>.

deber ingresar a la caldera dependiendo de la carga de la caldera y la cantidad de oxígeno presente en la combustión, para esto existe un motor que funciona con corriente alterna con una corriente nominal de 176 A y un voltaje trifásico de 480V. Diseñar un control de velocidad para manejar este motor conlleva un análisis exhaustivo y el diseño utilizando los mejores elementos semiconductores de potencia para el manejo grandes potencias como lo son los igbts. Una solución más practica y de fácil manejo es utilizar un variador de frecuencia que logre variar la velocidad entre un valor mínimo de revoluciones por minuto y un valor máximo para establecer el punto de operación de mayor eficiencia de combustión.

**Tabla 4.5.2** Parámetros y especificaciones del variador de velocidad AC Tech 60 hp

<b>Especificaciones</b>	<b>Variador de frecuencia AC Series MC marca AC Tech</b>
Output wave form	High carrier frequency, sine coded, (PWM)
Input voltage ratings	240/120, 240/200, 480/400, 590/480 Vac
Input voltage tolerance	+10%, -15% of rating
Input frequency tolerance	48 to 62 Hz
Output frequency	0-120 Hz (optional to 1000 Hz on M1000)
Carrier frequency	2.5 kHz to 14 kHz (Drive rated at 8 kHz)
Frequency stability	+0.00006% / C
Overload current capacity	180% for 20 seconds, 150% for one minute (at 8 kHz)
Service factor	1.0
Power factor	Near unity
Efficiency	Up to 98.5%
Speed reference follower	0 – 10 VDC or 4 – 20 mA
Control voltage	15 VDC
Analog outputs	0 – 10 VDC, or 2 – 10 VDC ( 4 – 2- mA with 500ohm impedance). Proportional to speed or load
Digital outputs	Form C relay: 2 A at 28 VDC or 120 Vac. Two open collector outputs: 40 mA at 30 VDC
Serial communications	RS485 networkable, Modbus (Metasys optional on M3000)
Storage temperature	-20° to 70° C
Ambient operating temperature ( at 100 % current and maximum carrier of 8 kHz. Derated for higher carrier.)	Chassis -10° - 55 °C
	Type 1 (IP31) -10° - 50 C
	Type 4 (IP65) -10° - 40° C
	Type 12 (IP54) -10 – 40 C
Ambient humidity	Less than 95% (non-condensing)
Maximum altitude	3300 Feet (1000 meters)



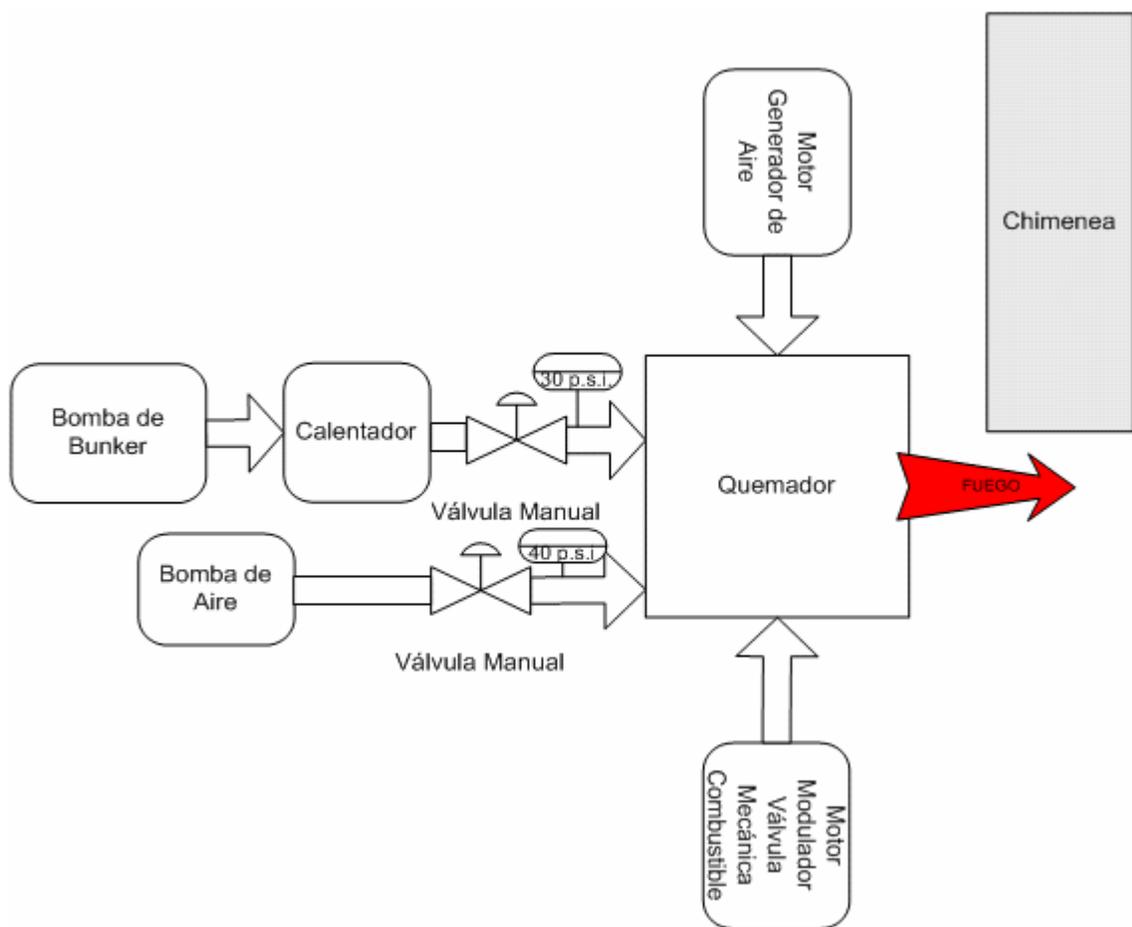
**Figura 4.5.2** Variador de velocidad 60 hp maraca AC Tech

Ejecutando estos cambios en la solución se pueden obtener mejores resultados, ya que se tiene un único controlador con las suficientes entradas y salidas para el manejo de las variables de entrada y salida, simplificando la operación y el diseño de hardware en etapas de acople para el controlador y dispositivos periféricos, la interfaz de programación para el operador de la caldera y el despliegue de datos se ejecuta desde el mismo kit de desarrollo, y al estar desarrollado con un procesador la cantidad de datos de almacenamiento y la transferencia entre registros permite una mayor velocidad de operación, además posee la capacidad de efectuar tareas simultáneas (multi-tasking) también se obtiene los resultados del ahorro por concepto de energía eléctrica al utilizar un variador de velocidad y no un motor modulador que regule la entrada de aire con el movimiento de las rejillas ya que implica un consumo de potencia mayor para la rotación del mismo y por mantener la velocidad en su valor nominal desde que se enciende la caldera hasta que se detiene o apaga.

## CAPÍTULO 5: DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA SOLUCIÓN (EXPLICACIÓN DEL DISEÑO)

### 5.1 Análisis de soluciones y selección final

Para obtener una noción más clara de la selección definitiva se analizó toda la información disponible a través de Internet, libros y manuales técnicos del funcionamiento de la caldera, en primera instancia se obtuvo la relación que existe entre el combustible búnker y el aire al efectuarse la combustión.



**Figura 5.1.1** Esquema fundamental de los actuadores que intervienen en el proceso de combustión

En la Figura 5.1.1 se muestran los actuadores de entrada para el proceso de combustión. En búnker recibe un tratamiento para aumentarle la presión antes de de llegar a la boquilla de aspersión, utilizando un motor en corriente alterna, además

debe ser precalentado hasta una temperatura superior a los 80 grados Celsius para que pueda ser quemado ante la presencia de una llama, para esto se utilizan los calentadores eléctricos en el arranque y en operación el búnker es autocalentado por la misma caldera, con la energía liberada en forma de calor. Para la aspersion del búnker se utiliza una entrada de aire que se mezcla en la boquilla de salida del combustible hacia la llama, esto con el fin de extender al máximo la llama a través del cañón<sup>5</sup> interno de la caldera. Los valores de presión son definidos manualmente por el operario de la caldera, estos valores son aproximadamente de 30 p.s.i para el búnker y de 40 p.s.i para el aire. La temperatura del búnker es monitoreada utilizando un RTD<sup>6</sup> que envía una señal hasta el controlador Honeywell para indicarle el valor actual de temperatura del búnker, si es un valor inferior el requerido se activa una señal de alarma y los calentadores eléctricos son activados para llevar el combustible hasta la temperatura requerida (80<sup>0</sup> C).

La eficiencia de combustión esta definida por la cantidad de aire y de combustible presente en la llama, para esto primero se debe generar una adecuada aspersion de las partículas de combustible en el aire. La caldera tiene una curva característica de combustión en la que se puede obtener la mayor eficiencia para el rango de carga de operación de la caldera.

La eficiencia de la combustión se ve disminuida ante un exceso de aire, esto indica que ha mayor concertación de oxígeno presente en la combustión va a generar la formación de óxidos y ácidos.

#### Formación de dióxido de sulfuro



---

<sup>5</sup> Ducto interno de la caldera donde se genera la llama principal que recorre todas las tuberías internas para calentar el agua, recordando que se trata de una caldera pirotubular.

<sup>6</sup> Los RTD son sensores de temperatura resistivos. En ellos se aprovecha el efecto que tiene la temperatura en la conducción de los electrones para que ante un aumento de temperatura haya un aumento de la resistencia eléctrica que presentan.

Trióxido de sulfuro



Monóxido de nitrógeno



Dióxido de nitrógeno



Formación de ácido sulfúrico, a una temperatura por debajo de los 482<sup>0</sup> C

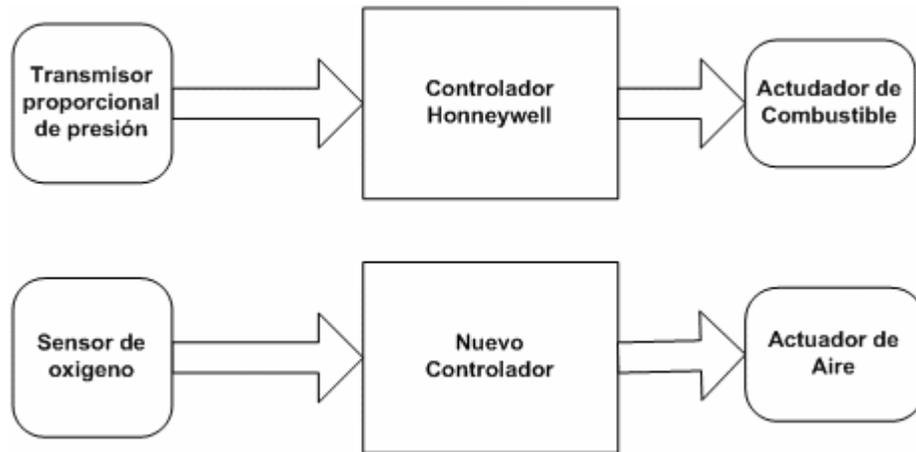


Donde la presencia de ácido sulfúrico genera una alta corrosión en la chimenea, en la boquilla de aspersión del quemador y en los ductos por donde circulan los gases, bloqueando parcial o totalmente la circulación de la llama en cada y la emisión de gases hacia el exterior por sedimentos o acumulaciones de ácido, lo que provoca que se tenga que dar mantenimiento periódico y la adición de sustancias químicas para neutralizar el efecto del mismo.

La presencia de aire que es generado por el motor con una potencia de 60 hp introduce el oxígeno que posee una alta concentración y es combinado con los elementos presentes en el búnker como el agua y el nitrógeno que también se encuentra en altas concentraciones los cuales requieren de una temperatura para el intercambio y la unión de elementos en las reacciones químicas asociadas. Ver Anexo 10.1, figura Figura 10.1.1 (Eficiencia de combustión vrs exceso de oxígeno), y figura Figura 10.1.2 (Eficiencia de la caldera vrs Temperatura de los gases en la chimenea) al utilizar como combustible el aceite número 6.

## POSIBLES SOLUCIONES

1. *Utilizar un único actuador para controlar la cantidad de aire de entrada hacia el cañón.*



**Figura 5.1.2** Control de combustión utilizando dos etapas o controladores diferentes

En este caso se conserva el control actual que utiliza la caldera para introducir el combustible y la apertura depende del valor diferencial de presión de vapor que presente la caldera en la salida. Eliminando la derivación que existe entre el motor modulador Modutrol IV y las rejillas o persianas de entrada para el aire.

El actuador a utilizar puede estar compuesto por un motor que sea manejado por un variador de frecuencia o por un actuador que maneje la entrada de aire con las mismas persianas que posee actualmente.

Para esto el diseño incorporado o a implementar debe monitorear únicamente el valor de salida de oxígeno por la chimenea con el fin de colocar o introducir el porcentaje de aire necesario para que el exceso de oxígeno sea el seleccionado o definido en la curva característica de la caldera.

#### Ventajas:

- Utilización de un solo actuador o variador de frecuencia para el control de entrada de aire.
- El controlador a utilizar solo debe monitorear una variable y modificar una salida.
- La implementación puede durar un menor tiempo que utilizar otra solución (cableado, instalación de componentes, etc.)
- Disminuir la inversión del proyecto.

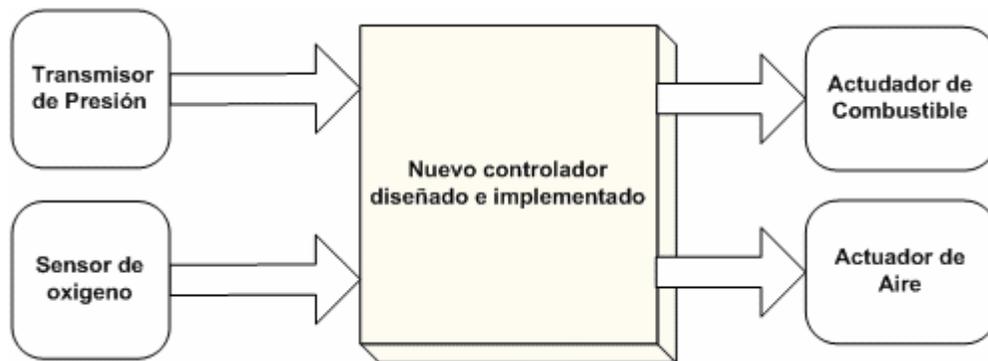
#### Desventajas:

- No existe un único control (Honeywell y el diseñado) para el manejo de las variables retroalimentadas del sistema.
- No se puede seleccionar la carga de la caldera en un valor ajustable dependiendo del valor requerido según las áreas productivas de la planta que estén trabajando.
- La estabilización del sistema no es la mejor al contar únicamente con un control proporcional.

Esta solución a pesar de implicar un menor trabajo en el diseño de hardware y software requeridos, no ofrece los mejores resultados por la independencia de las variables de entrada, además el valor de presión generado por la caldera se fija en un punto y no se puede modificar lo que implica un gasto de más en momentos que no se requiere y en un faltante durante máximas cargas de la zona productiva de la empresa.

2. Utilizar dos actuadores, uno para el manejo de la entrada de combustible y otro para la entrada de aire.

El control de aire es el mismo que se mencionó anteriormente para la solución uno, en esta nueva solución se implementa un control para manejar el actuador de la válvula mecánica de combustible con el sistema de control que se debe diseñar.



**Figura 5.1.3** Etapa de control implementada para mejorar la eficiencia de combustión

#### Ventajas

- La utilización de un solo controlador para todo el proceso de combustión.
- La eficiencia de la combustión esta definida o controlada por el valor actual de presión de vapor y el valor de oxígeno después de efectuada la misma, como variables de retroalimentación.
- La estabilidad de la caldera varía de acuerdo a las condiciones de entrada, quienes generan la señal de error, la cual es corregida para estabilizar el sistema.

#### Desventajas

- Mayor capacidad de controlador en lo referente a entradas y salidas.
- Se necesitan señales de control provenientes del controlador actual Honeywell.

Esta es la mejor solución para desarrollar el proyecto con el objetivo de obtener la máxima eficiencia de la caldera ya que se manejan las dos variables para la combustión: aire-combustible y se obtiene la retroalimentación del sistema mediante el monitoreo del valor de oxígeno generado y la presión de vapor de agua actual. Se deben definir los valores o puntos de operación de acuerdo a una curva característica de la caldera que proporciona el valor de oxígeno donde las concentraciones de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  y de otros gases contaminantes están en el rango permisible por la ley de emisiones en calderas industriales que utilizan como combustible el aceite número 6 (Búnker C).

## 5.2 Descripción del hardware

### 5.2.1 Selección e implementación del controlador

Para lograr el manejo de cada uno de los dispositivos de entrada-salida digital y analógico se utilizaron microcontroladores microchip PIC16F877A los cuales poseen las siguientes características:



**Figura 5.2.1** Microcontrolador PIC16F877A

#### *Funcionamiento estructura RISC CPU*

- Velocidad de operación: 20 MHz, 200 ns ciclo de instrucción
- Voltaje de operación: 4.0 – 5.5V.
- Rango de temperatura industrial: -40-85 C.
- 15 Fuentes de interrupción
- 35 palabras de instrucción
- Todas las instrucciones requieren de un ciclo excepto los brincos (dos ciclos).

#### *Características especiales del microcontrolador*

- Memoria no volátil: 14.3 Kbytes (8192 palabras)
- Memoria de datos SRAM: 368 bytes
- Memoria de datos EEPROM: 256 bytes

- Autoprogramable por control de software
- Programación serial por medio de dos vías
- Perro guardián (watchdog timer) con oscilador RC
- Código de protección programables
- Modo dormido para ahorro de energía
- Opciones de oscilación variable

#### *Características dispositivos periféricos*

- 33 I/O pines; 5 I/O puertos
- Temporizador0: 8 bit temporizador/contador con 8 bits de preescala
- Temporizador1: 16 bit temporizador/contador con preescala
- Timer2: 8 bit temporizador/contador con 8 bits del registro periódico, preescala y postescala.
- Módulos Comparador y PWM.
- Puerto serial sincrónico con 2 modos
  - SPI Master
  - I2C Master and Slave
- USART/SCI con 9 bits de direccionamiento para la detección
- Puerto paralelo esclavo (PSP)
  - 8 bits amplios con externo RD, WR y CS control.

#### *Características Analógicas*

- 10 bit, 8 canales conversión A/D
- Desconexión parcial por medio de reset
- Modulo comparador analógico

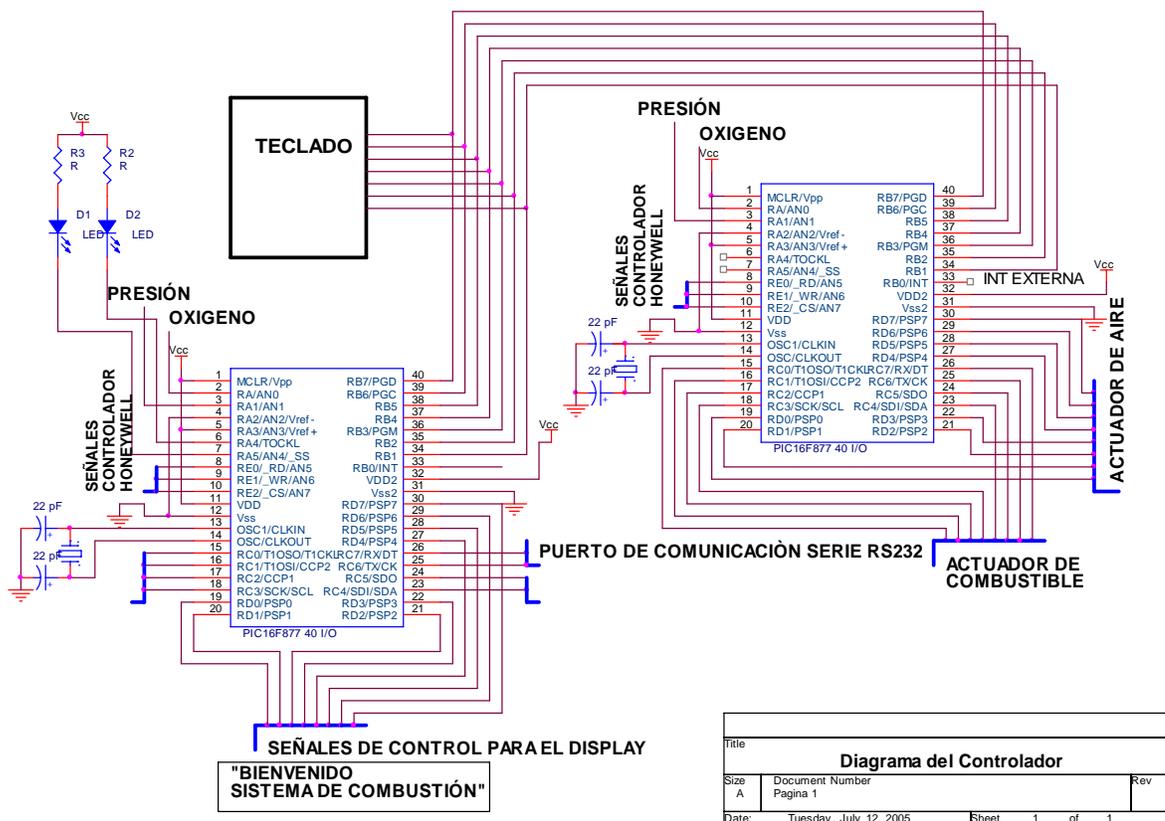


Figura 5.2.2 Controlador diseñado utilizando microcontroladores microchip PIC16F877

Se utilizan dos microcontroladores por la cantidad de puertos que se necesitan, entre los cuales esta el manejo de una pantalla o display para la visualización de parámetros que son necesarios programar, como la curva característica y los puntos de operación de oxígeno y presión de vapor de agua que se desea en la salida además de el estado actual de algunas de las variables monitoreadas.

