



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Eléctrica

**CONTROL ELECTRONICO DE HORNOS ROTATIVOS
DE ALIMENTACION CONTINUA**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACION: ELECTRONICA

Presentada por:

Jenny Cecilia Berrezueta Astudillo

Guayaquil - Ecuador

1993

Agradesco a mi padre,
Ing. Rodrigo Berrezueta P.
por su valiosa ayuda y
apoyo en la realización de
la presente Tesis.

DEDICATORIA

A MI MADRE,

A MI PADRE,

A MIS HERMANOS.



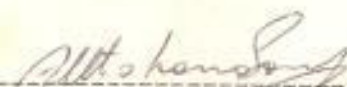
ING. RODRIGO BERREZUETA
Director de Tesis



ING. CARLOS VILLAFUERTE
Decano de la Facultad de
Ingeniería en Electricidad



ING. NORMAN CHOOTONG
Miembro del Tribunal

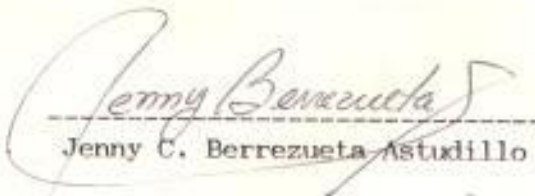


ING. ALBERTO LARCO G.
Miembro del Tribunal

DECLARACION EXPRESA

" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



Jenny C. Berrezueta Astudillo

RESUMEN

Se encontró un método eficaz, para obtener circuitos esquemáticos, desde tarjetas electrónicas complejas y de doble lado, mediante, el procedimiento de fotocopiado e inversión de imagen, utilizando marcadores permanentes.

Un estudio de errores, por carga en el cursor de los potenciómetros de precisión, fue realizado, habiéndose obtenido un gráfico de la variación del mismo en función del ángulo rotacional.

El análisis de la compensación de junta fría, se lo realizó, incluyendo los programas de computación, y los resultados teóricos, los mismos que fueron validados por las pruebas experimentales.

Un análisis, de la capacidad de los calderos rotativos de alimentación continua, en función de la humedad, se realizó en forma exhaustiva. Igualmente, se analizó la capacidad calórica requerida.

Se verificó analítica, y experimentalmente el funcionamiento completo del caldero.

INDICE GENERAL

	Página
RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL.....	VII
INTRODUCCION.....	XI
I. DESCRIPCION GENERAL.....	12
1.1. Propósito y objetivos.....	12
1.2. Operación de controles e indicadores.....	14
1.3. Energía calórica requerida por los materiales secos.....	22
1.4. Calor requerido por el agua (Humedad).....	26
1.5. Calor generado por los combustibles.....	28
1.6. Calor total requerido por materiales y humedad.	29
1.7. Calor total requerido.....	32
1.8. Volumen de combustible a utilizarse.....	32
1.9. Límites permisibles de temperatura.....	35
1.10. Rangos de seguridad.....	36
II. FUNCIONAMIENTO DEL CALDERO.....	37
2.1. Purga.....	37

2.2.	Pre_encendido de gas inflamable.....	38
2.3.	Circuito de detección ultravioleta de la llama.	38
2.4.	Tiempo de estabilización de la llama.....	41
2.5.	Control de posición de reguladores de aire y combustible pre_encendido.....	41
2.6.	Ignición de llama baja.....	42
2.7.	Modulación de llama principal.....	42
	2.7.1. Modo Manual.....	43
	2.7.2. Control automático de modulación.....	44
III.	CIRCUITO AMPLIFICADOR DE VOLTAJE DE TERMOCUPLAS.....	46
3.1.	Condiciones de diseño.....	46
3.2.	Características de dos amplificadores.....	47
3.3.	Selección de los amplificadores operacionales para termocuplas.....	49
3.4.	Parámetros del diseño de los amplificadores....	51
3.5.	Compensación de junta fría	52
3.6.	Circuito equivalente para análisis de compensación.....	55
3.7.	Diseño del circuito electrónico amplificador TC	63
IV.	ANALISIS DE LOS CIRCUITOS DE RETARDO DE TIEMPO.....	66
4.1.	Principio de funcionamiento.....	66
4.2.	Temporizador de purga.....	67
4.3.	Temporizador de 15 segundos.....	67

V.	REGISTRO CONTINUO DE TEMPERATURA DEL MATERIAL Y LIMITES DE SEGURIDAD.....	71
5.1.	Registro continuo de temperatura de los materiales.....	71
5.2.	Límites.....	74
5.2.1.	Temperatura máxima del agregado.....	74
5.2.2.	Temperatura de cambio a automático.....	74
5.2.3.	Límite de temperatura de los gases.....	75
5.2.4.	Indicador de gases.....	76
5.2.5.	Análisis de funcionamiento.....	76
5.3.	Circuito de límites y grabación de temperatura.	79
5.3.1.	Análisis del circuito de control del grabador.....	79
5.3.2.	Análisis del circuito de limite máximo..	80
5.3.3.	Temperatura de cambio a automático.....	80
VI.	DETECCION AVANZADA DE TEMPERATURA Y MATERIALES.....	83
6.1.	Detección avanzada de temperatura.....	83
6.2.	Detección de cambios bruscos de temperatura....	84
6.3.	Detección avanzada de los materiales.....	87
6.4.	Análisis del circuito de detección avanzada....	88
VII.	CIRCUITO DE AUTOCONTROL.....	91
7.1.	Principales parámetros referenciales.....	91
7.2.	Descripción del sistema mecánico de control....	92
7.3.	Interfase del control electrónico al motor.....	95

7.4.	Descripción del sistema electrónico de control..	97
7.4.1.	Control Proporcional.....	100
7.4.2.	Control Integral.....	102
7.4.3.	Control Diferencial.....	105
7.4.4.	Control adelantado de temperatura y materiales.....	107
7.5.	Análisis del circuito de auto control.....	107
VIII.	MONITORES DE PRESION, VACIO, LLAMA, LUBRICACION.....	112
8.1.	Monitor de llama.....	112
8.2.	Monitor de presión y vacío.....	113
8.3.	Monitor de lubricación.....	114
8.4.	Funcionamiento del circuito eléctrico.....	114
IX.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	119
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	127
	APENDICES.....	129
	BIBLIOGRAFIA.....	139

INTRODUCCION

Se estudia el comportamiento, los sistemas de seguridad, y la circuitería electrónica, utilizada en Calderos Rotativos de Alimentación Continua. Se determinan condiciones reales de trabajo, y se describe su diseño, ajuste, funcionamiento y calibración.

Este proyecto tiene como objetivo, lograr un correcto entendimiento, y capacitación sobre calderos industriales, los cuales, usualmente tienen muy poca información técnica en nuestro medio.

Se partió de la hipótesis lógica, de que se encontrarían ideas muy desarrolladas, por la experiencia existente en el exterior, las mismas que fueron asimiladas, y en ciertos casos modificadas exitosamente en el desarrollo del trabajo.

La metodología empleada fue experimental, sin embargo para complementarla, o a veces sustituirla, se empleó análisis computacional. Se simularon las variables de entrada, verificando la función de transferencia.

CAPITULO I

DESCRIPCION GENERAL

1.1 PROPOSITO Y OBJETIVOS

El propósito del control electrónico objeto de este estudio, es controlar la temperatura de un caldero de alimentación continua, proveyendo límites, rangos, y valores de seguridad. Es un control para mantener la temperatura dentro de límites muy estrechos, con ajuste automático en función de la alimentación del material, controlando la relación aire combustible para obtener máxima eficiencia.

Los controles estan provistos para iniciar posicionamientos y condiciones de seguridad previo al arranque, realizar el encendido bajo condiciones controladas, obtener control continuo de aire y de combustible durante el trabajo, y detener el caldero si las especificaciones no se cumplen, además de regular la intensidad del calor tanto en modo manual como en modo automático.

Se monitorea la temperatura de los gases de la combustión, del material "agregado" a ser calentado, y del punto de funcionamiento del caldero.

Existe una grabadora circular ubicada en el panel de control en el cual se graba información continua (24 horas) proveniente de la temperatura del material tratado.

En la tarjeta de control de límites, se fija la temperatura máxima para el agregado para los gases de la combustión y la temperatura a la cual el control cambia de la posición de arranque a la de automático. El punto deseado de temperatura del agregado es colocado manualmente por un control digital dicha temperatura deberá mantenerse dentro de 1% de este valor para cualquier cantidad de material a ser alimentado, y cualquiera que sea el poder calórico de los combustibles utilizados. El control automático usa este valor de ajuste como entrada en conjunto con otras entradas provenientes de sensores localizados en la chimenea de descarga del secador, y de los alimentadores del material para controlar el punto de operación del caldero y la temperatura del agregado.

1.2 OPERACION DE CONTROLES E INDICADORES

1. ENCENDIDO/APAGADO:

Interruptor que aplica energía al sistema en la posición ENCENDIDO, la lámpara de POTENCIA se ilumina.

2. TEMPERATURA DE CHIMENEA

Medidor que indica la temperatura de los gases del ducto de salida del secador. Una termocupla en el ducto de la chimenea sensa la temperatura, esta se procesa y transmite esta información a la unidad de control.

3. POSICION DEL QUEMADOR

Medidor del porcentaje de apertura del quemador. La posición inicial del quemador está fijada por el control "POSICION DE ARRANQUE". Cuando la temperatura del agregado alcanza un porcentaje programado por el usuario, el sistema entra en automático. Todas estas variaciones se presentan en este indicador que tiene una escala porcentual de 0% a 100% .