Otro de los puertos es utilizado para conectar un teclado de 12 teclas que es usado para el encendido, entrada de datos a programar y el estado de operación en que se desea estabilizar (manual ó automático) y variaciones en la presión de salida después de haber seleccionado un valor de presión que va a depender de los requerimientos en cada una de las zonas productivas de la planta que requieren el vapor.

Es importante mencionar que la selección o programación de los controladores se realiza al mismo tiempo ya que el teclado esta conectado con las mismas entradas en el puerto B (PB.0 – PB.7), lo que significa que a pesar de que se consideran las mismas entradas la programación es diferente. El controlador 1 maneja los dispositivos periféricos que son el teclado y la pantalla, y la comunicación por el puerto serie. El controlador 2 se encarga de manejar los actuadores de salida mediante el formato de 8 bits en cada uno de los puertos para variar la posición del motor modulador de combustión (Puerto de salida D) y el motor modulador del aire (Puerto salida C).

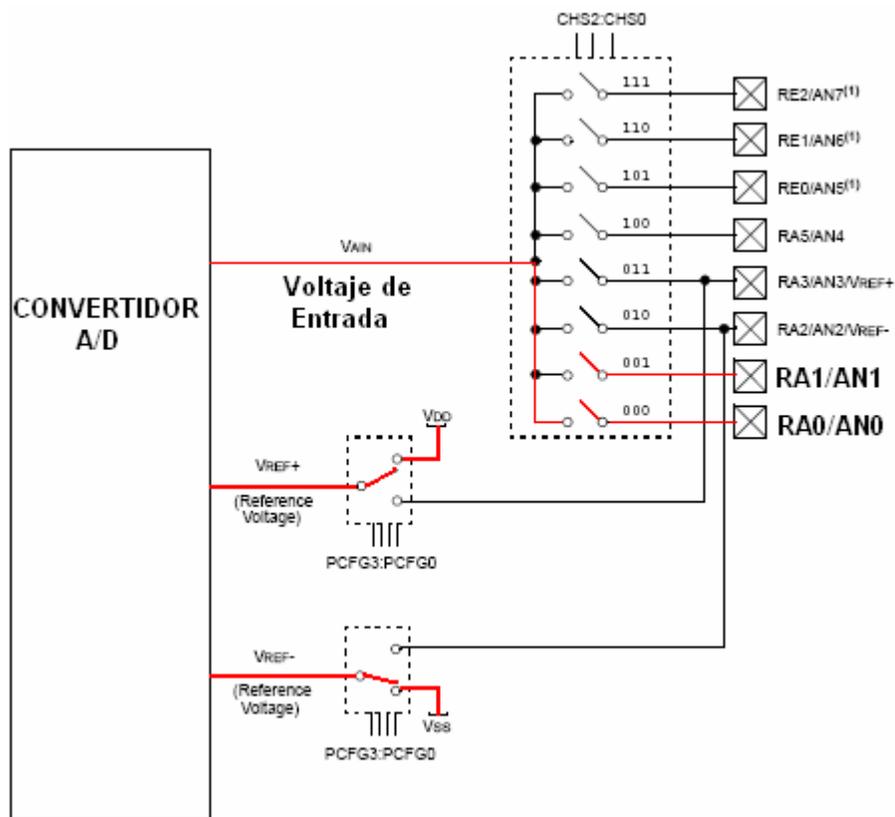
Ambos controladores reciben las señales analógicas provenientes del sensor de oxígeno y del transmisor de presión para ser cuantificadas en valores decimales que son analizadas para obtener la respuesta del sistema cuando se encuentra en el estado de modulación.

La frecuencia de oscilación del controlador 1 de de 16 MHz y la del controlador 2 de 9.6 MHz. Las señales de entrada de control provenientes del controlador Honeywell están conectadas al puerto E (PB.0 – PB.2) quienes se encargan de indicar el estado de operación: bajo fuego, algo fuego o modulación. Estas señales se encuentran conectadas en ambos controladores.

El sistema de control tiene indicadores del tipo led para indicar fallas o estados de operación, los cuales se encuentran conectados en las terminales que no se utilizan como el PA.4 – PA.5 para ambos microcontroladores y el puerto PC.0 – PC.5.

## 5.2.2 Acondicionadores de entrada para las señales provenientes del sensor de oxígeno y del transmisor de presión

De acuerdo a las características de microcontrolador microchip posee 8 entradas analógicas que son multiplexadas a través de canales y utiliza 2 referencias de entrada para el valor máximo y el valor mínimo en que se debe convertir la señal proveniente de los transductores, esto se muestra en la Figura 5.2.3.



**Figura 5.2.3** Selección de canales analógicos para la conversión A/D interna en PIC16F877

El controlador está conectado con un voltaje de referencia positivo de +5V y un voltaje mínimo de referencia negativo de 0V. Esto se logra con la programación interna del registro PCFG (código 1100).

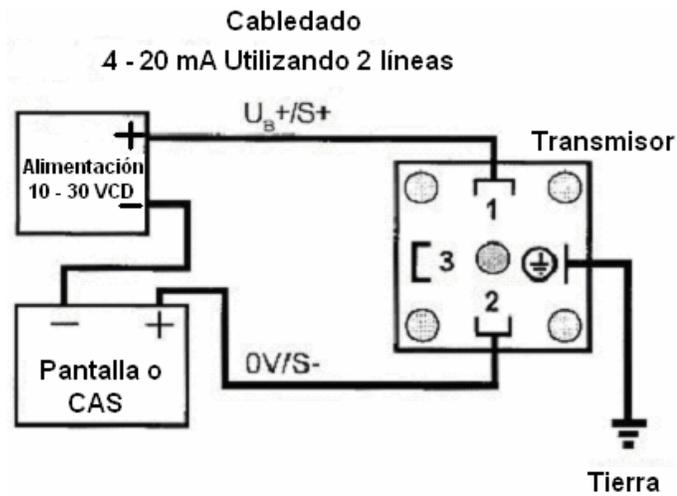
### 5.2.3 Transmisor de presión



**Figura 5.2.4** Transmisor de presión WIKA 0 – 200 p.s.i código #8292426

**Tabla 5.2.1** Características del transmisión de presión Wika ECO – 1

Características	Operación
Modelo Wika	8392426 Tipo ECO-1
Presión de Entrada	0 – 200 PSI
Conexión de Presión	1/4" NPT macho
Entrada Eléctrica	4 – 20 mA en 2 cables
Alimentación	10 – 30 VCD
Carga máxima	Resistencia = (Voltaje de alimentación-10)/ 0,02
Presión máxima	500 PSI
Exactitud	0.5% de span BFSL, histéresis 0,1%, repetitividad 0,1%
Tiempo de respuesta	5 ms
Rango de temperatura	Media: -25 °F a 212 °F, Ambiente -25 °F a 175 °F.
Temperatura compensada	32 °F a 175 °F.
Conexión Eléctrica	Conexión de enchufe DIN 43650(IP65/NEMA 5) con terminal de tornillo.
Protección Eléctrica	Voltajes inversos, corto circuito y sobrevoltaje
Líquido de Transmisión	Aceite de silicón para rangos menores a 200 PSI



**Figura 5.2.5** Conexión del transmisor de presión con fuente de alimentación y acondicionador de señal (CAS)

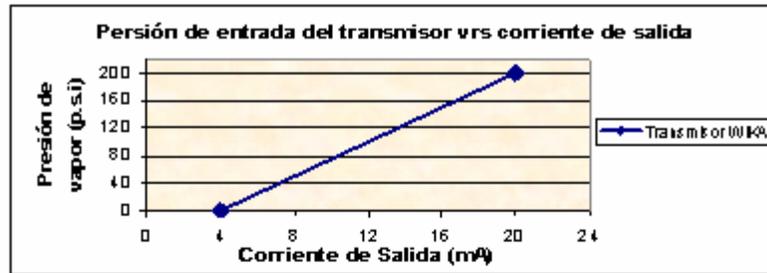
En la Figura 5.2.5 se muestra en detalle la forma en que se deben conectar cada uno de los terminales del transmisor de presión para cerrar el lazo del circuito con la corriente que es regulada por el circuito interno que posee el dispositivo. Este lazo se conecta al acondicionador de señal de acuerdo a los siguientes requerimientos y restricciones.

- La presión máxima de entrada debe ser de 120 p.s.i y la mínima de 0 p.s.i.
- La salida del acondicionador de señal debe ser de 0 a 5V por restricciones del microcontrolador.

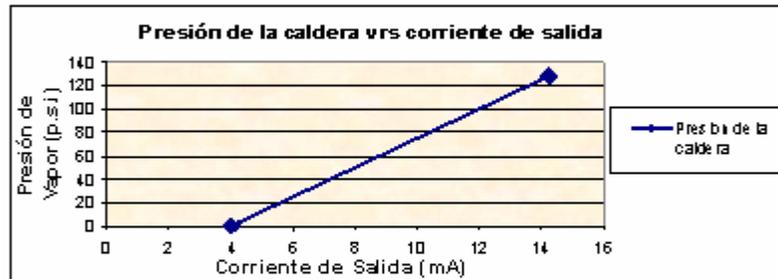
**Tabla 5.2.2** Valores de corriente experimentales para la presión de vapor del transmisor de presión marca WIKA con un rango de operación de 0 – 200 p.s.i

<b>Corriente (mA)</b>	<b>Presión de Vapor (p.s.i)</b>
3,96	0
4,36	5,01
4,77	10,04
5,16	15,02
5,56	20,04
5,95	25,02
6,36	30,12
6,77	35,2
7,16	40,11
7,55	45,02
7,98	50,17
8,35	55,07
8,75	60,1
9,16	65,26
9,54	70,04
9,95	75,24
<b>10,34</b>	<b>80,14</b>
<b>10,43</b>	<b>81,21</b>
<b>10,51</b>	<b>82,23</b>
<b>10,58</b>	<b>83,1</b>
<b>10,66</b>	<b>84,17</b>
<b>10,73</b>	<b>85,04</b>
<b>10,82</b>	<b>86,07</b>
<b>10,89</b>	<b>87</b>

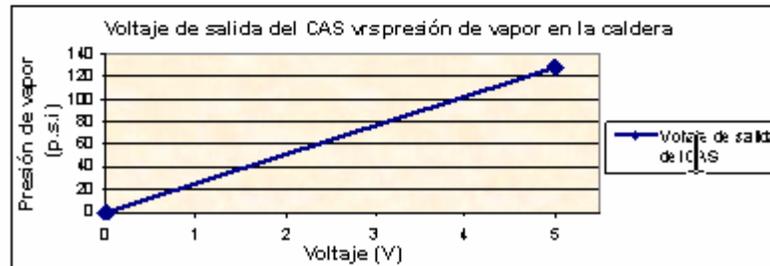
<b>Corriente (mA)</b>	<b>Presión de Vapor (p.s.i)</b>
<b>10,97</b>	<b>88</b>
<b>11,05</b>	<b>88,97</b>
<b>11,14</b>	<b>90,12</b>
<b>11,21</b>	<b>91</b>
<b>11,29</b>	<b>92</b>
<b>11,37</b>	<b>93,1</b>
<b>11,45</b>	<b>94,06</b>
<b>11,54</b>	<b>95,13</b>
<b>11,62</b>	<b>96,12</b>
<b>11,69</b>	<b>97,1</b>
<b>11,78</b>	<b>98,15</b>
<b>11,86</b>	<b>99,19</b>
<b>11,93</b>	<b>100,09</b>
12,33	105,15
12,74	110,26
13,13	115,06
13,52	120,04
13,94	125,37
14,33	130,15
14,73	135,16
15,16	140,57
15,56	145,66
15,94	150,39
19,96	200



a) Curva característica del transmisor de presión WIKA 0 – 200 p.s.i # 8392426



b) Rango de operación de la caldera con el transmisor de presión WIKA.



c) Función de entrada para el microcontrolador PIC16F877A

**Figura 5.2.6** Funciones de entrada y salida para el diseño del acondicionador de señal para el actuador de presión WIKA.

De las gráficas obtenidas en la figura 5.2.6 se visualiza la curva característica de comportamiento del transmisor de presión utilizado el cual varía de 4 a 20 mA para un rango de operación de 0 a 200 p.s.i, figura 5.2.6<sup>a</sup>. La caldera puede operar a un máximo de 128 p.s.i de vapor de agua por lo que utilizando el actuador transmisor de presión WIKA el comportamiento se muestra en la figura 5.2.6<sup>b</sup>.

En la figura 5.2.6<sup>c</sup> se muestra el comportamiento del acondicionador de señal diseñado y con esta información se obtiene la función matemática que describe la salida de voltaje en función de la entrada de presión de vapor.

Voltaje de salida del CAS en función de la corriente del transmisor de presión

$$V(I) = 488.3 \times I - 1.95$$

*V* : voltaje

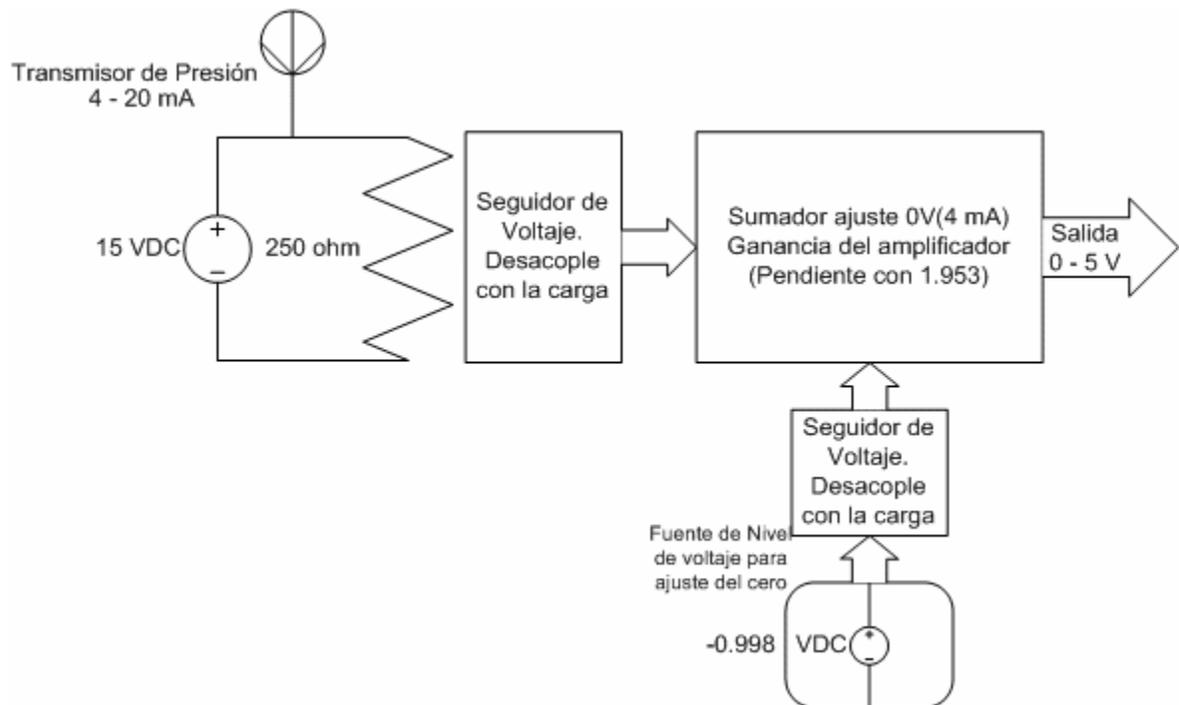
(5.2.1)

*I* : corriente

(5.2.2)

## 5.2.4 Diseño del Acondicionador de señal

El valor de la resistencia de carga obtenido experimentalmente para el transmisor de presión es de 250 ohmios para un voltaje de 15V como alimentación.



**Figura 5.2.7** Diagrama de bloques para el acondicionador de señal

Se realiza el acondicionador de señal a partir de la función obtenida, el valor de la pendiente corresponde a la ganancia de la etapa y el valor de cruce por cero cuando la corriente es de 4mA es el nivel de voltaje cd que se debe utilizar para cancelar el voltaje y ajustar la salida en cero voltios, en este caso la ganancia debe ser de 488.28 y el nivel de cd de -1.95V.

Lo primero que se debe tomar en cuenta es la resistencia máxima que se puede situar en la carga sin que atenué o amplifique el valor del voltaje a diferentes valores de corriente.

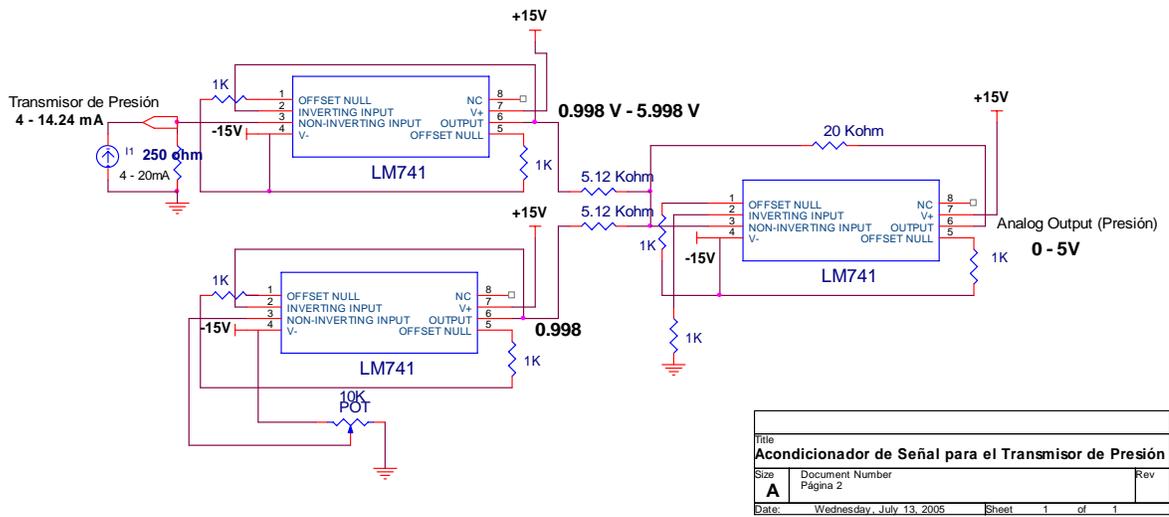


Figura 5.2.8 Circuito acondicionador de señal para el transmisor de presión

## 5.2.5 Sensor de oxígeno



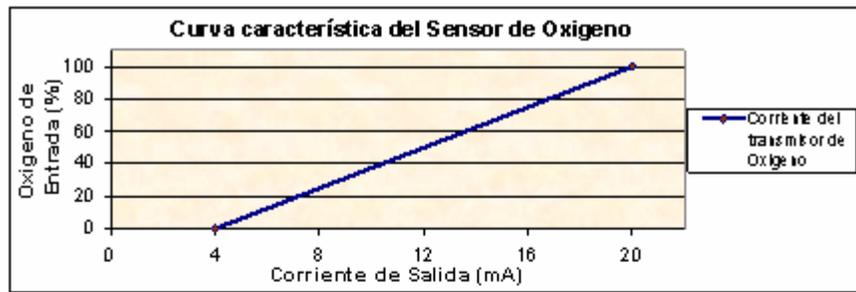
**Figura 5.2.9** Sensor y analizador de oxígeno AZ100 marca ABB

**Tabla 5.2.3** Características del transmisión de oxígeno AZ100 operación de 0 – 100%

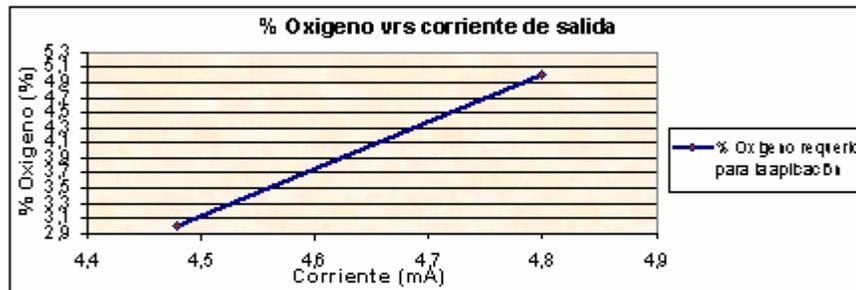
Características	Operación
Alimentación	115/230V AC 50/60Hz
Rango de Temperatura	-20 <sup>0</sup> a 600 <sup>0</sup> C
Función	Lineal y logarítmica
Resolución	0,05% a 20 mA
Máxima resistencia de carga	750Ω (20mA máximo)
Corriente de salida	0-10 mA, 0-20 mA, 4-20mA programables
Alarmas de puntos de operación	2 del tipo contactor (rele)
Vida útil	5 años
Información	16 caracteres, una línea, matriz de puntos, luz de fondo
Media obtenida	5 dígitos, 7 segmentos, luz de fondo

Para el diseño del acondicionador de señal para el transmisor de oxígeno se utilizan las característica de linealidad en su respuesta, el rango de operación es de 0 a 100% de entrada y tiene una salida de 4 a 20 mA que varían proporcionalmente. Se debe cumplir con los siguientes requerimientos en función de de la combustión de la caldera una vez que se encuentra en modulación.