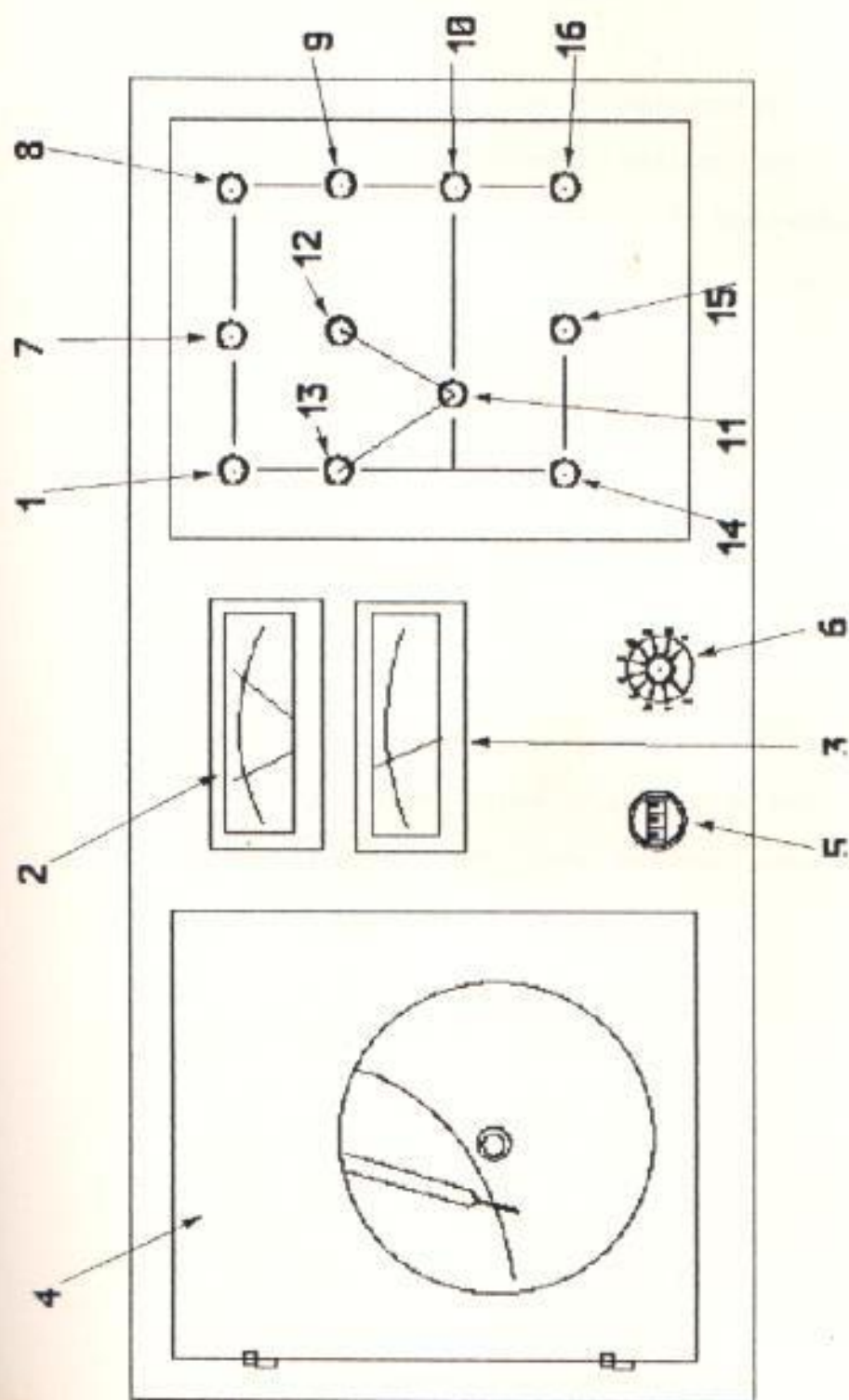


Figura # 1.2 PANEL DE CONTROLES E INDICADORES DEL CALDERO

4. REGISTRO GRAFICO DE TEMPERATURA

Registra la temperatura del agregado para un periodo de 24 horas. Este instrumento utiliza una carta circular de papel impreso con indicación de temperatura cada 10 grados Fahrenheit, y de tiempo cada hora con un tiempo de grabación total de 24 horas. Al realizar el cambio de hoja circular debe rotársela hasta igualar la hora real con la indicada en el registro.

5. VALOR DE TEMPERATURA

Es un control digital de tres cifras, en el cual el operador fija la temperatura deseada del material. El sistema automático usa este valor de referencia como el principal parámetro para mantener una temperatura constante del material.

6. POSICION DE ARRANQUE

Control manual fijado por el operador del sistema a la posición óptima de encendido del caldero para evitar que se produzca sobre temperatura transiente en el sistema, o un tiempo muy largo de asentamiento (setling), ya que

se obtendría en este caso material a temperatura inferior a la adecuada.

La posición es fijada correctamente cuando la temperatura de agregado llega a la temperatura y niveles adecuados con un mínimo de sobre reacción (para mínimo tiempo de reacción dentro de la banda de control).

7. LUZ INDICADORA DE EXTRACTOR

Se prende cuando el "micro_interruptor", accionado por el difragma del sensor de vacío, producido por el extractor de aire y gases, indica una presión barométrica menor a 560 milímetros de mercurio.

Está ubicado en el ducto de escape de gases del secador indicando que el motor y el sistema de extracción están *funcionando correctamente.*

8. LUZ INDICADORA DE SOPLADOR

Se enciende cuando el micro-interruptor se acciona por medio del sensor de presión, si se produce un incremento de presión barométrica de 50 mm de mercurio. Si el motor de inyección de aire al quemador con su sistema de aspas esta trabajando correctamente.