- El rango de operación o porcentaje de oxígeno debe estar entre 3 a 5 %.
- La salida del acondicionador debe proporcionar una voltaje de 0 a 5V.



a) Curva característica del transmisor de Oxígeno AZ100 0 – 100% O<sub>2</sub>.



b) Rango de operación de la caldera con el transmisor de oxígeno AZ100.



c) Función de entrada para el microcontrolador PIC16F877A

**Figura 5.2.10** Funciones de entrada y salida para el diseño del acondicionador de señal para el actuador de Oxígeno Z100

En la Figura 5.2.10 se tiene el comportamiento del transmisor de oxígeno, existe una condición que requiere una aumento en la escala del instrumento de medición para que opere en el rango deseado (3% - 5% de oxígeno) esto por la cantidad de oxígeno resultante en la combustión, un valor fuera de este rango se puede presentar antes de estabilizar el sistema de combustión y para esto es que se carga primeramente la curva característica de la caldera para que una vez establecido un valor predeterminado el sistema se actualice automáticamente y fije o modifique los

actuadores de salida para estabilizar el sistema en la máxima eficiencia de combustión.

Las ecuaciones encontradas para la salida del acondicionar de señal en función del valor de oxígeno y de corriente son las siguientes:

Voltaje de salida del CAS en función de la corriente del transmisor de Oxígeno

$$V(I) = 31.25 * (500 * I - 2.24)$$

$V$  : voltaje (5.2.3)  
 $I$  : corriente

$$\%O(I) = 25 \bullet (250 * I - 1)$$

$\%O$  : oxígeno (5.2.4)  
 $I$  : corriente

$$\%O(V) = \frac{2}{5} * V + 3$$

$\%O$  : oxígeno (5.2.5)  
 $V$  : voltaje

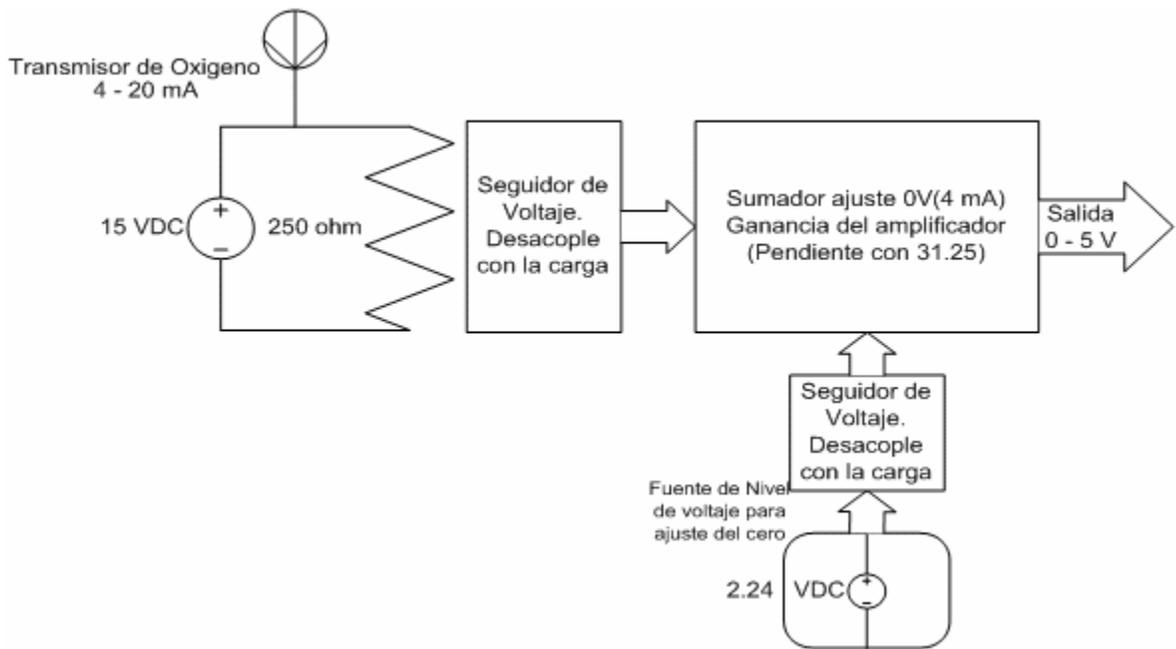


Figura 5.2.11 Diagrama de bloques para el acondicionador de señal

Al aumentar la precisión del sensor se obtiene una mayor pendiente en la función con respecto a la obtenida en el transmisor de presión con una relación de aproximadamente de 32 a 1 en la ganancia para obtener la salida de 0 a 5 V.

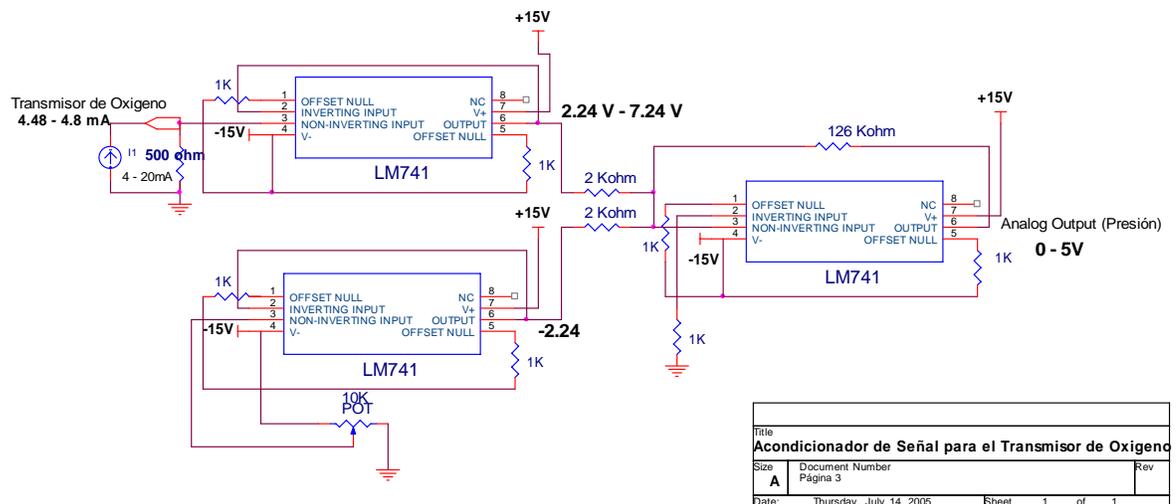


Figura 5.2.12 Circuito acondicionador del transmisor de oxígeno

## 5.2.6 Etapa de salida para el control de los actuadores

Para el diseño de la etapa de salida se analizaron las características de los motores a utilizar. Con la finalidad de aprovechar los recursos disponibles y considerando las salidas a controlar se optó por utilizar motores moduladores controlables por corriente en la entrada, en un relación de 4 a 20 mA acoplando cargas resistivas para obtener el voltaje diferencial entre cada uno de los puntos de control del motor, de forma tal que la variación en la salida alcance un máximo de  $90^{\circ}$ .



Figura 5.2.13 Motor modulador Honeywell IV M9484F1007

Debido a la poca información y que el control actual en la caldera para el que fue diseñado (control proporcional diferencial de resistencia), se diseñó un circuito capaz de manejar la posición de salida a través de un voltaje de referencia en la entrada.

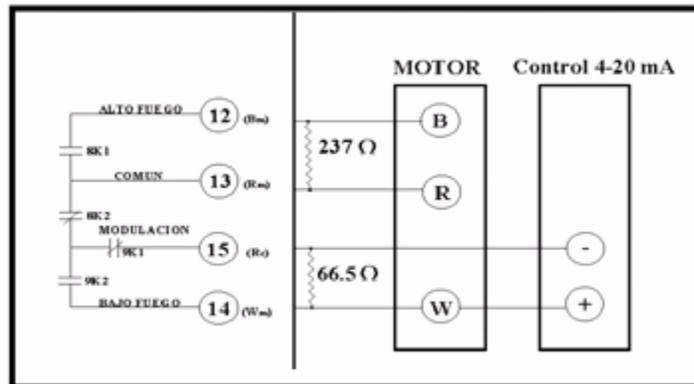


Figura 5.2.14 Motor odutrol serie 90 (0-135 ohm) con control 4-20 mA

Utilizando un a fuente de corriente y un red de resistencias como se muestra en la Figura 5.2.14 se obtuvieron las siguientes tablas y gráficas de comportamiento.

**Tabla 5.2.4** Posición del aspa en función de la corriente de entrada

<b>I (mA)</b>	<b>Posición (deg)</b>
3,67	5
4,14	8
4,6	10
5,05	13
5,52	16
6,02	20
6,52	24
7,06	27
7,56	31
8,14	35
8,73	38
9,26	41
9,8	45
10,35	49
11,01	53
11,59	57
12,19	60
12,82	65
13,56	70
14,2	74
14,81	78
15,44	83
16,05	86
16,68	90

**Tabla 5.2.5** Posición del aspa en función del voltaje de entrada

<b>V (v)</b>	<b>Posición (deg)</b>
0,558	5
0,589	8
0,618	10
0,648	13
0,679	16
0,711	20
0,744	24
0,78	27
0,811	31
0,847	35
0,888	38
0,924	41
0,96	45
0,966	49
1,04	53
1,078	57
1,118	60
1,158	65
1,21	70
1,252	74
1,293	78
1,336	83
1,376	86
1,418	90

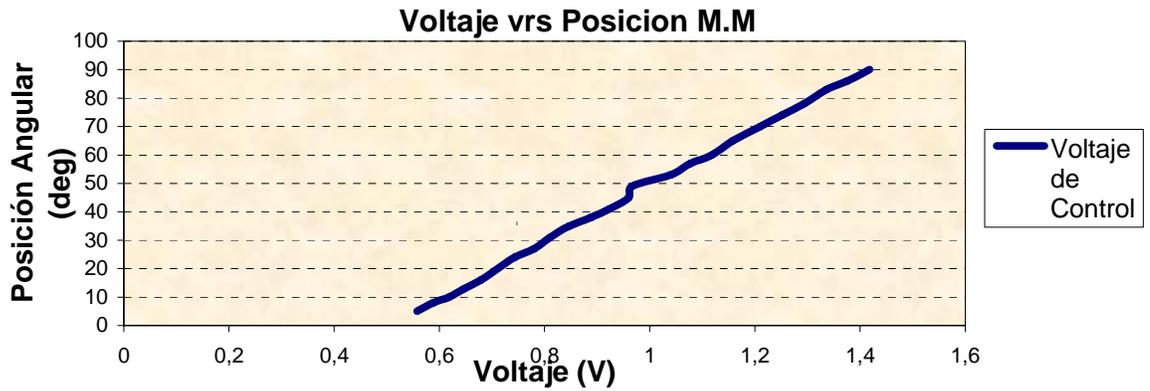


Figura 5.2.15 Voltaje de entrada generado por la fuente de corriente de 4 – 20 mA

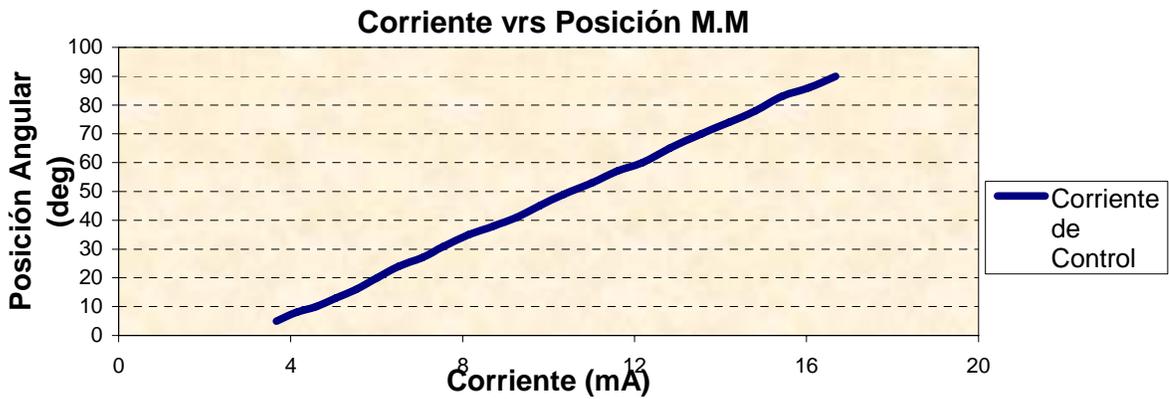


Figura 5.2.16 Posición del motor modulador en función de la corriente de entrada producido por la fuente de alimentación

F

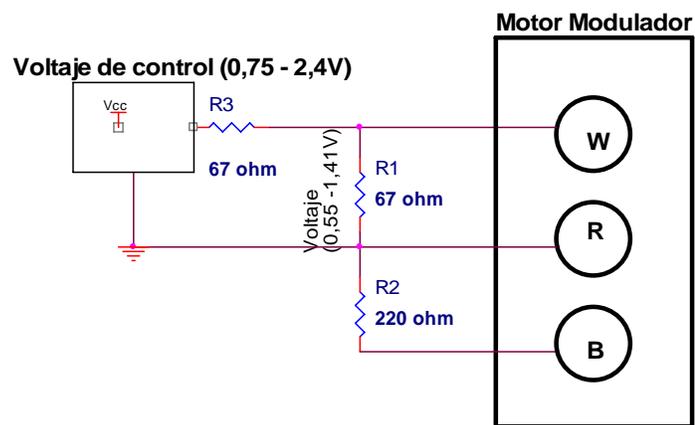


Figura 5.2.17 Fuente de control y circuito controlador de posición

Para poder controlar la posición del actuador de combustible y aire se utiliza el circuito de la Figura 5.2.17 donde se realiza un divisor de tensión entre la resistencia R1 (Resistencia equivalente en paralelo entre las terminales W-R y la resistencia de 67 ohmios) y R3 con el fin de proporcionar la corriente de polarización para el control de disparo de los semiconductores triacs internos que son parte del controlador que posee el motor modulador Honeywell (ver anexo 10.5).

Con las propiedades de salida del controlador PIC16F877A que no tiene la capacidad de entregar señales analógicas sino únicamente digitales es que se hace necesario el diseño de una fuente controlable de voltaje utilizando un convertidor digital a analógico (DAC), para esta aplicación se utilizan los puertos de 8 bits, puertos de salida D y C.

## 5.2.7 Convertidor de señal digital a analógico



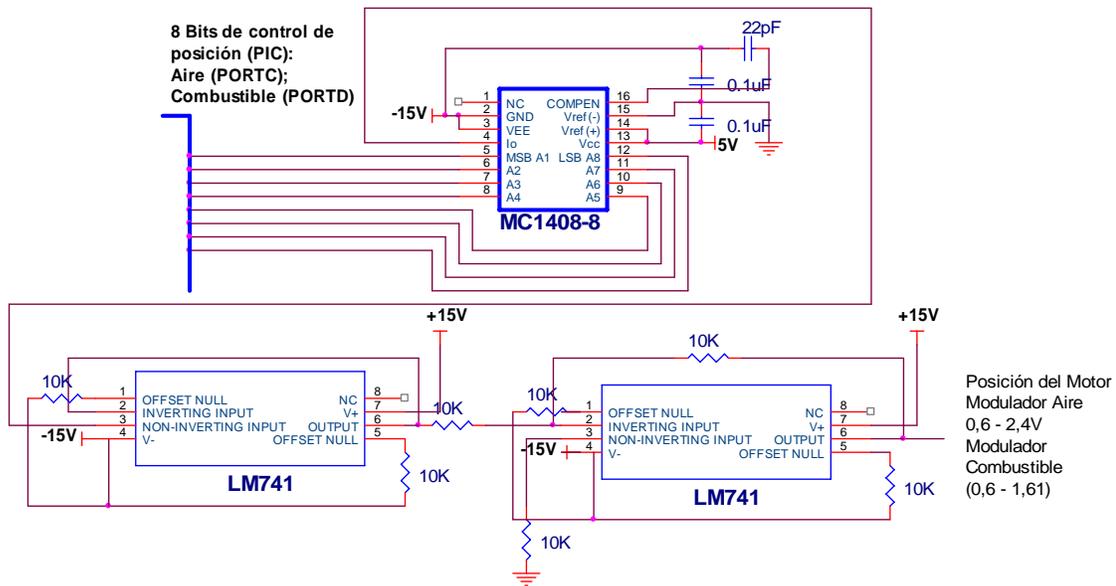
**Figura 5.2.18** Convertidor digital analógico MC1408-8

El valor de la salida analógica se puede representar como el producto del valor digital en la salida por un voltaje de referencia. Utilizando 8 bits se obtiene un rango de salida de 20 mV como resolución entre cada valor digital de modo  $2^8$  ( $2^8=256$ ), para operar de 0 a 5V. El valor en la salida debe ser menor a 0.6V para el valor de  $0^0$  grados en ambos actuadores y de 1.61V para el valor máximo de  $50^0$  en el actuador de aire, y para el actuador de combustible un voltaje de 2.4V obteniendo el valor máximo de  $90^0$  de posición que corresponde a la máxima apertura del al válvula mecánica.

$$V_{sal} = D * V_{REF}$$

*D*: valor \_ digital

*V<sub>REF</sub>* : voltaje \_ referencia



Title		
Convertidor Digital Analógico Motor Modulador		
Size	Document Number	Rev
A	Página 4	
Date:	Friday, July 15, 2005	Sheet 1 of 1

Figura 5.2.19 Etapa de acople para el manejo del motor modulador de aire y combustible

### 5.3 Descripción del software

Para el sistema de control se utilizaron las palabras de instrucción del microcontrolador microchip PIC16F877A con el programa PICCW que es una herramienta para el desarrollo de microrutinas que funciona como compilador y utiliza como fundamento el lenguaje de programación C que una vez compilado genera un archivo del tipo \*.asm (Hexadecimal, lenguaje de máquina) que es descargado al controlador con cada una de las instrucciones para la programación de registros, temporizadores, selección de modos y dirección de puertos para entradas y salidas.

Para obtener los resultados esperados en la programación de los parámetros de la caldera se realizaron los diagramas de flujo que expresen la secuencia de operación del sistema. Para cada una de las operaciones existen diferentes rutinas que han sido desarrolladas de forma independiente o como etapas de desarrollo que finalmente aparecen interconectadas entre si para obtener finalmente el software de programación para el microcontrolador número uno y el microcontrolador número dos.

En la Figura 5.3.1 se muestra la secuencia de encendido del controlador, por medio de la pantalla se le indica al usuario cada una de las operaciones y el estado actual de la programación. En esta figura lo que se realiza es el ingreso al sistema y si el operador desea cargar o almacenar una nueva curva característica de la caldera, incluyendo el exceso de oxígeno en la combustión debe ingresar a la opción de modifica datos presionando la tecla S/M. En el caso que ya se encuentren los datos almacenados y no se deseen modificar aparecerá la opción para la selección del valor de vapor de agua que se requiere en la salida de la caldera. Una vez seleccionados cada uno de los parámetros de operación, presión de vapor, oxígeno y curva característica y si los datos son correctos se ingresa al modo automático como condición inicial. La entrada de operación esta directamente relacionada o

totalmente dependiente por la acción del controlador Honeywell que tiene actualmente la caldera. En este punto el controlador espera 3 señales del mismo tipo para bajo fuego, alto fuego o modulación.