9. LUZ LISTO

Se enciende después de treinta segundos, de que están en funcionamiento el extractor y el ventilador, a fin de garantizar un tiempo suficiente de purga de los gases combustibles, que podrían estar en el tambor secador. Sólo funciona si el detector de llama no envía señal, y si el interruptor de (llama baja)/(llama principal) está en baja.

10. BOTON DE ARRANQUE

Al presionar el botón (después que la luz de LISTO se enciende), el operador energiza el sistema, abriéndose la válvula de entrada de gas combustible (metano o gas cocina), y energizándose simultáneamente el transformador de ignición, el mismo que produce 10.000 voltios para que salte chispa en los electrodos de encendido. Al encenderse los gases, un detector ultravioleta de llama apaga la luz de LISTO y enciende la de llama baja, abriendo la válvula de entrada de diesel o "residuo". Si persiste la detección de la llama (ahora del diesel combustionado) por mas de tres (3) segundos se cierra la válvula del gas, y el sistema esta listo para pasar a llama principal.

Si no se detecta llama, y se mantiene presionado el botón de arranque, el sistema tiene hasta 15 segundos para detectarla, si falla se reinicia el ciclo de purga tan pronto como se suelta el botón, a fin de evacuar los gases combustibles que continuaron saliendo, al igual que la chispa en los electrodos.

La causa de esta falla en el arranque debe ser determinada previo a hacer otro intento de inicio arranque.

11. BOTONERA DE FUEGO BAJO Y PRINCIPAL

Esta posición de fuego bajo, sirve para indicar que el quemador ha iniciado su operación, con el menor fuego posible, y el calor generado es suficientemente pequeño como para que no se recaliente la cámara de combustión aún sin material a ser procesado. Al dar inicio a la alimentación de material, simultáneamente debe pasarse el interruptor a la posición de fuego alto, donde puede realizarse un control manual o automático (modulado) de la temperatura. Después que el caldero funcione automáticamente, si los límites permisibles han sido sobrepasados, entonces y solo entonces la posición de fuego bajo retorna automáticamente.

12. LAMPARA DE FUEGO BAJO

Se enciende cuando el detector de llama se energiza. Indicando que el caldero esta funcionando en el modo de fuego bajo y permanece pendiente hasta que la llama del caldero se extinga. En este sistema no existe el modo automático.

13. LAMPARA DE FUEGO PRINCIPAL

Se enciende indicando el modo de operación donde la válvula del caldero puede ser modulada.

14. AUTOMATICO-MANUAL

Interruptor de dos posiciones (giratorio) el cual es fijado por el operador del sistema para dictar funcionamiento automático o manual de la unidad de control.

En la posición manual el quemador es abierto o cerrado manualmente usando el interruptor de palanca "Cierra o Abre". En la posición AUTO el quemador es automáticamente abierto o cerrado para mantener la temperatura prefijada del material.

15. INTERRUPTOR CIERRA ABRE

Este es un interruptor de tres posiciones (giratorio) el cual esta cargado en la posición de OFF es decir regresa a la posición central cuando se lo suelta.

Este interruptor funciona únicamente en manual y es usado por el operador para abrir o cerrar el quemador.

16. PARADA

Interruptor que al ser presionado apaga el quemador, el control del quemador automáticamente cierra la válvula del combustible, causando que las lámparas de FUEGO BAJO Y PRINCIPAL se apaguen lo cual reinicializa el ciclo de purga de 30 segundos.

El quemador no puede ser prendido hasta que la lámpara de LISTO se encienda una vez que se haya completado el ciclo de purga y que el circuito de "GUARDA" (homing) cierre la válvula moduladora del quemador.

Esta válvula (moduladora del quemador) es automáticamente cerrada en cualquier momento en que el

fuego se apague mientras exista energía en el sistema.

PRECAUCION :Existe energía de 120 V en la circuitería electrónica de control a pesar de que el interruptor PRINCIPAL este apagado, pues el circuito de "guarda" permite su energización para estar seguro de partir el quemador de la posición totalmente cerrada.

Volúmenes de combustible de aire, material, rango de temperaturas, cantidad de calor, tipos de toberas, límites permisibles o rangos de seguridad.

Características del horno, secuencia teórica ideal de un caldero correcto.

1.3 ENERGIA CALORICA REQUERIDA POR LOS MATERIALES SECOS

El cambio interno de energía de un sólido, debido a la temperatura, es el resultado de calor agregado al mismo. Si el volumen se mantiene constante (el caso usual al tratarse de sólidos no combustionables), tal el caso de arena, piedras, hierro, etc... Es útil el definir C_v , porque este valor se mantiene aproximadamente constante, en un amplio rango de temperaturas. Por tanto podemos escribir

$$U = C_v (T_2 - T_1) \quad 1.3.1$$

Ok. run

TABLA # 1.3

ENERGIA CALORICA REQUERIDA EN FUNCION DE LA HUMEDAD
 PARA EL SECADO DE 100 TONELADAS POR HORA DE MATERIAL
 Q EN MILLONES DE KCALORIAS

HUMEDAD %	MATERIALES	AGUA
0 %	3.015	0
1 %	2.98485	.097049
2 %	2.9547	.194098
3 %	2.92455	.291147
4 %	2.8944	.388196
5 %	2.86425	.485245
6 %	2.8341	.582294
7 %	2.80395	.679343
8 %	2.7738	.776392
9 %	2.74365	.873441
10 %	2.7135	.97049
11 %	2.68335	1.06754
12 %	2.6532	1.16459
13 %	2.62305	1.26164
14 %	2.5929	1.35869
15 %	2.56275	1.45574
16 %	2.5326	1.55278
17 %	2.50245	1.64983
18 %	2.4723	1.74688

Luego, la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de un sólido es:

$$Q = m C_v (T_2 - T_1) \quad 1.3.2$$

Donde: U = Incremento de la energía interna del sólido

C_v = Coeficiente calórico del material a vol. cte.

T_2 = Temperatura final

T_1 = Temperatura inicial

m = Masa del material.

TABLA # 1.3.1 VALORES DE CALOR ESPECIFICO DE
VARIOS MATERIALES.

Material	Cv (Kcal/Kg°C)
Aluminio	0.214
Plomo	0.031
Hierro	0.108
Cobre	0.0915
Plata	0.0559
Ladrillos	0.2
Cemento	0.21
Granito	0.195
Arena	0.17
Roca-dura	0.217
Agua	1.000

Referencia: Heath Transfer by Chapman Alan J.
Macmillan Co.

Si el caudal de los materiales através del caldero, fuera de 1 tonelada por hora, los mismos que se desea elevar la temperatura desde 27°C hasta 177°C, mezclados en la siguiente proporción:

- a.- Roca dura 50%
- b.- Granito 30%
- c.- Arena 20%

Entonces el valor promedial de

$$C_v = 0.5(0.217) + 0.3(0.195) + 0.2(0.17)$$

$$C_v = 0.201 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

y la cantidad de calor requerido será:

$$Q = 1(1000)\text{Kg} \times 0.201\text{Kcal}/(\text{Kg}^\circ\text{C}) \times (177-27)^\circ\text{C}$$

$$Q = 30,150 \text{ Kcal/Ton.}$$

1.4 CALOR REQUERIDO POR EL AGUA (HUMEDAD)

Si bajo las mismas condiciones (es decir de 27°C hasta 177°C) deseamos elevar la temperatura de una tonelada de agua, debemos considerar, que el agua líquida se calentará sólo hasta 100 °C, luego se vaporizará para lo cual se requiere el coeficiente de calor latente del agua $C_{cl} = 540.4 \text{ Kcal/Kg}$, y luego el calor requerido para elevar el vapor desde 100°C hasta los 177 °C finales.

Tenemos:

$$Q_1 = 1(1000)\text{Kg} \times 1\text{Kcal}/\text{Kg}^\circ\text{C} \times (100-27)^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = 73.000 \text{ kilocalorias/Ton}$$

$$Q2 = 1(1000)\text{Kg} \times 540.4 \text{ Kcal/Kg}$$

$$Q2 = 540,400 \text{ kilocalorias/Ton}$$

$$Q3 = 1(1000)\text{Kg} \times 0.496\text{Kcal/Kg}^\circ\text{C} \times (177-100)^\circ\text{C} (*)$$

$$Q3 = 38.192 \text{ Kilocalorias/Ton}$$

El calor total requerido $Q1 + Q2 + Q3$ para calentar es:

$$Q_{\text{agua}} = 651.592 \text{ Kcal/Ton}$$

Observamos que el calor requerido por el agua es mucho mayor que por el agregado.

(*) El calor latente del agua (540.4), y el calor específico del vapor de agua a una atmósfera de presión es igual a 0.496Kcal/Kg°C.

[Properties of Steam, Heat Transfer Alan J Chapman]

1.5- CALOR GENERADO POR LOS COMBUSTIBLES

La mayoría de combustibles utilizados en nuestro medio a nivel industrial son líquidos o gaseosos, entre los primeros se utilizan muy frecuentemente DIESEL, y RESIDUO . El diesel es líquido relativamente puro con pequeña viscosidad, siendo por tanto el de mas fácil utilización y realmente es el de mayor consumo industrial. El segundo, o sea el Residuo se produce como el remanente de un proceso intermedio de destilación, tiene un muy buen nivel calórico, mas por su alta viscosidad, requiere de precalentamiento para que pueda fluir, o ser bombeado en tuberías y toberas de combustión.

TABLA 1.5.1 CALOR GENERADO POR COMBUSTIBLES

COMBUSTIBLE	Kcal/Kg
Gas Natural	11.185
Gasolina	10.837
Diesel	10.250
Residuo	10.615

Referencia: Thermodynamics of Heat Power
Fairies Macmillan Co.

Como la densidad de los combustibles es aproximadamente de 0.92, y dado que un galón americano tiene 3.74 litros,

entonces el calor generado por galón es 3.44 veces mas que por kilogramo.