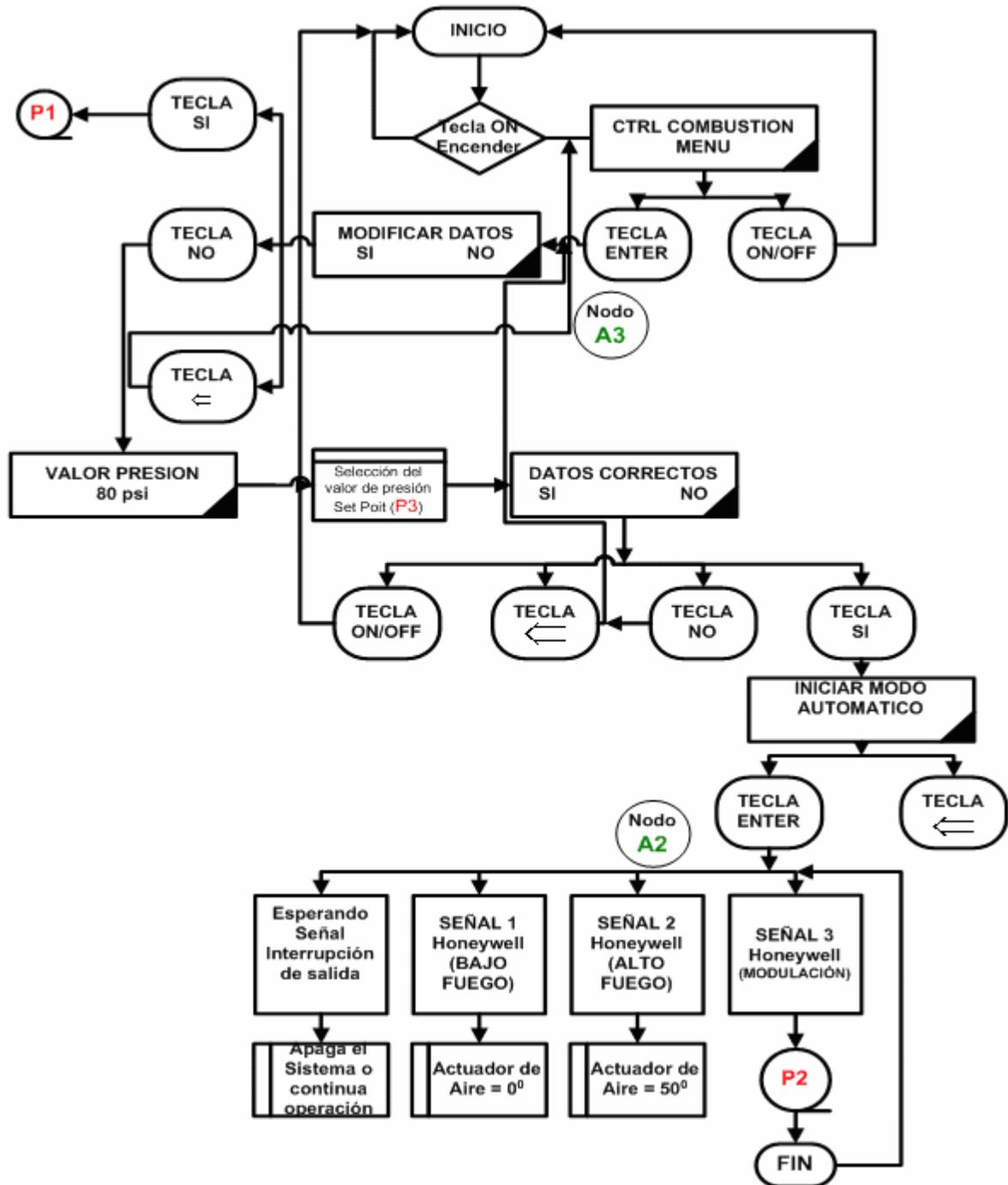
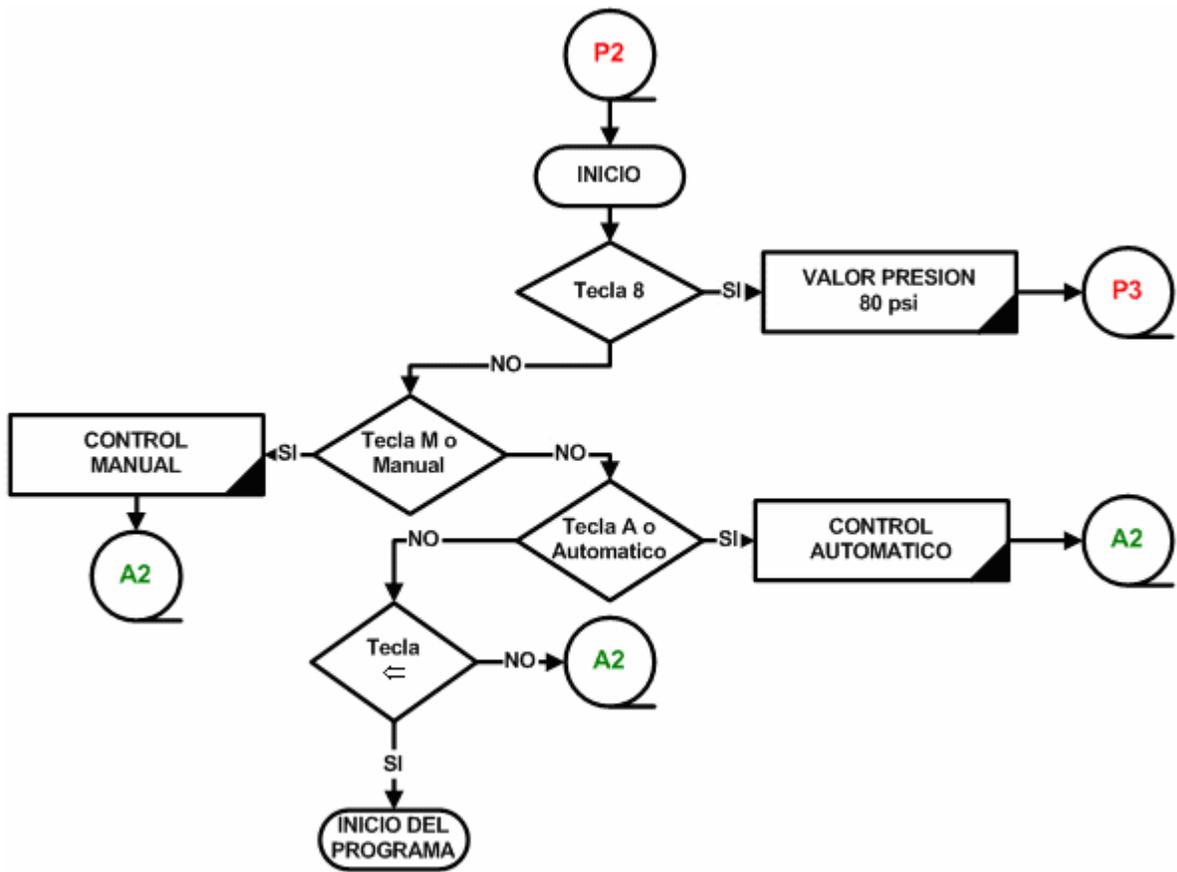


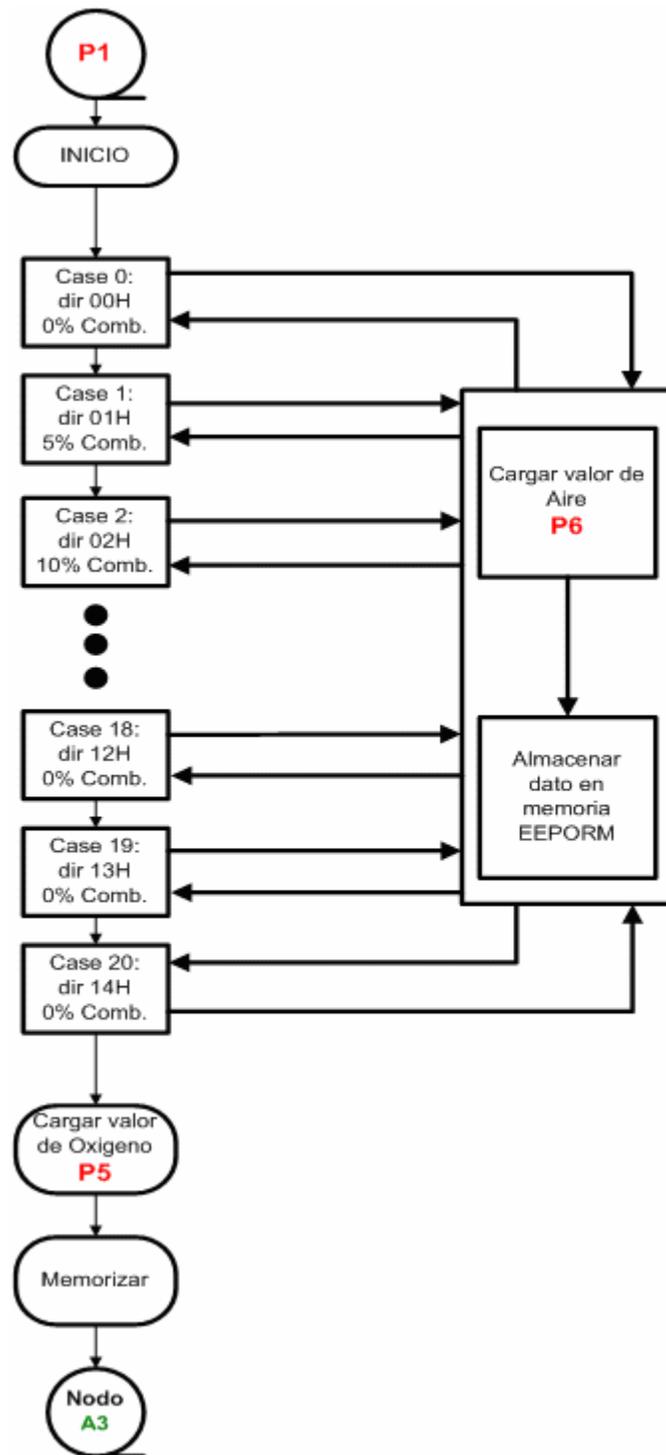
Figura 5.3.1 Diagrama de flujo del programa del microcontrolador PIC16F877 #1



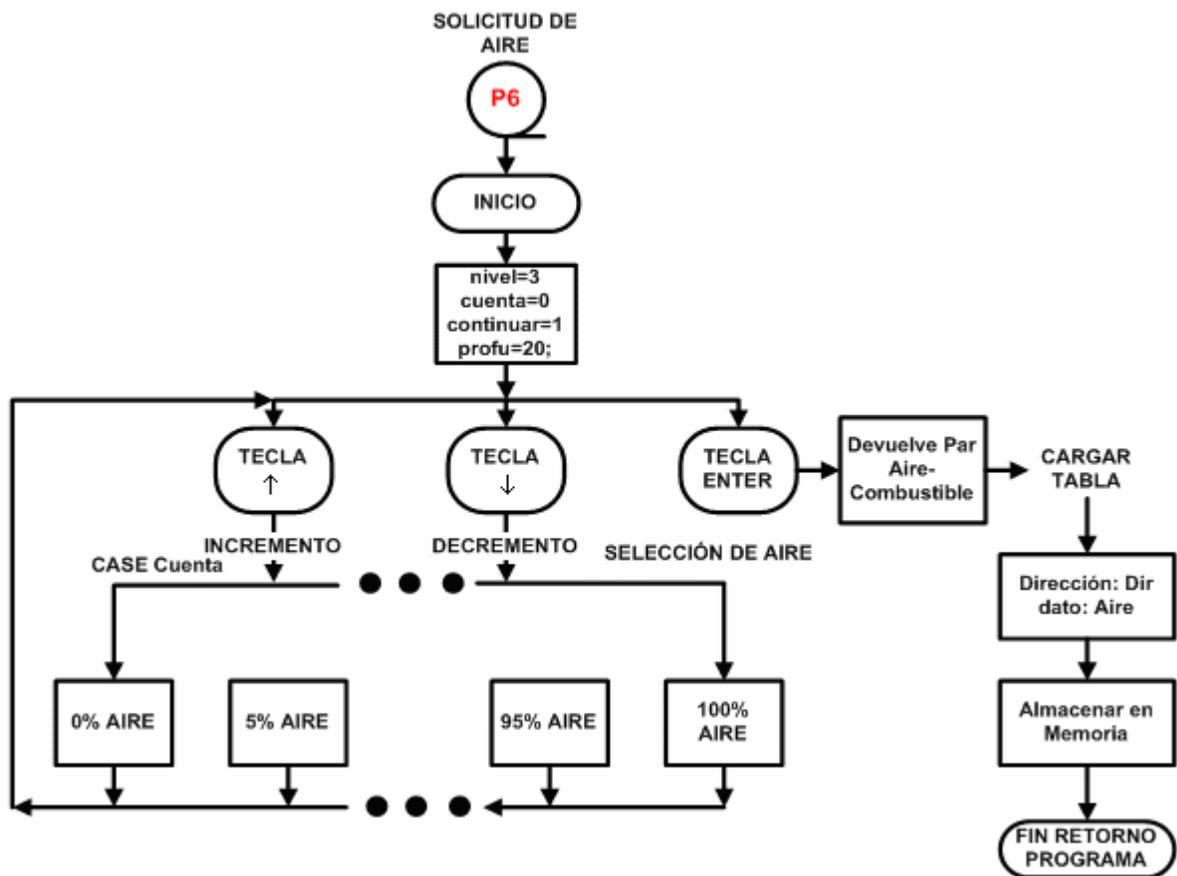
**Figura 5.3.2** Diagrama de flujo de la subrutina de control para la selección de operación (Manual – Automático)

Una vez realizada la verificación del valor de oxígeno y de presión el sistema se esperan posibles interrupciones para el cambio de operación a manual o automático y para cambiar el valor de presión de vapor en la salida. También existe la posibilidad de salida o detención seleccionado por el usuario o por una falla de operación. En la Figura 5.3.2 se observa la operación de la etapa de modulación.

Para almacenar los datos correspondientes a la curva característica de la caldera se ingresa al procedimiento P1 que corresponde al ingreso del valor de combustible en rangos de 5% de apertura y seleccionando el par de aire que indique el valor de exceso de oxígeno seleccionado para la operación de la caldera, existen 20 valores por almacenar más el valor de oxígeno requerido. La Figura 5.3.3 muestra la forma en que se almacenan los datos, por medio de una estructura case aparecen en la pantalla los valores de 0%, 5%, 10% y de esta forma sucesivamente el valor de combustible y el parámetro variable de aire que es ajustable utilizando la teclas ↑, ↓. Los datos son guardados en la memoria no volátil EEPROM a partir de la dirección 00H en la sección reservada para datos. En la dirección 20H se almacena el valor de oxígeno, estos datos no varían hasta que se realicen variaciones en los datos de operación de la caldera.



**Figura 5.3.3** Diagrama de flujo de la subrutina para cargar la curva característica de la caldera Aire-Combustible



**Figura 5.3.4** Diagrama de flujo para la selección del valor de aire para la curva característica

La selección del valor de aire para cada valor de combustible, el valor de oxígeno y el valor de presión se muestran en la Figura 5.3.4, 2.2.24 y 5.2.25 respectivamente. La selección se realiza por medio de la indicación de la pantalla y guía al programador a seguir cada uno de los pasos hasta tener todos los datos necesarios, en caso contrario o al existir un error en la programación se puede efectuar nuevamente la programación.

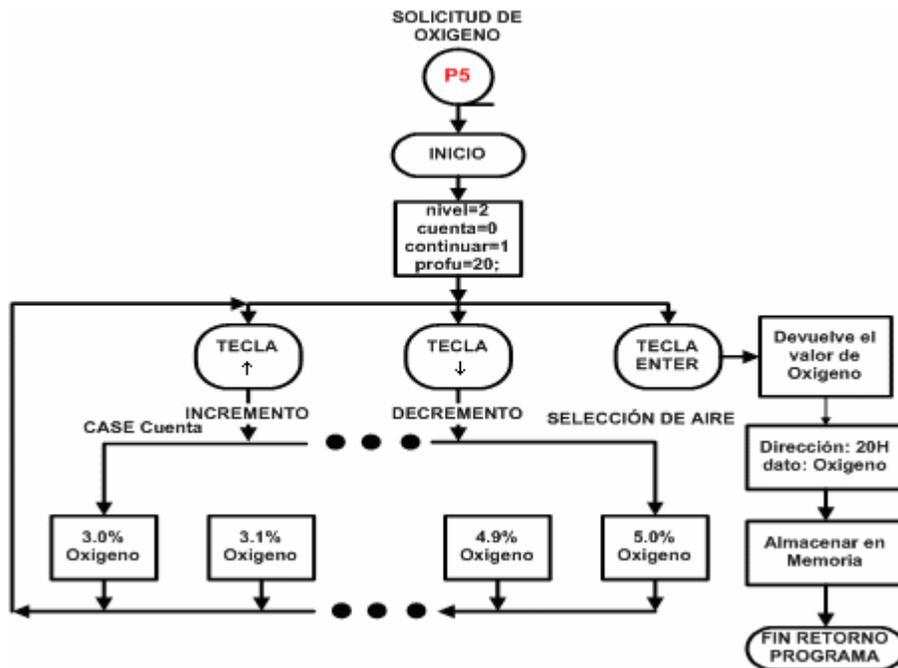


Figura 5.3.5 Diagrama de flujo de la selección y almacenamiento del valor de oxígeno de operación de la caldera Kewanee 1000 hp

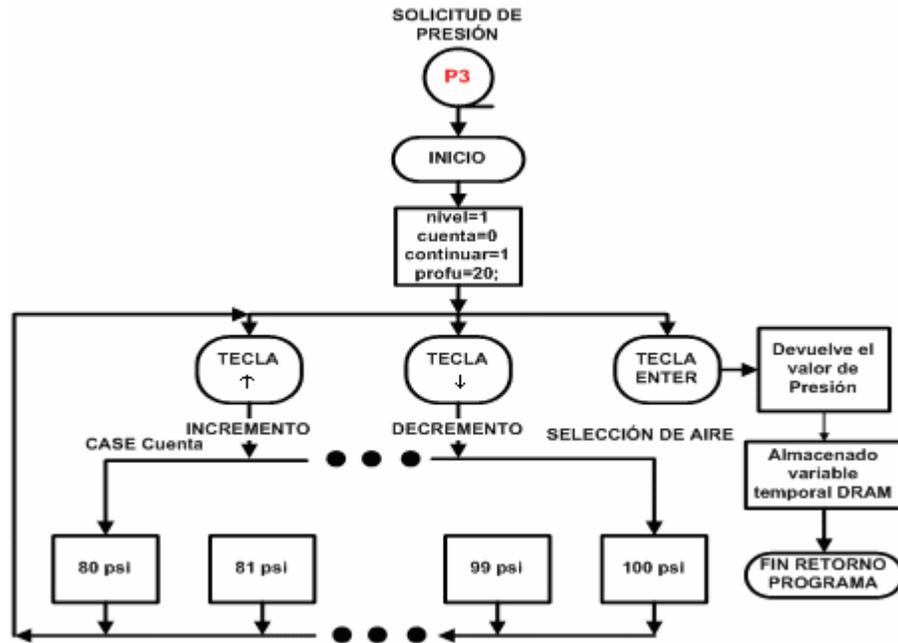
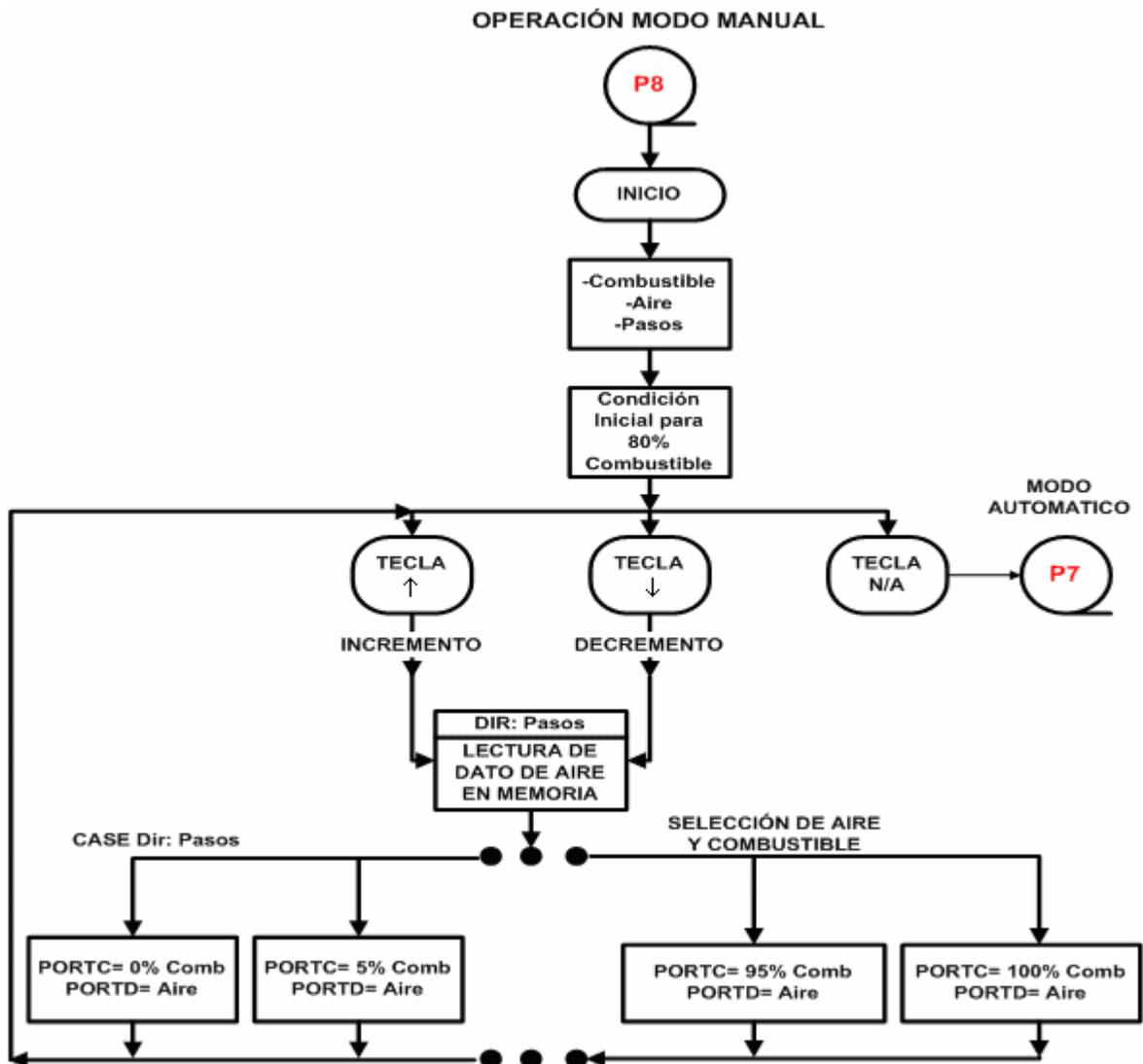
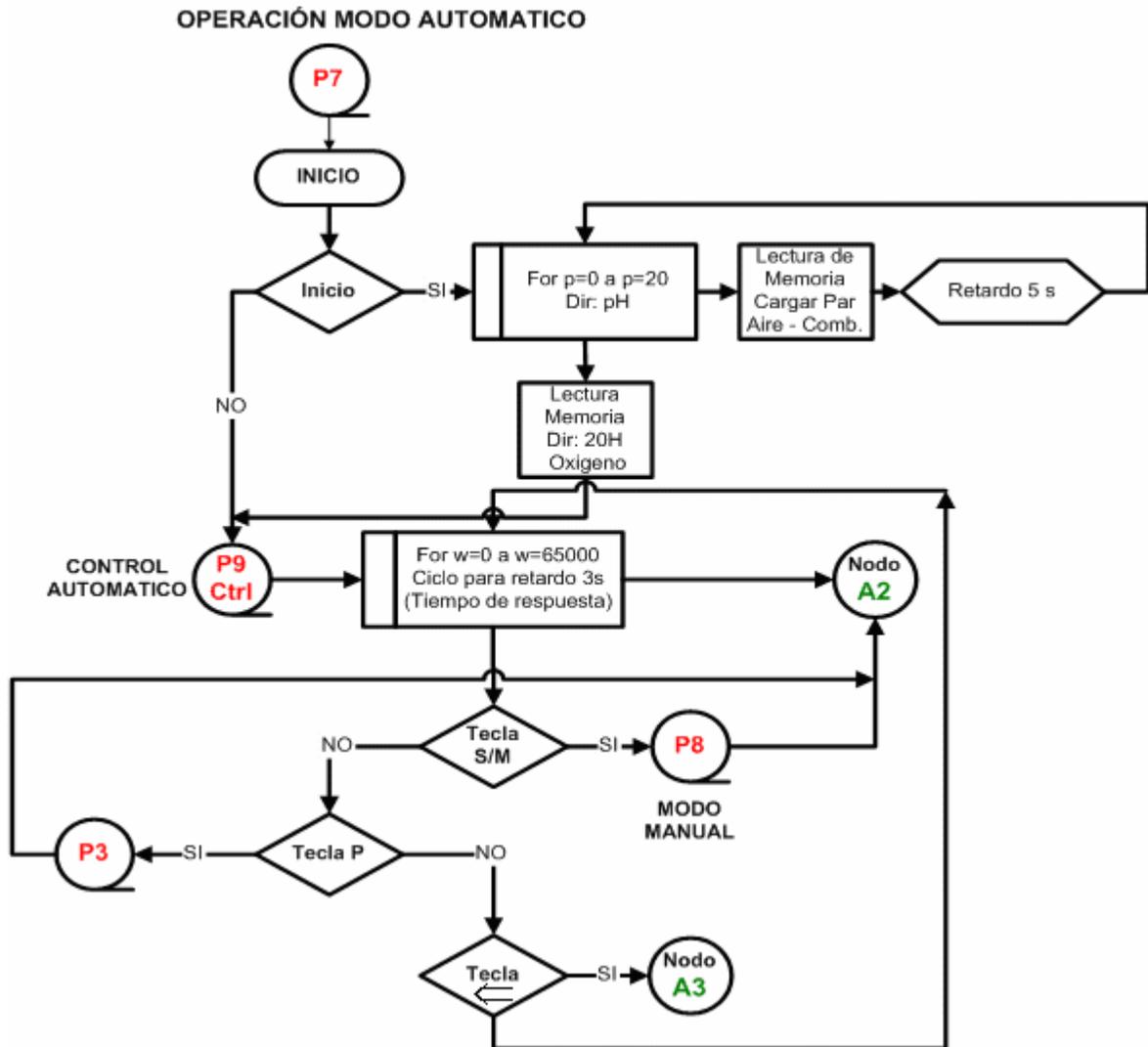