1.6 CALOR TOTAL REQUERIDO POR MATERIALES Y HUMEDAD

Los materiales requieren cierta cantidad de calor para incrementar su temperatura, de acuerdo al acápite 1.3; el agua también requiere de calor, en especial cuando hay cambio de fase, es decir, de líquido a vapor, como se especifica en 1.4 . El aire de combustión aún en condiciones óptimas, esto es, ni exceso de aire, ni defecto que produce combustión imperfecta, también requiere de calor para elevar su temperatura, el total de calor debe ser suministrado por el combustible al quemarse en el aire.

La relación de aire a combustible teórica es de 15/1(*) en la práctica se emplea entre un 15 a 20 % de exceso de aire para garantizar la combustión total.

El valor de C_p del aire a 130°C es de 0.2424, y el del combustible ~ 0.3 (*). Con estos valores se obtiene un consumo energético al elevar la temperatura del combustible y el aire de combustión de 6 a 7 % del calor total generado.

* Manual Hutte.

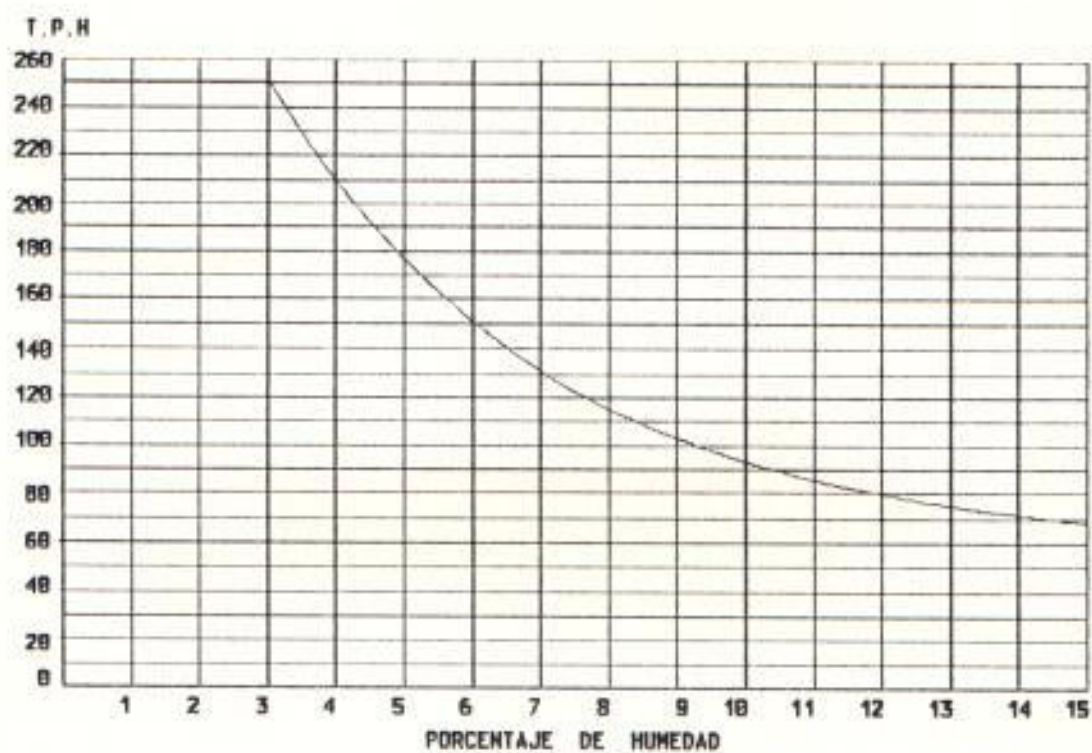


Figura # 1.6 Capacidad del Caldero

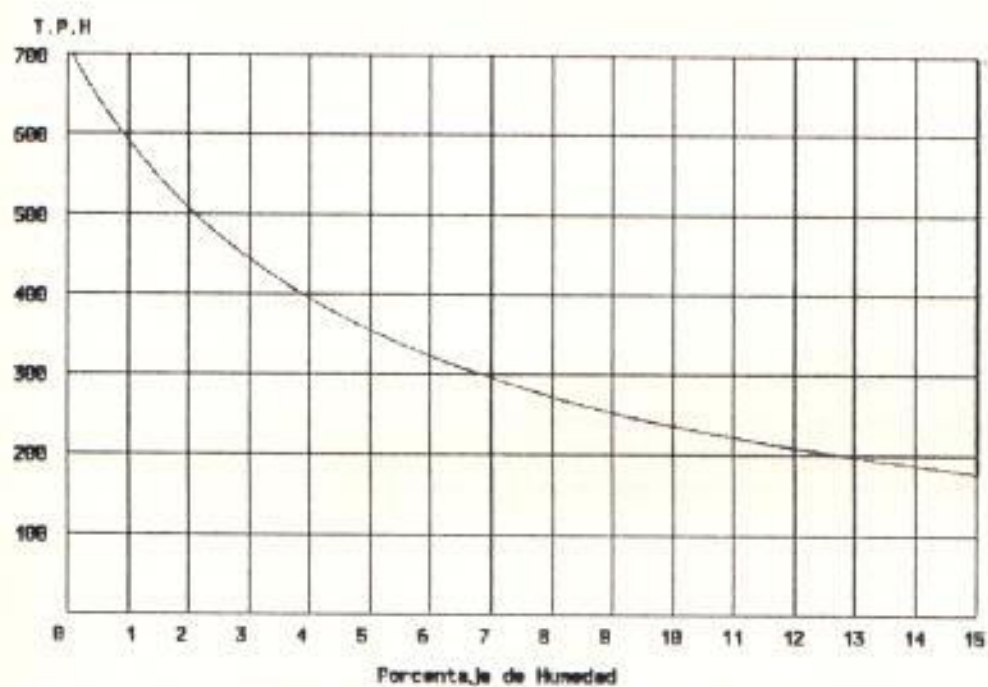


Figura 1.7 Capacidad Teorica

1.7 CALOR TOTAL REQUERIDO.

Se determina el calor total requerido por los materiales. El calor por la humedad contenida en ellos, se incrementa dicho valor en 6 a 7 % debido a aire y combustible, obteniéndose así el calor total requerido.

1.8 VOLUMEN DE COMBUSTIBLE A UTILIZARSE

Para la determinación del combustible requerido, se determina la cantidad total de calor requerida de acuerdo a los acápites anteriores (1.3 ---> 1.7).

Se divide la cantidad total de calor requerido por la capacidad calórica del combustible, y se determina la cantidad total del mismo. La misma que puede transformarse a volumen.

EJEMPLO:

CALCULO PARA UN CALDERO DE 100 TONELADAS POR HORA

Material = Mezcla 50% piedra, 30% granito, 20% arena

Temperatura inicial = 27°C

Temperatura final = 177°C

Porcentaje humedad = 5%

Combustible Diesel 10.250 Kcal/kg

$$\begin{aligned}
\text{Peso total} &= 100 \text{ toneladas.} \\
\text{Peso del material} &= 0.95 * 100 = 95 \text{ Toneladas} \\
\text{Peso del agua} &= 0.05 * 100 = 5 \text{ Toneladas} \\
Q \text{ requerido mater} &= 95 * 30.150 = 2.86 \times 10^6 \text{ Kcal [1.3]} \\
Q \text{ requerido agua} &= 5 * 651.592 = 3.26 \times 10^6 \text{ Kcal [1.4]} \\
Q \text{ sub-total} &= 6.12 \times 10^6 \text{ Kcal [1.6]} \\
Q \text{ Total} &= 1.06 \times 6.12 \times 10^6 = 6.49 \times 10^6 \text{ Kcal [1.7]} \\
\text{Combustible} &= 6.49 \times 10^6 / 10.250 = 633,2 \text{ kg/hora} \\
\text{Combustible} &= \underline{184 \text{ gal\u00f3nes de diesel / hora}} \quad ;1.5\%
\end{aligned}$$

Utilizando el procedimiento anterior, se ha calculado la capacidad de secado de materiales en Toneladas por Hora en funci\u00f3n de la humedad, desde 0% hasta 15%. Valores que se presentan en la figura 1.3, para un flujo constante de combustible diesel, de 350 galones por hora.

Es notoria la disminuci\u00f3n substancial, de capacidad de secado al incrementarse la humedad.

Dado que el costo actual del Diesel es de 1460 sucres por gal\u00f3n la operaci\u00f3n de este caldero tiene un costo:

$$\text{Costo} = 350 \text{ gal/hora} \times 1460 \text{ sucres} = \text{S/. } 511.000/\text{hora}$$

$$\text{Costo} = 8 \text{ horas} * 511.000 = 4'000.000 \text{ sucres/d\u00eda.}$$

El elevado costo diario del combustible, justifica trabajar dicho caldero al m\u00e1ximo de eficiencia.

1.9 LIMITES PERMISIBLES DE TEMPERATURA

Dependiendo del material a ser calentado, y el o los procesos a realizarse en dichos materiales, se fijan los rangos de temperatura.

En nuestro caso, tomando como ejemplo, la producción de agregados asfálticos para pavimentaciones, no es el material en si (piedra, granito, arena), el que determina la máxima temperatura, sino es el compuesto bituminoso denominado asfalto, el que determina este límite. Este límite superior en este caso, para evitar que se queme el asfalto es:

Temp Límite superior = 420°F igual a 215°C.

El rango inferior se produce en nuestro caso cuando la temperatura del agregado es insuficiente, para conseguir una buena adherencia del asfalto, y este experimentalmente es:

Temp Límite inferior = 230°F = 110°C

Al utilizar el caldero, es muy común emplear aceites térmicos, como medio de transferencia, en este caso es vitalmente importante el tener una temperatura límite superior, debajo del punto de inflamación.