Figura 5.3.6 Diagrama de flujo de la microrutina programada para la selección del valor de presión de vapor de salida de la caldera



**Figura 5.3.7** Diagrama de flujo de la microrutina para la operación manual, programado en PIC16F877 #2

Para la entrada al modo manual debe existir una interrupción por parte del operador para indicarle que el va a tomar el la operación del combustión y el valor de carga de vapor en la salida de la caldera. En este caso lo que se hace es que el sistema toma el los valores de la curva característica de la caldera y posiciona directamente la apertura de la válvula mecánica de combustible y las persianas para el porcentaje de entrada de aire que se encuentra programado.



**Figura 5.3.8** Diagrama de flujo de la microrutina para la operación automática, programado en PIC16F877 #2

En el modo automático, Figura 5.3.8 se efectúa la lectura del valor de oxígeno y de presión de vapor de agua en la salida, después de convertir estas variables analógicas en valores discretos se efectúan las modificaciones necesarias en los actuadores de salida, después de esto el sistema espera o realiza el tiempo de respuesta del sistema para efectuar una nueva lectura de los valores de entrada, durante este tiempo de espera se atienden la interrupciones para el cambio a modo manual, detención o cambio del valor de carga de presión de vapor de agua en la salida de la caldera.

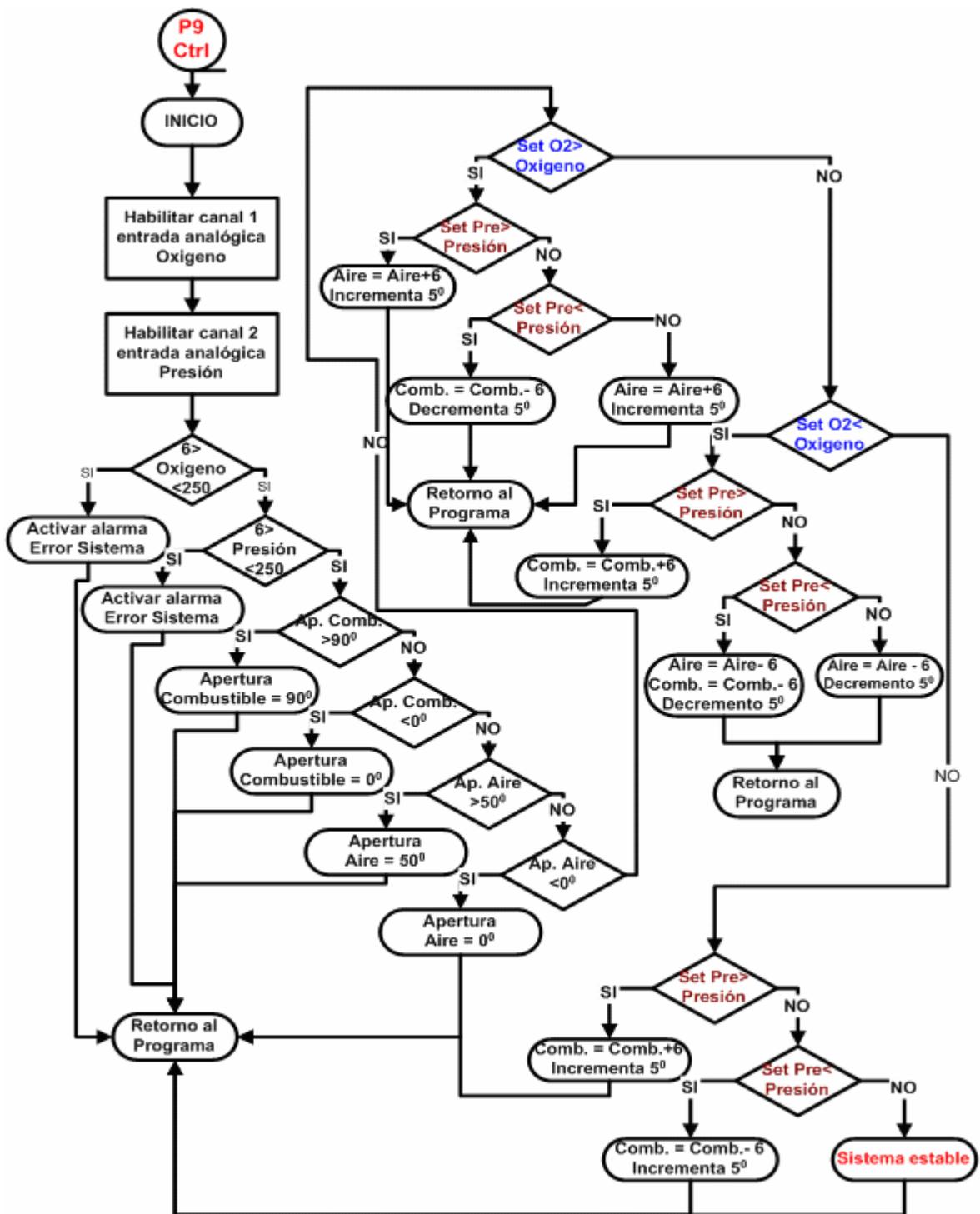


Figura 5.3.9 Diagrama de flujo de la rutina de verificación de variables para el control automático, programado en el PIC16F877 # 2

En la modulación y específicamente en el modo automático se efectúa el control utilizando un lazo de retroalimentación cerrado que proporciona las condiciones actuales de operación o generación de gases producto de la combustión y de la cantidad de calor transmitido a través de las tuberías de hierro hacia la presencia de agua para llevarla a la temperatura de ebullición para generar un flujo de vapor hacia las zonas donde se requiere el vapor.

En la Figura 5.3.9 se tiene la secuencia de obtención de parámetros en tiempo real del valor de oxígeno en la combustión y del valor de presión de vapor de agua generado, después de obtener estos datos se verifican si se encuentran dentro de los rangos adecuados de operación, en caso contrario activara una señal de alerta para indicar que hay un error en la ejecución y el la adquisición de datos. Si los valores de entrada son correctos se verifica el estado de la posición de los actuadores, esto con el objetivo que operen en el rango de 0 a 90<sup>0</sup> para el actuador de combustible y de 0 a 50<sup>0</sup> para el actuador de aire considerando los valores de voltaje de salida de control para cada uno de ellos, esto con el objetivo de asegurar que este valor no exceda o disminuya el voltaje en que debe operar.

Una vez superada estas condiciones el sistema ajusta los parámetros de salida de los actuadores para corregir la señal de error que se encuentra en la entrada. En el diagrama de flujo de la figura se pregunta como condición inicial el valor de oxígeno presente en la combustión, si el valor presente es inferior al punto de operación se pregunta por la condición de presión, si el valor de presión actual es inferior al punto de operación se ajusta únicamente la cantidad de aire abriendo las persianas con el actuador de aire. Si el valor de presión actual es superior se debe cerrar la entrada de combustible en un 5%, y en el caso en que la presión de vapor de agua se encuentre estable se debe realizar simplemente una apertura del actuador de aire para aumentar la cantidad de oxígeno producto de la combustión.

En el caso en que el porcentaje de oxígeno actual sea superior al de operación y el valor de presión de vapor es inferior al valor del punto de operación se aumenta la apertura del actuador de combustible y del aire para aumentar la presión y para asegurar que no exista un faltante de oxígeno que deteriore la estructura de la caldera por corrosión. Si la cantidad de presión de vapor es superior al punto de operación se debe realizar un cierre en el actuador de combustible y en el actuador de aire simultáneamente para estabilizar nuevamente la caldera. En el caso que la presión sea estable y se encuentre en la condición de exceso de oxígeno el sistema proceda a realizar una disminución en la cantidad de flujo de aire que ingresa a la llama por el cañón disminuyendo la apertura del actuador de aire.

En el caso que el valor de oxígeno actual sea igual al valor del punto de operación seleccionado se verifica la condición de presión de vapor de agua, si esta presión es inferior al punto de operación programado se realiza un aumento de la cantidad de flujo de combustible y de la cantidad de aire de entrada, en caso contrario si el valor de presión de vapor actual es superior se efectúa un cierre en el actuador del combustible.

En el caso en que la señal de error sea igual a cero, es decir que el valor de oxígeno y presión obtenidos en la salida corresponden a los valores programados como puntos de operación, el sistema está en la condición de estable y los actuadores no sufren ninguna variación con la posición que tienen bajo esta condición.

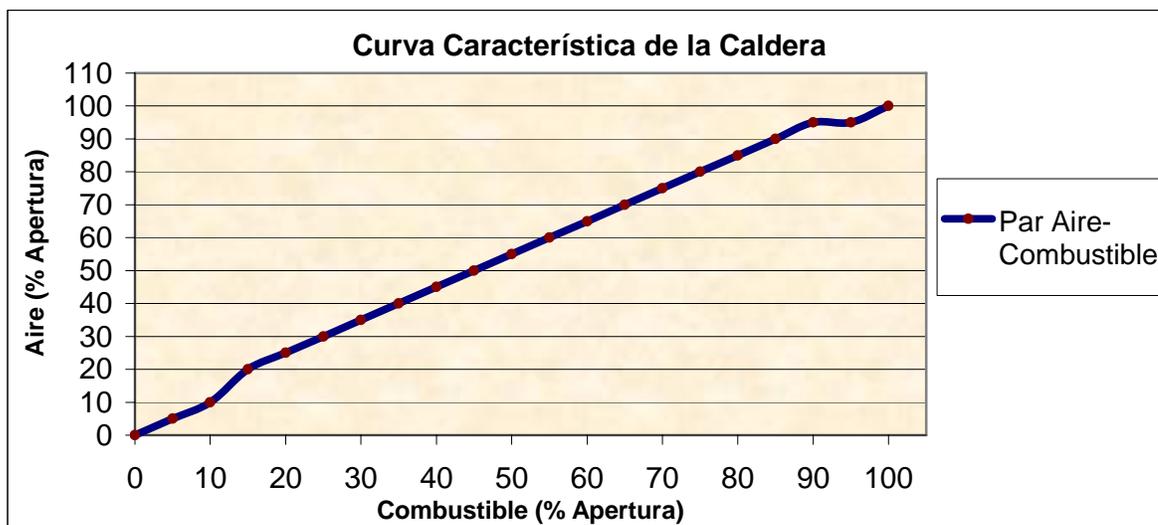
## CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1 Resultados

#### 6.1.1 Obtención de curva característica.

Tabla 6.1.1 Datos obtenidos para la curva característica de la caldera Kewanee

% Combustible	% Aire
0	0
5	5
10	10
15	20
20	25
25	30
30	35
35	40
40	45
45	50
50	55
55	60
60	65
65	70
70	75
75	80
80	85
85	90
90	95
95	95
100	100



**Figura 6.1.1 Curva característica de la caldera Kewanee relación Aire – Combustible**

Para el cálculo del valor de oxígeno de operación de la caldera o la relación de exceso de aire se obtiene a partir de los datos anteriores y el valor obtenido corresponde a 4% de oxígeno.

### 6.1.2 Secuencia de encendido en modo automático.

Tabla 6.1.2 Apertura de la válvula de combustible en el tiempo para el encendido (Modulación)

Tiempo (s)	% Apertura Combustible
0	0
4	5
8	10
12	15
16	20
20	25
24	30
28	35
32	40
36	45
40	50
44	55
48	60
52	65
56	70
60	75
64	80

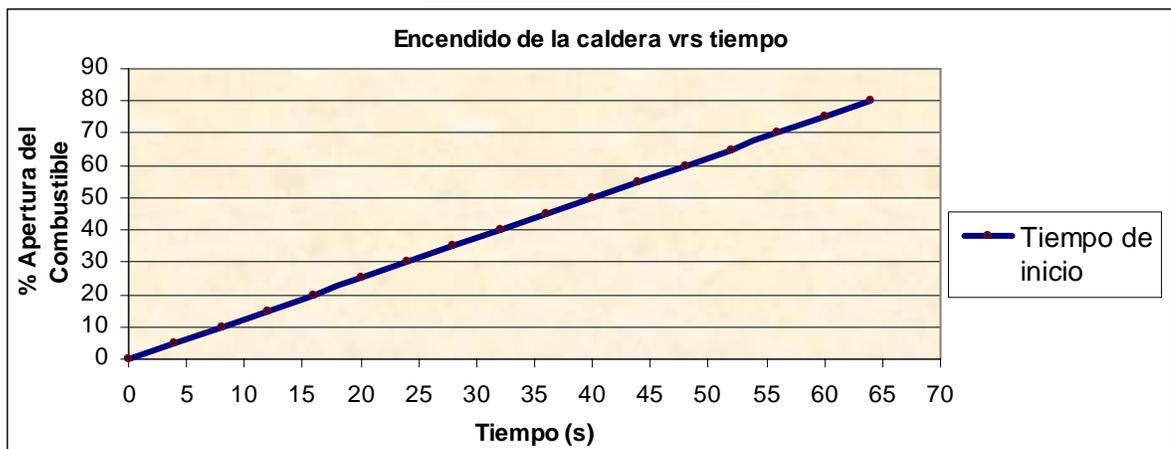


Figura 6.1.2 Gráfica de encendido en función del tiempo para la etapa de modulación

**Tabla 6.1.3** Valores obtenidos para la modulación después de alcanzar la presión de operación en porcentaje de apertura del combustible y entrada de aire (Modulación)

<b>Tiempo (s)</b>	<b>% Apertura Combustible</b>	<b>% Apertura Aire</b>
3000	100	100
3003	100	100
3006	100	100
3009	100	100
3012	100	100
3015	100	100
3018	100	100
3021	100	100
3024	95	95
3027	90	95
3030	85	90
3033	80	85
3036	75	80
3039	70	75
3042	70	75
3045	70	75
3048	75	80
3051	80	85
3054	75	80
3057	80	85
3060	80	80
3063	80	85
3066	80	80
3069	80	80
3072	80	85
3075	80	80
3078	80	85
3081	80	85
3084	80	85

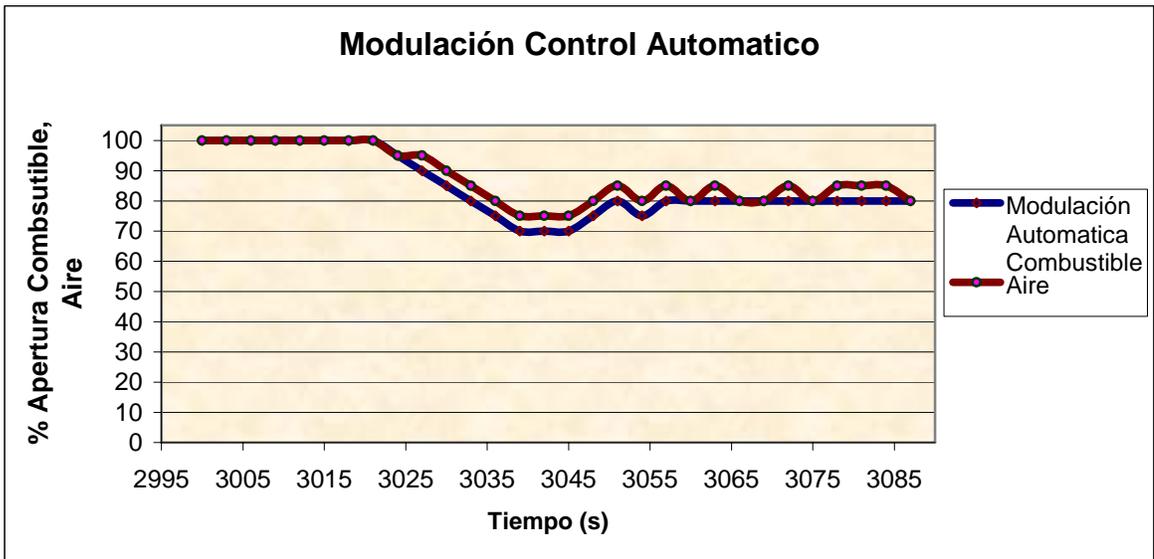
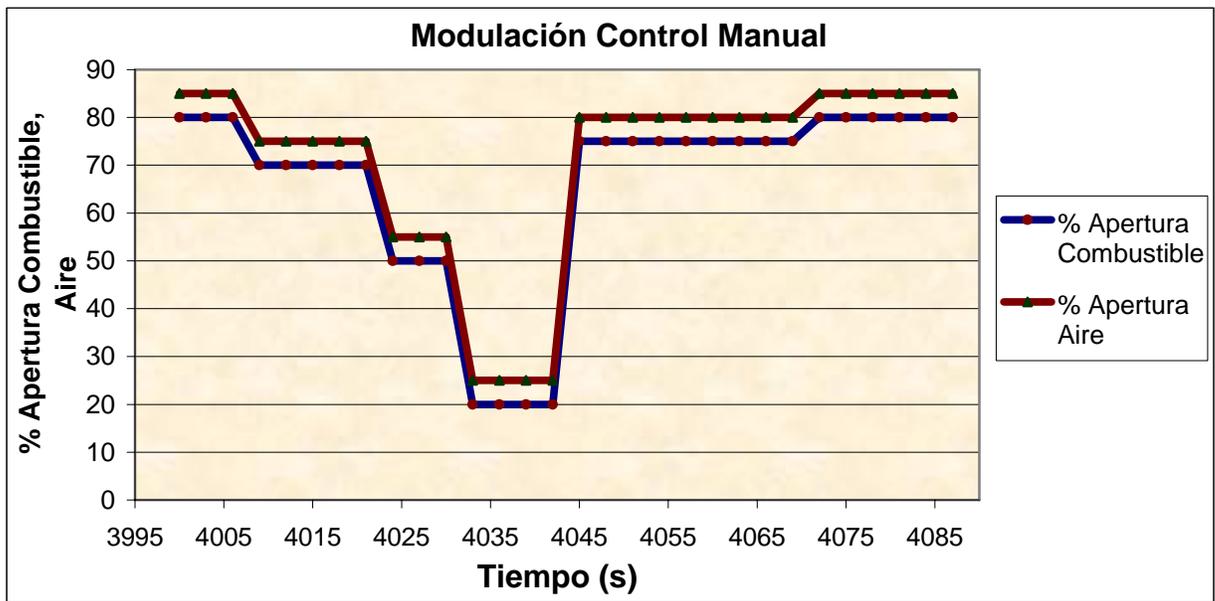


Figura 6.1.3 Grafica de apertura del aire y combustible para etapa de modulación automática

**Tabla 6.1.4** Datos del porcentaje de apertura y aire a partir de la operación manual de la caldera para variar la presión de vapor en la salida

<b>Tiempo (s)</b>	<b>% Apertura Combustible</b>	<b>% Apertura Aire</b>
4000	80	85
4003	80	85
4006	80	85
4009	70	75
4012	70	75
4015	70	75
4018	70	75
4021	70	75
4024	50	55
4027	50	55
4030	50	55
4033	20	25
4036	20	25
4039	20	25
4042	20	25
4045	75	80
4048	75	80
4051	75	80
4054	75	80
4057	75	80
4060	75	80
4063	75	80
4066	75	80
4069	75	80
4072	80	85
4075	80	85
4078	80	85
4081	80	85
4084	80	85



**Figura 6.1.4** Grafica de apertura del aire y combustible para etapa de modulación manual

## 6.2 Análisis de Resultados

De acuerdo al estudio químico realizado para obtener la relación entre los elementos que componen el búnker y el aire al efectuarse la combustión y al alcanzar las temperaturas de ruptura y unión en otras moléculas se obtiene que una disminución de exceso de oxígeno en la combustión aumenta la eficiencia, sin embargo esto conlleva a un aumento del valor de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Esto implica que se debe obtener el valor mínimo de oxígeno que permita mantener el resto de los elementos que son restringidos por la ley con el fin de obtener la eficiencia máxima de combustión en la caldera. Con los últimos datos obtenidos en la medición de calderas, la caldera Kewanee 1000 hp tiene una eficiencia de combustión del 85.9% con un exceso de oxígeno del 4.8%, este valor es bastante elevado y se encuentra cercano al valor límite superior permitido por la ley (3% - 5%). Al disminuir el valor de oxígeno a 3.3% se logra obtener un 2% de eficiencia de combustión que llegar un valor aceptable e importante el los objetivos planteados. Para esto se debe obtener la curva característica de la caldera para efectuar la medición para diferentes valores de entrada o flujo de búnker hacia la llama, todo esto con el fin de obtener el punto de operación de oxígeno de la caldera.

Entre los problemas encontrados efecto de la combustión está la formación de ácidos y óxidos que producen daños en el medio ambiente y directamente en la salud humana (ver Anexo 10.4). En la caldera también se encuentran gran cantidad de daños producidos por la corrosión en la chimenea y en los tubos que transportan el fuego produciendo bloqueo y una incorrecta transferencia de calor hacia el agua. Todo esto implica un mayor mantenimiento en la caldera y una responsabilidad legal por los las consecuencias producidas al medio ambiente.

Con los datos recopilados del funcionamiento de la caldera se determino que el ajuste de eficiencia de la caldera no tiene un parámetro o indicador que sea controlado o manipulado por la empresa para detectar el correcto funcionamiento de

la caldera y propiamente en la combustión. La empresa LAMDA realiza la medición anual con el fin de entregar estos resultados al Ministerio de Salud (ente regulador de la Ley de emisión de gases para calderas), y a partir de estas mediciones se realizan los ajustes mecánicos necesarios para dejar la caldera en las mejores condiciones posibles, algo que en realidad no es la más óptimo para obtener una solución que proporcione los mejores resultados.

Existen diferentes formas de neutralizar los efectos de los elementos contaminantes de búnker los cuales consisten en la aplicación de compuestos químicos que funcionan como aditivos para disminuir el efecto del azufre y del Nitrogeno del aire una vez efectuada la combustión. Esto resulta en una mejora considerable de acuerdo a información obtenida en la empresa LAICA (Liga de la Caña, Ing Juan C. Loaiza) quien aplica estos productos y ha percibido las mejoras directas en la eficiencia de combustión.

Para los actuadores utilizados se obtuvieron las curvas características de comportamiento, para obtener la Tabla 5.2.4 y Tabla 5.2.5 se utilizo el circuito de la Figura 5.2.17, el motor modulador Modutrol IV utiliza un control proporcional de de control entre cada una de las terminales B, W y R, para esto se hicieron la modificaciones necesarias para entregar las señales de corriente y voltaje para efectuar cada uno de los pasos del motor, la resolución de subida ( $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ ) es de 20 pasos que corresponden a  $4.5^{\circ}$  y para la resolución de bajada ( $90^{\circ}$  a  $0^{\circ}$ ) es de 30 pasos que corresponden a una variación de  $3^{\circ}$ .

A partir de los datos obtenidos con la curva característica se determinó el voltaje de salida entregado por el controlador para el manejo de la posición del cada uno de los actuadores. El valor de 0.6 V corresponde al valor límite inferior para la correspondencia mínima para obtener la posición de  $0^{\circ}$  que es el cierre completo, para 2.4 V se tiene la posición máxima de apertura, entre estos valores se debe fijar

cada uno de los pasos que corresponden a 90 mV de subida y 60 mV para el paso de 90° a 0°.

La resolución o precisión de estos motores no son las ideales para obtener un control eficiente debido a que existen valores intermedios que pueden proporcionar un error significativo (+-5%) en la cantidad de flujo de entrada de aire y de combustible como se observa en la Tabla 5.2.5 para los diferentes valores de voltaje de entrada en el circuito de control.

Para el transmisor de presión también se realizaron las mediciones necesarias para determinar la resistencia de carga para un voltaje de alimentación de 15V, obteniendo un valor de 255 ohmios que corresponde a un valor muy cercano al proporcionado por el fabricante al aplicar la formula

$$R_{CARGA} = \frac{(V_{CC} - 10)}{0.02} = \frac{(15 - 10)}{0.02} = 250\Omega \quad (6.2.1)$$

Con los datos tabulados en la Tabla 5.2.2 y representados en la Figura 5.2.6 se obtiene la curva característica del transmisor de presión. Utilizando equipo de calibración (Calibración de Procesos Fluke 1743B) fue posible generar los valores de presión de entrada y ser comparados con el valor de corriente a través de la resistencia de carga. El rango de operación de este transmisor de presión es de 0 a 200 p.s.i. En la aplicación de la caldera se utilizo para que opere en un rango de 0 a 128 p.s.i. con una resolución en el acondicionador de señal diseñado de un valor de 2 decimal entre cada escala correspondiente a una cambio de presión de 1 p.s.i. La operación promedio de la caldera de de 95 libras por pulgada cuadrada, de aquí que se haya seleccionado una variación de la carga de la caldera variable entre 80 a 100 p.s.i en la presión de vapor de agua para el ajuste o operación.

Los dispositivos periféricos utilizados para la programación, teclado y pantalla son configurados directamente por el controlador que se encarga de verificar el ingreso de datos al presionar las diferentes teclas presionados, para esto se utiliza un teclado matricial de 4 X 3 del cual se utilizan 8 de esas teclas, Para mostrar el estado actual de la programación y estado de operación se utiliza una pantalla de 2 líneas de 16 caracteres cada una en el cual se indican los valores y puntos de operación de oxígeno, presión y los datos cargados en la memoria no volátil para el ajuste de la curva característica de la combustión en la caldera.

Una consideración importante obtenida en la selección de datos de entrada fue los rebotes producidos en el teclado, considerando que los dos microcontroladores utilizan las mismas señales para la programación no debe existir ningún error en las entradas, deben capturar los datos de forma correcta para que funciones de forma paralela correctamente. Esto se logro resolver variando el tiempo de rebote en la entrada del teclado que corresponde a 80 pulsos de reloj para el controlador 1 que opera a una frecuencia de 16 MHz y de 95 pulsos de reloj para el microcontrolador 2 que tiene una frecuencia de oscilación de 9.6 MHz.

Para la programación del display se utilizan los 4 bits más significativos para la transferencia de datos con el fin de utilizar únicamente un puerto de 8 bits del microcontrolador para el manejo de las señales de habilitación, escritura y lectura del teclado. A través de esta pantalla el operador o programador puede ingresar los datos necesarios para poner en operación el sistema de control para mejorar la eficiencia de combustión.

Una vez implementado cada una de las etapas del hardware y la interconexión entre cada acople entre el controlador y las señales de entrada de los sensores y las etapas de acople para el manejo de los actuadores de combustible y de aire se obtuvieron los resultados más importantes en lo referente a el comportamiento del sistema.

Para obtener las curvas de salida del sistema se procedió a realizar tablas simuladas de los valores de entrada considerando cada una de las etapas de operación de la caldera, encendido, modulación con el control automático y control manual ubicando las variables de presión y porcentaje de oxígeno como lazo de retroalimentación para que el controlador efectúe las correcciones necesarias en los actuadores para mantener el valor estable de oxígeno producido en la combustión y el la presión de vapor en la salida de la caldera.

En la Figura 6.1.1 se observa el comportamiento de la caldera una vez que recibe la señal de alto fuego por parte del controlador Honeywell el controlador realiza la máxima apertura del actuador para permitir el máximo paso de aire para que circule a través del cañón y de los tubos por donde circula el fuego y los gases que salen por la chimenea con el fin de evitar posibles explosiones ante la presencia de la llama de encendido y la acumulación de gases que se hayan generada después de haber apagado la caldera. El tiempo que tarda en alcanzar este valor es de 25 segundos. Una vez efectuada esta operación el controlador Honeywell envía la señal de bajo fuego cerrar nuevamente el actuador de aire, el tiempo de cierre es de la misma duración que para la máxima apertura (25 segundos). Esta es la condición inicial del sistema.

Una vez recibida la señal de modulación por el controlador actual el sistema carga o ajusta los valores de combustible y aire que se encuentran gravados en la memoria EEPROM del controlador (valores de la curva característica). El tiempo de ejecución entre cada posición es de 5 segundos y alcanza un valor máximo de apertura del 80% del flujo de combustible en la entrada de la llama. Con una duración de 50 segundos y almacenando 2 variables temporales que corresponden al porcentaje de apertura actual de combustible y de aire para generar la llama, estos datos son almacenados en el paso del control manual al control automático del sistema. Es importante considerar que si el sistema de control no detecta la secuencia de encendido para la limpieza de los ductos de aire no permitirá pasar a la a etapa de

modulación y como consecuencia evitara que se genere la combustión como seguridad hasta que se produzca la secuencia de pasos correcta de operación.

El diagrama de flujo de la Figura 5.3.8 muestra la rutina programada para obtener la posición de los actuadores en el encendido, este dato es importante para poder estabilizar el valor de oxígeno de la caldera con el fin de mantener el punto óptimo de operación para el modo manual y automático.

Una vez alcanzado el tiempo de encendido, el sistema inicia como condición directa en modo automático, en este momento se realiza la conversión analógica digital del valor de oxígeno que fluye con los gases hacia el exterior atravesando la chimenea, este valor es almacenado en una variable, después de esto se multiplexa para tener acceso al canal 2 del controlador y se realiza la conversión del valor actual de presión de vapor que sale por el tubo de escape y el dato capturado correspondiente al valor el guardado para ser procesado por el control automático. Después de obtener estos valores se ingresa a la verificación de los datos de entrada y de la posición de los actuadores de aire y combustible con el objetivo de asegurar que los valores de entrada corresponden a los rangos programados o de operación, si la posición del motor modulador para cada una de las variables de salida es superior a los  $90^{\circ}$  (2.4V) o inferior a los  $0^{\circ}$  (0.6 V) debe mantenerse un valor que reestablezca la posición más cercana en la que debe permanecer, es decir si supera los  $90^{\circ}$  debe mantenerse en  $90^{\circ}$  y el valor es inferior a los  $0^{\circ}$  mantener ese mismo valor y se envía una señal de alerta por un posible error en la posición actual de los actuadores.

De igual forma se verifica que no exista un valor inferior a 3% de oxígeno en la chimenea ni superior a 5% ya que se estaría fuera de rango permitido por la ley, en este momento se envía una señal de error para verificar o detener la operación de la caldera. Para la entrada de presión la restricción es de 103 p.s.i. como valor máximo, para esta variable el valor mínimo no es importante puesto que el valor inicial de presión es inferior a 80 p.s.i. Una vez comparadas y verificadas estas condiciones

como correctas el sistema ejecuta la rutina de control donde inicialmente va a ejecutar al ser las condiciones iniciales de valor de vapor inferiores al 80 libras, el actuador de combustible y el de aire van a proceder a la apertura hasta alcanzar el valor máximo del 100%, se van a mantener en este valor hasta que se alcance la presión de vapor de agua que ha sido seleccionada como punto de operación. Una vez alcanzada la presión necesaria el sistema verifica la cantidad de aire presente en la chimenea con el fin de mantener estable el valor de oxígeno manteniendo la presión de vapor.

En la Figura 6.1.3 se tiene el comportamiento esperado del sistema de caldera, una vez alcanzada la presión requerida la caldera continuará calentándose durante unos segundos más, por lo cual al existir un exceso de presión el sistema de control procede a cerrar el actuador de combustible para disminuir la presión, en esta condición se pueden realizar 2 pasos o decrementos para el cierre o limitación del flujo de entrada del búnker, después de este tiempo de respuesta y de sobre impulso que es de  $10^0$  o 10% de cierre de la válvula mecánica del combustible el sistema detecta un faltante de presión en donde ajusta nuevamente el actuador para aumentar la presión de vapor de agua, y realiza este proceso hasta estabilizar el punto de operación de vapor en la salida de la caldera. En este momento el actuador realiza los ajustes finos para mantener el excesos de oxígeno en el valor seleccionado para la caldera.

Ante una perturbación en la presión o la cantidad de oxígeno en la salida el control automático recibirá una señal de error por parte del lazo de retroalimentación que debe ser corregido para continuar con la estabilidad del sistema.

Para el modo manual se tiene que presionar la tecla correspondiente a S/M cuando se encuentra en el modo automático, en este punto el controlador ubica la apertura al 80% de combustible sin importar el valor actual proporcionado por el control automático, en este punto el operador puede variar la cantidad de presión de vapor

en la salida. Esta operación es muy útil cuando el rango de vapor agua en la salida debe ser inferior a 80 p.s.i. De igual forma una caldera no puede ser puesta en operación en la condición de frío y pasarla inmediatamente a plena carga o máxima producción de calor, esto debido a la composición de los materiales de la caldera, que principalmente es hierro, si esto se hace de esta manera se pueden presentar choques térmicos que producen un deterioro en la paredes internas de la caldera, inclusive en el peor de los casos el rompimiento o desprendimiento producto de moviendo (contracción o expansión). Por esta razón la caldera debe recibir un precalentamiento antes de iniciar la operación continua o normal en control automático. En la Tabla 6.1.4 se muestra el comportamiento de los actuadores de salida con respecto al tiempo en el modo manual, estos valores se encuentran graficados en la Figura 6.1.4 para tener una mejor apreciación del ajuste cada vez que existe una variación efectuada por el operador.

## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

- Un aumento en la eficiencia de combustión implica una disminución de oxígeno y un aumento de dióxido de carbono.
- La máxima eficiencia que se alcanza con el prototipo implementado es de un 3% para la caldera Kewanee 1000 hp.
- Al aumentar la eficiencia de combustión la cantidad de ácido sulfúrico producido disminuye el valor actual y decrece la corrosión en la chimenea.
- El transmisor de presión tiene un comportamiento lineal (4-20mA – 0-200p.s.i).
- La resolución del transmisor de presión es de 2 (0 – 128p.s.i) y del transmisor de oxígeno de 12 (3.0 – 5.0 % O<sub>2</sub>).
- Para la programación de la pantalla se utilizan 3 bits de control y 4 bits de datos.
- El tiempo de carga de modulación es de 64 segundos para la curva característica.
- La presión de vapor de agua es variable de acuerdo a la selección del operador y puede ser ajustada o variada después de encendida la caldera si alterar la programación.
- El valor de oxígeno debe ser tal que nunca se disminuya del punto de operación (siempre debe existir un exceso de oxígeno en el peor de los casos pero nunca de combustible).
- Antes del sistema entrar a la etapa de modulación se asegura de haber limpiado los ductos internos de la caldera para evitar posibles explosiones.
- En el modo automático el sistema verifica que los valores de entrada y posición de los motores es correcta, de lo contrario inhabilita la operación y envía una señal de alarma.

## 7.2 Recomendaciones

1. Utilizar un procesador para ejecutar rutinas en paralelo con el objetivo de manejar más variables de entrada – salida al mismo tiempo, con esto se puede tener una mejor precisión para la resolución de las entradas analógicas, manejo de dispositivos periféricos (teclado, pantalla) y para el manejo de las salidas y los actuadores del aire y del combustible.
2. Con el fin de obtener un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos, específicamente en electricidad se debe utilizar un variador de frecuencia para la entrada de aire que es generado por un motor trifásico que requiere de una alimentación de 480V y genera una fuerza de 60 hp.
3. La adición de sustancias que neutralicen o modifiquen las propiedades del búnker para producir transformaciones moleculares pueden ayudar a disminuir las concentraciones de azufre y la formación de ácidos y óxidos después de efectuada la combustión.
4. La utilización de un actuador de combustible que permita una mayor cantidad de pasos para aumentar la precisión el flujo de búnker en la entrada permite alcanzar la estabilidad del sistema disminuyendo el rango de error y el tiempo de estabilización.

## CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA

Sthephen J. Chapman. Maquinas Eléctricas. Mc Graw Hill Interamericana. Bogota, Colombia. 2000.

Kewanee. Care and Operations Manual for Boiler Pressure Vessels. Boiler Manufacturing, Kewanee, U.S.A., 1986 .

Shield, Carl. Calderas: Tipos, características y sus funciones. Editorial Continental, México, 1965.

Rojas, Juan V. Calderas: Principios básicos, tratamiento de agua, ajuste de combustión y mantenimiento. Editorial Tecnológica. Cartago, 1995.

Cleaver Brooks. Manual de Calderas. Selmec. 1980.

Carnegie Mellon University. Combustión. Lycos, Inc. 2005

[http://energyconcepts.tripod.com/energyconcepts/stack\\_emmissions.htm](http://energyconcepts.tripod.com/energyconcepts/stack_emmissions.htm)

## **CAPÍTULO 9: APÉNDICES**

### **9.1 Abreviaturas**

R: resistencia.

C: capacitancia.

p.s.i: Libras por pulgada cuadrada.

Hp: Caballo de fuerza.

Ac: Corriente alterna.

BTU: British thermal unit.

### **9.2 Glosario**

*BTU:* Es la cantidad de calor necesaria para elevar un grado F la temperatura de una libra de agua. Unidad de calor en el sistema inglés.

*Vaporización:* es el cambio de un cuerpo de la fase sólida o líquida a la fase de vapor.

*Evaporación:* es la vaporización de un líquido que tiene lugar exclusivamente en la superficie libre de un líquido.

*Eficiencia de Combustión:* Es la efectividad exclusiva del quemador y esta relacionada con su habilidad para quemar totalmente el combustible. La caldera tiene poca relación sobre la eficiencia de la combustión. Con un 15% a 20% de exceso de aire, un buen quemador deberá tener una eficiencia de combustión de 94% a 97%.

*Presión:* Es la fuerza ejercida por el fluido en la unidad de superficie de la pared del recipiente que lo contiene o del seno mismo del fluido. Se mide por medio de un manómetro y se expresa en (Kg/cm<sup>2</sup>, Lbs/pulg<sup>2</sup>, bars).

*Búnker:* Combustible viscoso de color negro. Se requiere calentamiento para su manipulación y uso en calderas. Posee gran poder calórico y se usa principalmente en el sector industrial, para calentar calderas.

*Exceso de Oxígeno:* Es la cantidad de oxígeno presente después de generada la explosión al generarse la combustión entre el aire y el búnker.

## 9.3 Información sobre la empresa

### 9.3.1 Descripción de la Empresa

Es una de las empresas de más larga tradición en Costa Rica, con inversiones en industria, turismo y servicios tanto en el país como en el resto de Centroamérica. Tiene 3 subsidiarias principales: Florida Bebidas S.A., dedicada a la producción y distribución de cerveza, agua envasada y bebidas refrescantes de frutas y malta; Florida Inmobiliaria S.A., especializada en bienes raíces y turismo y Florida Capitales S.A., que administra inversiones en actividades diversas dentro y fuera del país.

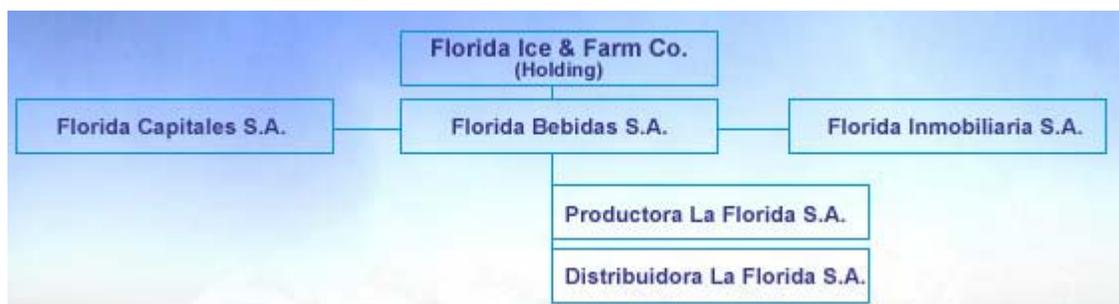


Figura 9.3.1 Organigrama de la Empresa

Florida Bebidas S.A., es una empresa netamente costarricense y con una larga tradición en el país. Su principal actividad es la producción y distribución de bebidas tales como: cerveza, bebidas refrescantes de frutas y agua embotellada.

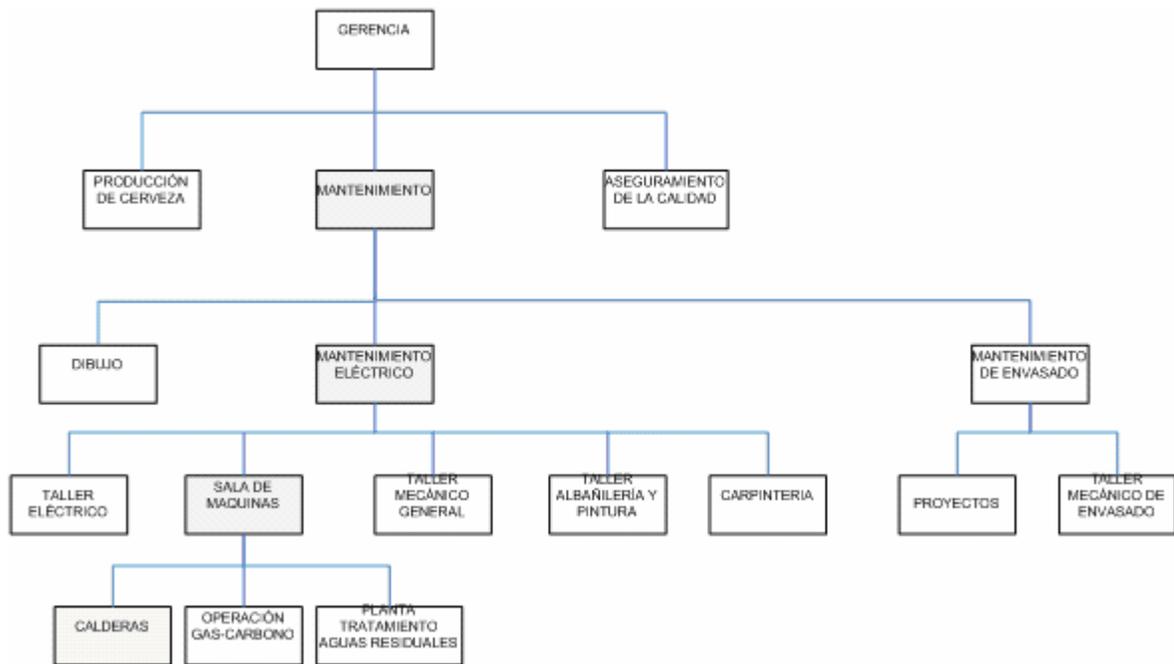
Florida Bebidas S.A. pertenece a Florida Ice and Farm Co.

El objetivo general de Florida Bebidas S.A., es crecer en forma sana y sostenible, aportando beneficios a sus accionistas, a sus empleados y a la sociedad como un todo, dentro de una perspectiva de responsabilidad cívica y social.

En octubre del 2003, Florida Bebidas S.A. se organiza en cuatro Unidades Estratégicas de Negocios Cerveza, Refrescos, Ventas y Distribución, y Finanzas y Servicios Corporativos.

El departamento en que se realizará el proyecto es el área de producción de refrescos naturales y agua, que pertenece a la división de Florida.

### 9.3.2 A.3.2 Descripción del departamento o sección en la que se realizó el proyecto



**Figura 9.3.2** Organigrama de la empresa y área de desarrollo del proyecto (calderas)

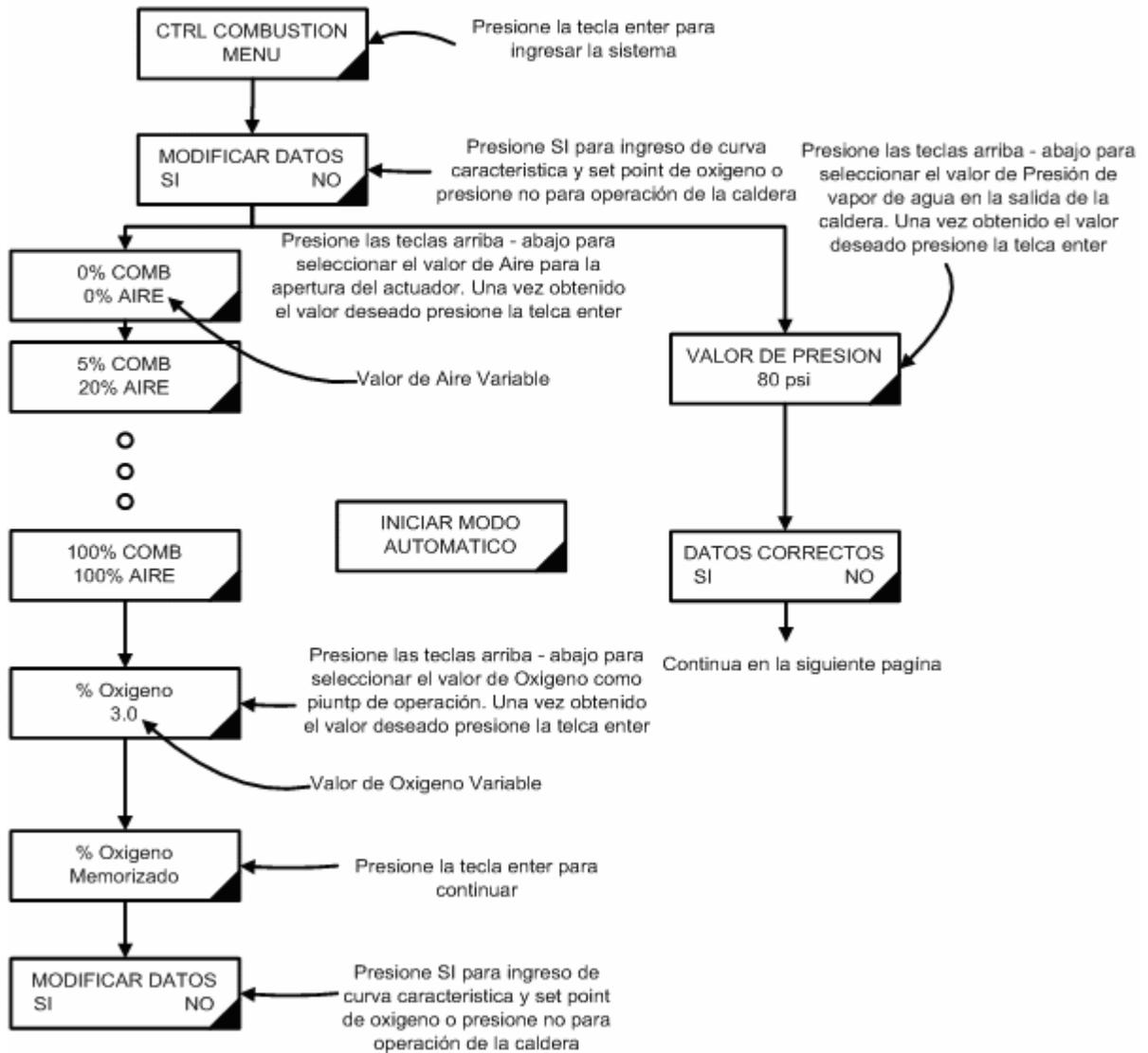
El departamento de calderas está constituido por dos técnicos operarios que se encargan de la puesta en marcha de cada una de las calderas, también monitorean cada uno de los procesos y manejan variables mecánicas y de control para generar el vapor de agua que requiere cada una de las líneas de producción.

También realizan pruebas químicas periódicamente para determinar el estado del agua que utilizan para la generación de vapor, este tipo de pruebas son de conductividad, composición química del agua, generación de sedimentos en el tanque, entre otros.

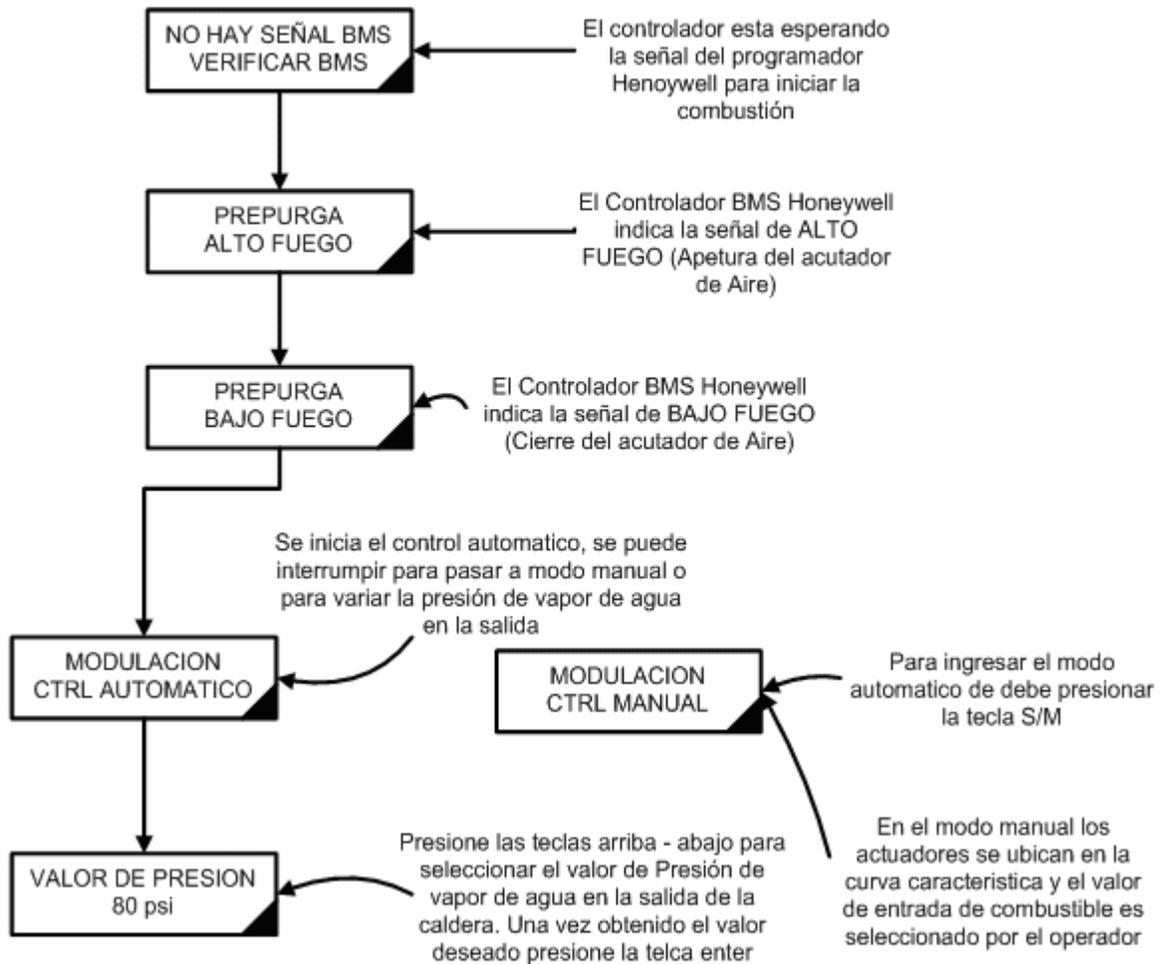
Este departamento pertenece a el área de sala de maquinas que es la encargada de la generación y administración de energía en todas sus formas para toda la planta.

## 9.4 Manual de Usuario

### PROGRAMACIÓN DE PARAMETROS Y PUESTA EN MARCHA DEL CONTROLADOR



### EL SISTEMA DE CONTROL ESPERA POR LA SEÑALES DE ACTIVACIÓN DEL CONTROLADOR HONEYWELL



## CAPÍTULO 10: ANEXOS

### 10.1 Relaciones de eficiencia de combustión para diferentes variables

Tabla 10.1.1 Resultados analíticos de la caldera Kewanee 1000 hp (06 / 12 / 2004)

	Resultado Promedio	Norma Costa Rica
Partículas SUSP. Totales (isocinético)	107 ±2 mg/Nm <sup>3</sup>	150 mg/Nm <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	1154 ±12 mg/Nm <sup>3</sup>	2500 mg/Nm <sup>3</sup>
NO <sub>X</sub>	617 ± 3 mg/Nm <sup>3</sup>	515 mg/Nm <sup>3</sup>
CO <sub>2</sub>	12 ± 0.1 %	12 - 13.5 %
O <sub>2</sub>	4.8 ±0.1 %	3 - 5 %
CO	22 ±1 mg /Nm <sup>3</sup>	
COMBUSTIBLES	0	
AIRE EXCESO	28 ±1 %	
EFICIENCIA	85.9 ±0.5 %	
O <sub>2</sub> DE REFERENCIA	5	
TEMPERATURA DE LOS GASES	191 ±1 °C	

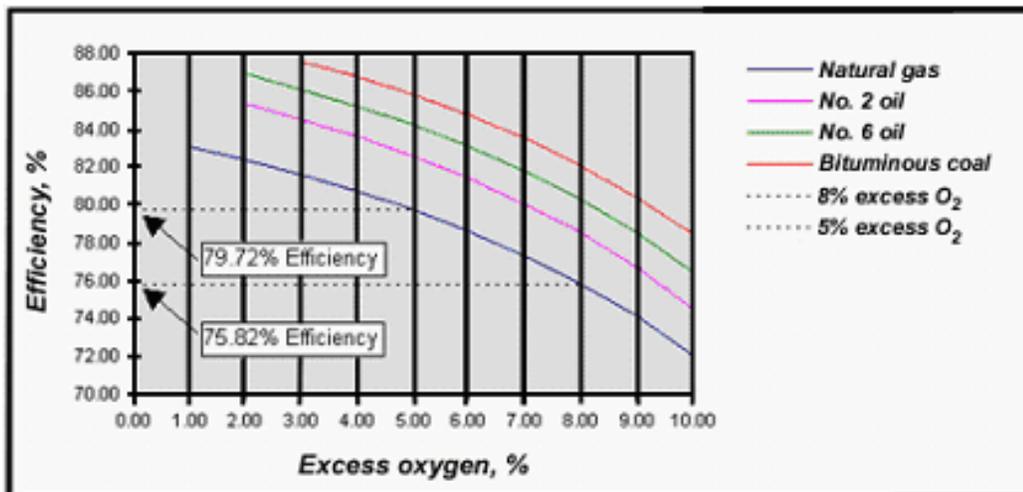
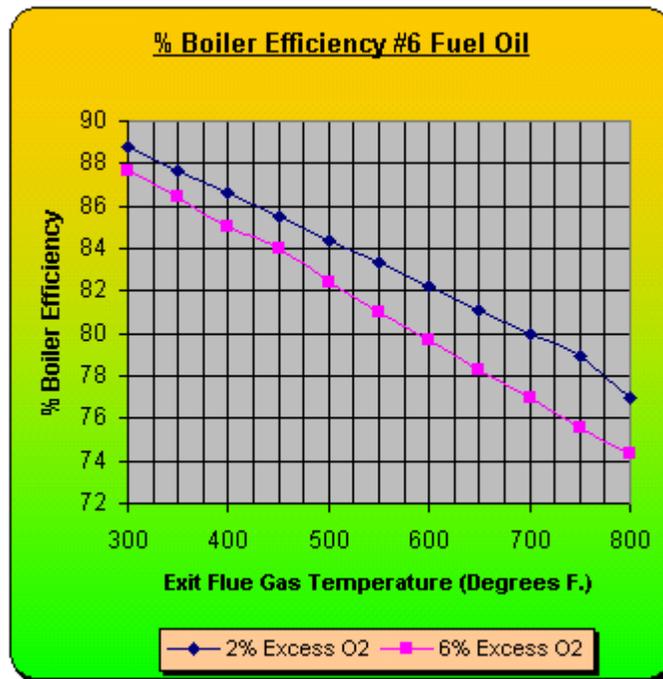


Figura 10.1.1 Eficiencia de Combustión para el exceso de oxígeno para diferentes combustibles



**Figura 10.1.2** Eficiencia de combustión para la temperatura de salida de los gases

(Carnegie Mellon University. *Combustión*. Lycos, Inc. 2005

[http://energyconcepts.tripod.com/energyconcepts/stack\\_emmissions.htm](http://energyconcepts.tripod.com/energyconcepts/stack_emmissions.htm))

## 10.2 D.2 Propiedades del Búnker y el aire considerando algunos de los efectos en la combustión.

Tabla 10.2.1 Propiedades del Búnker aceite # 6

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	VALORES <sup>(a)</sup>
Contenido de azufre total	% masa	D-129	3,0 máx.
Residuo de carbón Conradson, ó	% masa	D-189	Reportar <sup>(d)</sup>
Residuo de carbón Ramsbottom		D-524	Reportar <sup>(d)</sup>
Agua y sedimentos	% volumen	D-95 + D-473	2,0 <sup>(b)</sup> máx.
Punto de inflamación (Flash Point)	°C	D-93	60 mín.
Gravedad API a 15,56 °C (60 °F) o Densidad	°API kg/m <sup>3</sup>	D-287 D-1298	Reportar
Viscosidad Cinemática a 50 °C	mm <sup>2</sup> /s <sup>(c)</sup>	D-445	Reportar <sup>(d)</sup>
Punto de Escurrimiento	°C	D-97	24 máx.
Contenido total de cenizas	% masa	D-482	0,1 máx.
Asfaltenos	% masa	D-3279	Reportar <sup>(d)</sup>
Valor térmico o Poder calorífico inferior	MJ/kg	D-240	40 mín
<u>Metales contaminantes:</u>			
Vanadio (V)	mg/kg	D-5863	Reportar. <sup>(d)</sup>
Niquel (Ni)			
BTX (Benceno, Tolueno y Xileno)	mg/kg	D-5580	Reportar. <sup>(d)</sup>

<sup>(a)</sup> Aceites combustibles para usos industriales con valores diferentes a los especificados, excepto el contenido de azufre, podrán ser objeto de negociación / contratación entre las partes interesadas, previa autorización del Ente Nacional Competente del país donde se usará el producto.

<sup>(b)</sup> La cantidad de sedimento por extracción no debe exceder 0,50 % masa, y se debe hacer una deducción en la cantidad para toda agua y sedimento en exceso de 1,0 % masa

<sup>(c)</sup> 1 mm<sup>2</sup>/s = 1 cSt

<sup>(d)</sup> Reportar indicando el resultado obtenido de acuerdo al método, por un período de un año y evaluar en los siguientes tres meses, con el propósito de definir si se mantiene reportar o se define un valor numérico.

**Tabla 10.2.2** Composición del Aire

Componente		Concentración aproximada
1. Nitrógeno	(N)	78.03% en volumen
2. Oxígeno	(O)	20.99% en volumen
3. Dióxido de Carbono	(CO <sub>2</sub> )	0.03% en volumen
4. Argón	(Ar)	0.94% en volumen
5. Neón	(Ne)	0.00123% en volumen
6. Helio	(He)	0.0004% en volumen
7. Criptón	(Kr)	0.00005% en volumen
8. Xenón	(Xe)	0.000006% en volumen
9. Hidrógeno	(H)	0.01% en volumen
10. Metano	(CH <sub>4</sub> )	0.0002% en volumen
11. Óxido nitroso	(N <sub>2</sub> O)	0.00005% en volumen
12. Vapor de Agua	(H <sub>2</sub> O)	Variable
13. Ozono	(O <sub>3</sub> )	Variable
14. Partículas		Variable

### **10.3 Efectos del Azufre en la salud humana, producto de la combustión de búnker**

- Efectos neurológicos y cambios comportamentales.
- Alteración de la circulación sanguínea.
- Daños cardiacos.
- Efectos en los ojos y en la vista.
- Fallos reproductores.
- Daños al sistema inmunitario.
- Desórdenes estomacales y gastrointestinales.
- Daños en las funciones del hígado y los riñones.
- Defectos en la audición.
- Alteraciones del metabolismo hormonal.
- Efectos dermatológicos.
- Asfixia y embolia pulmonar.

(Lenntech. *Agua residual & purificación del aire*. Holding B.V., Rotterdamseweg 402 M 2629 HH Delft, Holanda. 2005. <http://www.lenntech.com>)

## 10.4 Descripción del controlador Honeywell Series 7800.

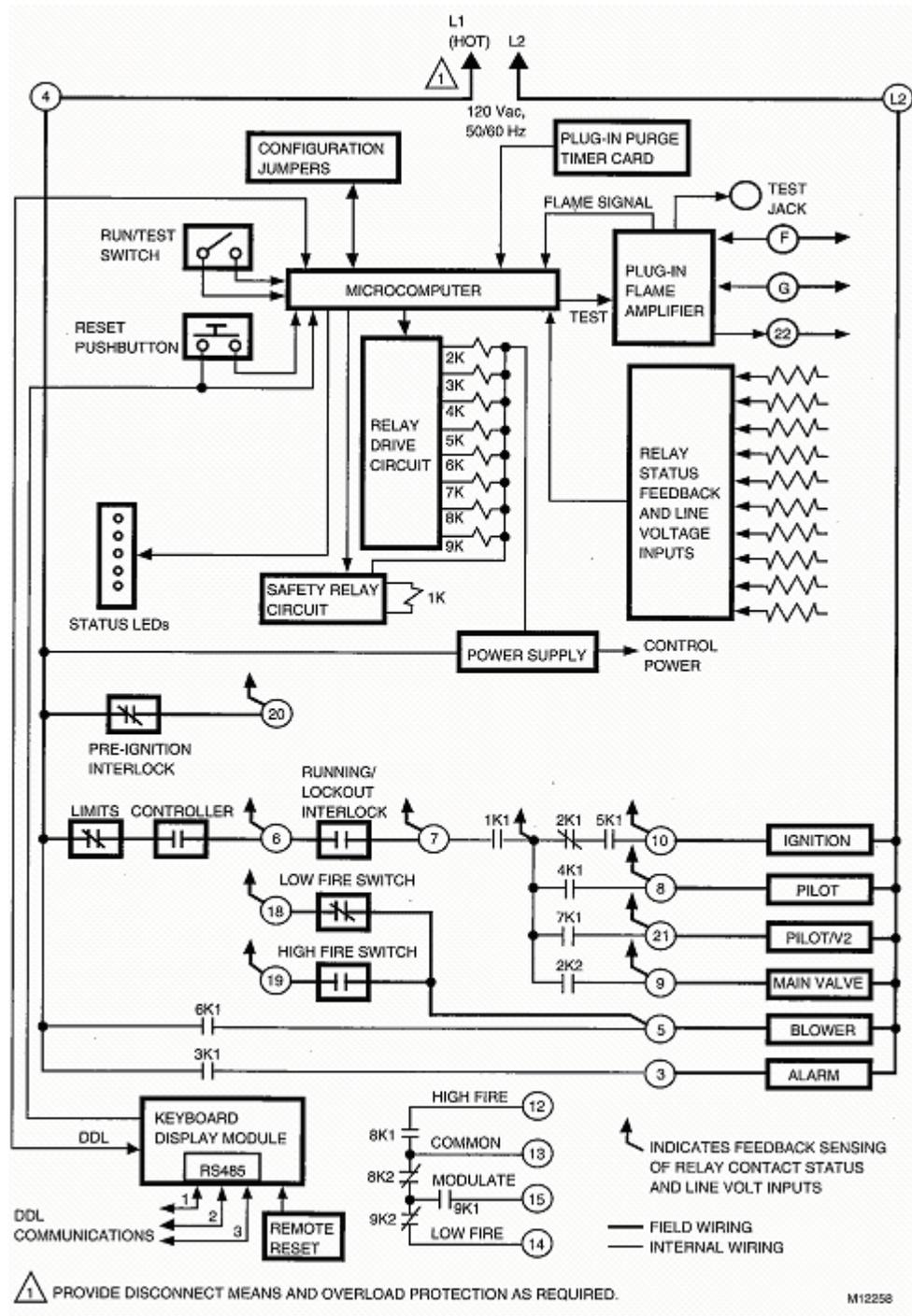


Figura 10.4.1 Estructura interna del controlador Honeywell

## 10.5 Operación del actuador Honeywell

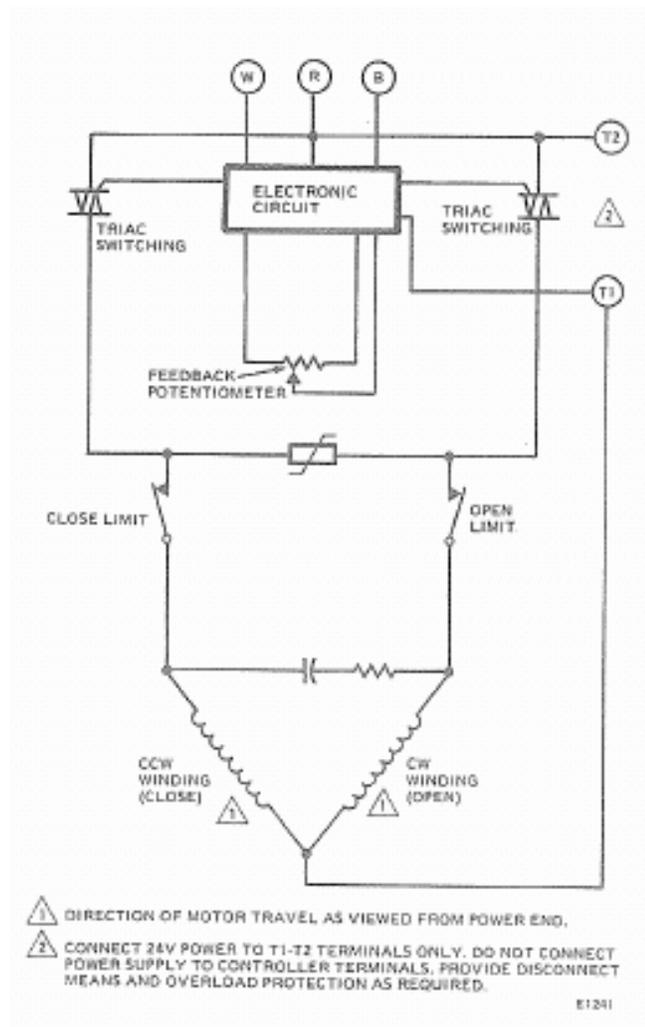
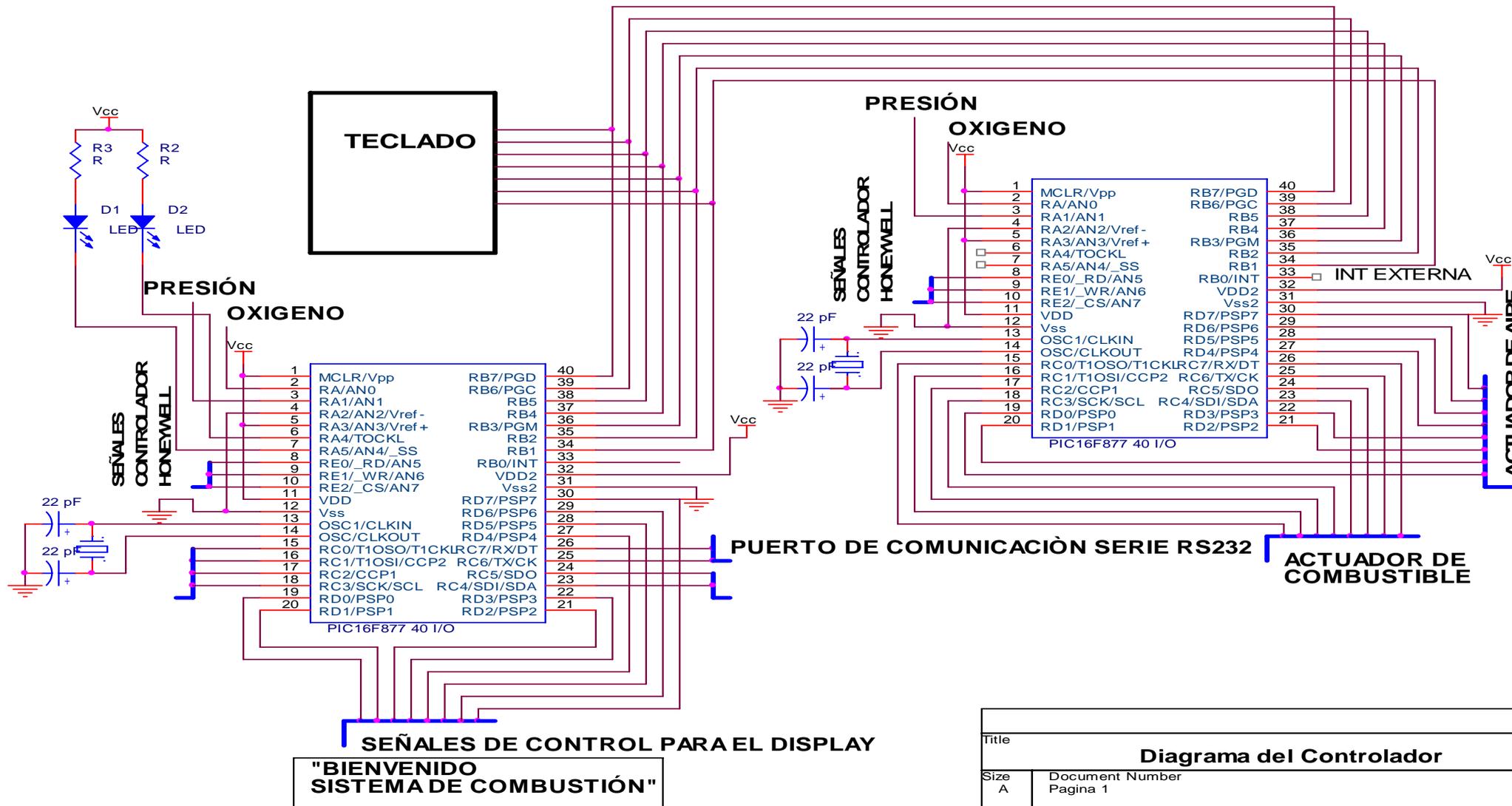
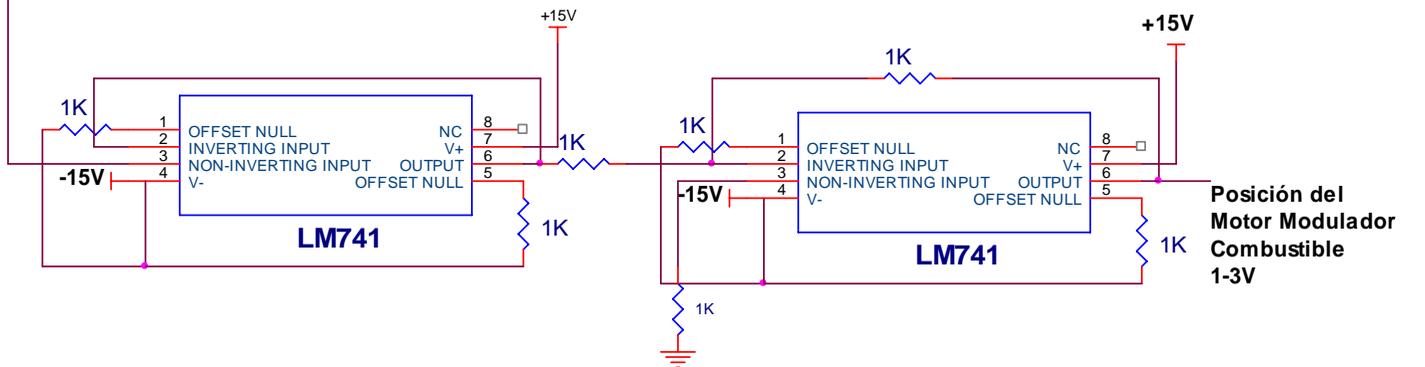
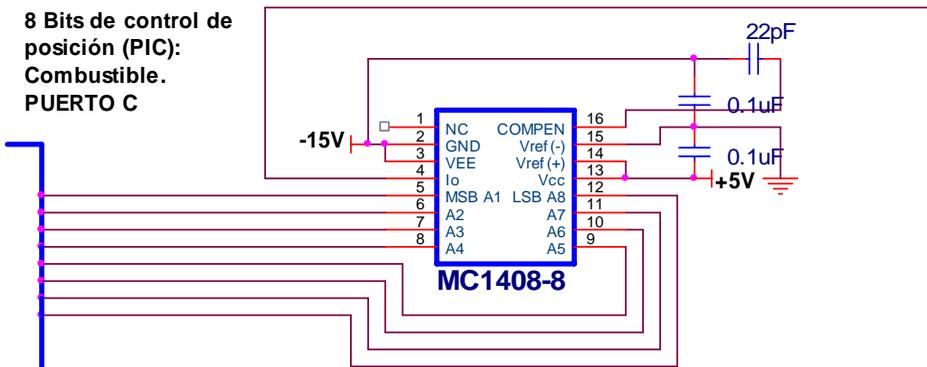
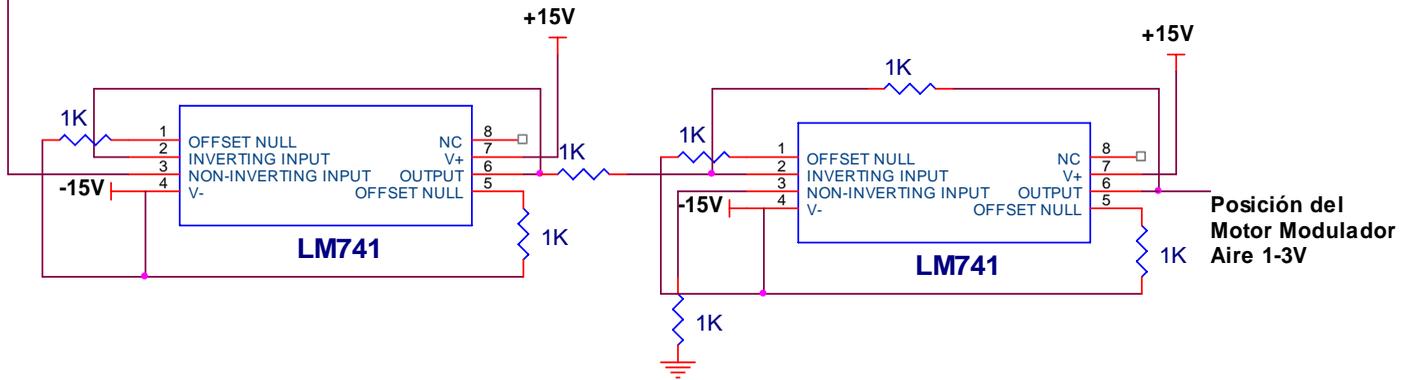
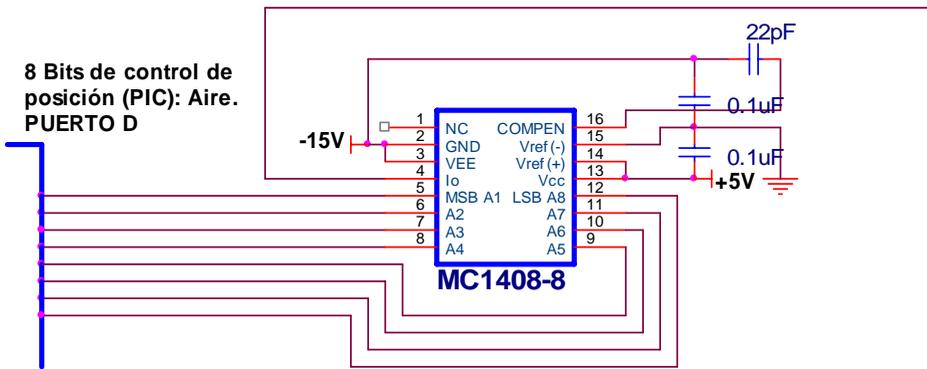


Figura 10.5.1 Circuito de control para el motor modulador M9484E

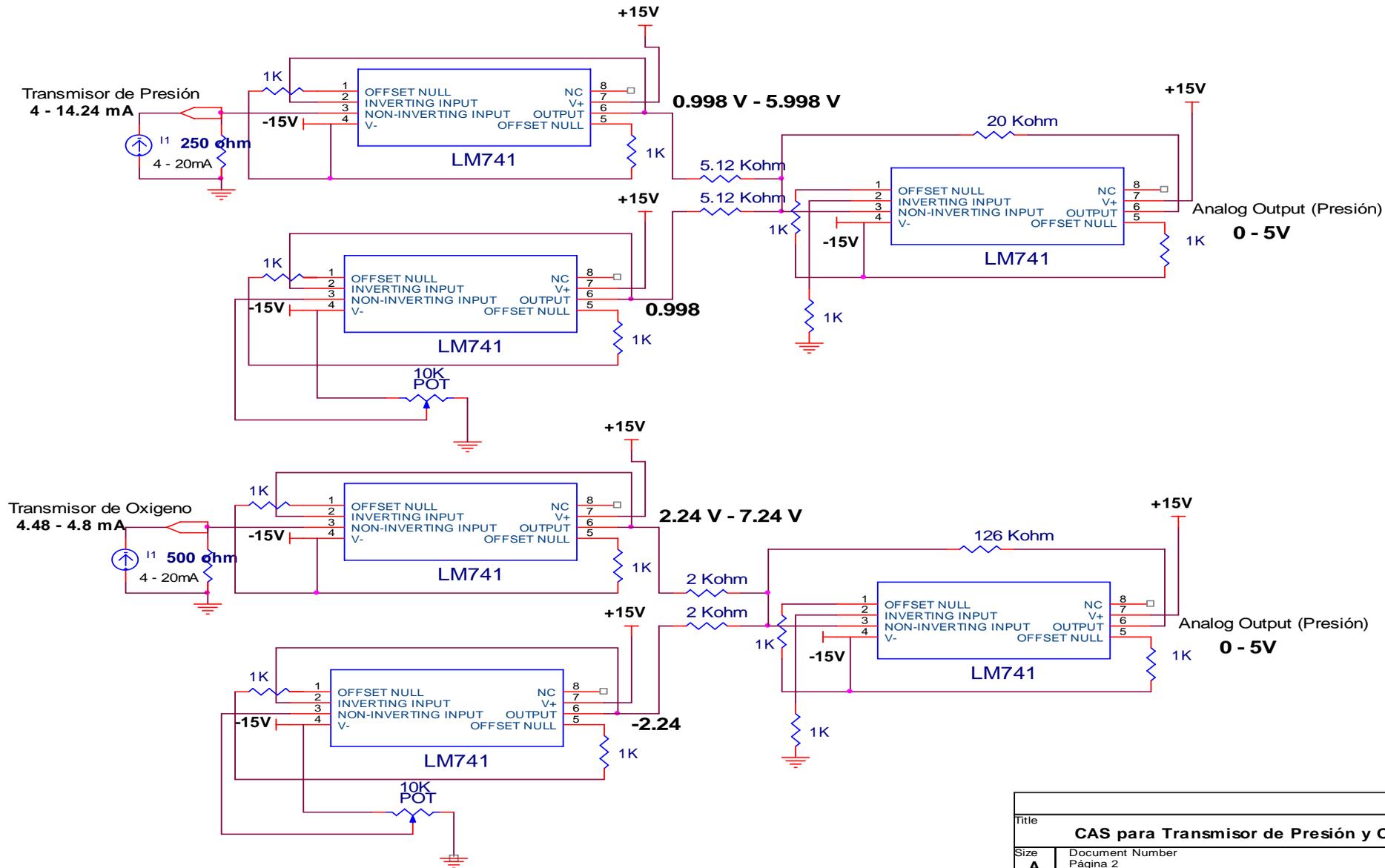
### 10.6 D.6 Planos eléctricos del diseño de hardware



Title		
<b>Diagrama del Controlador</b>		
Size	Document Number	Rev
A	Página 1	
Date:	Tuesday, July 12, 2005	Sheet 1 of 1



Title		
Salidas de control para actuadores de aire y combustible		
Size	Document Number	Rev
A	Página 3	C001
Date:	Wednesday, July 27, 2005	Sheet 3 of 1



Title		
<b>CAS para Transmisor de Presión y Oxígeno</b>		
Size	Document Number	Rev
<b>A</b>	Página 2	
Date:	Monday, August 08, 2005	Sheet 1 of 1