1.10 RANGOS DE SEGURIDAD

Se denominan rangos de seguridad, aquellos aceptables para que no exista peligro ni para el o los operadores, ni para la maquinaria en si, aunque el producto no sea de óptima calidad. Así, la temperatura de los gases de la combustión no debe exceder de $550^{\circ}\text{F} \sim 290^{\circ}\text{C}$, al evacuar los mismos por la chimenea, a fin de evitar el daño a los aceites y grasas de lubricación.

Otros límites de seguridad, tienen que ver con:

- a.- Verificación continua de la existencia de llama
- b.- Evacuación de gases combustibles previo al encendido.
- c.- Enclavamientos para evitar el funcionamiento, si el no se ejecutan las operaciones en secuencia correcta.
- d.- La compuerta de modulación del quemador debe encontrarse cerrada, previo a arranque de iniciación.
- e.- Control de tiempo máximo de intento de ignición.
- f.- Verificación de fuego bajo, previo al principal.
- g.- Protección contra ruptura de la o las termocuplas.
- h.- Cerrado automático de las válvulas de combustible aún en caso de interrupción de la energía eléctrica.
- i.- Sensado directo de sobre presión, y vacío parcial para el soplador y para el extractor.

CAPITULO II

FUNCIONAMIENTO DEL CALDERO

2.1 PURGA

En los calderos, y en general en las cámaras de secado de materiales, pueden existir remanentes de gases combustibles, los mismos que deben ser evacuados, totalmente, previo al encendido del quemador, a fin de evitar explosiones, perjudiciales para los operadores y/o la maquinaria industrial.

2.1.1 TIEMPO DE PURGA REQUERIDO

Un buen sistema de purga de los gases del caldero, debe permitir que el aire contenido dentro de las dimensiones del mismo, sea evacuado al menos 10 veces su volumen, con lo cual el contenido máximo de gases combustibles igual a $1/2 \times 10$ o sea un 0.1% de gases remanentes.

En los calderos "CEDARAPIDS" se utiliza un tiempo de purga

de treinta (30) segundos. El sistema de arranque del quemador está diseñado de manera que el quemador no pueda prender si el ciclo de purga no ha concluido.

Si el ciclo de purga ha concluido esto es han transcurridos 30 segundos se ilumina el indicador de LISTO, en este momento se puede proceder al arranque presionando la botónera de ARRANQUE que permite que el transformador de ignición y la válvula piloto de paso de gas se energizen al mismo tiempo, produciéndose la llama piloto.

2.2 PRE-ENCENDIDO DE GAS INFLAMABLE.

La producción de llama por el arco eléctrico, saltando en el gas de pre encendido, debe tener lugar en un período de 15 segundos contados desde el momento en que se presionó la botonera de ARRANQUE, si al cabo de 15 segundos no se ha detectado LLAMA, el sistema retorna a la condición de pre purga y debe iniciar todo el ciclo completo. La detección de la presencia de la llama corre a cargo de un detector ultravioleta.

2.3 CIRCUITO DE DETECCION ULTRA-VIOLETA DE LA LLAMA

Para detectar la presencia de llama, uno de los sistemas mas eficaces, es utilizar detectores ultravioleta, que son

aquellos que se energizan tan sólo con luz de muy corta longitud de onda, lo cual previene el sensar equivocadamente como llama, la luz despedida por ladrillos refractarios al rojo vivo, u otras fuentes de luz de longitud de onda mas larga, inclusive dichos detectores son poco sensibles a la luz solar.

Estan compuestos por un bulbo de vidrio, en cuyo interior hay argón, y dos láminas que se polarizan con un voltaje de pocos cientos de voltios. Al incidir luz de onda corta (muy alta frecuencia), el argón se ioniza permitiendo la conducción de corriente. Dicha corriente mediante un diodo rectificador, es convertida en Vdc., el cual energiza un transistor (Darlington), que excita la bobina de un relé "RF". Los contactos del relé, son los indicadores de la detección de luz ultra-violeta (llama).

2.4 TIEMPO DE ESTABILIZACION DE LA LLAMA

Normalmente se utiliza una constante de tiempo de 0.2 segundos, para insensibilizar al detector de fluctuaciones de la llama, durante un período de 3 constantes de tiempo, es decir mas o menos 0.6 segundos.

2.5 CONTROL DE POSICION DE REGULADORES DE AIRR Y COMBUSTIBLE PRE-ENCENDIDO.

La combustión óptima, como se determino en el capítulo uno, requiere de una relación de aire a combustible de 15:1, por peso. En realidad se incrementa este nivel teórico en un 10 a 15%, a fin de garantizar que aún, si la mezcla no es totalmente homogénea, se combustione todo el combustible.

La posición de pre encendido, o encendido inicial del combustible principal, debe ser la llama baja, es decir con muy poco combustible (control de combustible cerrado) y aire en la posición cerrada, en esta posición cerrada debe haber sin embargo suficiente combustible y aire para mantener encendida la llama. Y la relación de aire a combustible debe ser ligeramente menor a 15:1.

2.6 IGNICION DE LLAMA BAJA

Al presionar el botón de arranque, después que ha transcurrido el tiempo de purga, se energiza la válvula de gas combustible y el transformador de ignición, los mismos que continuarán energizados mientras se mantenga presionado el botón de arranque. Si se detecta llama, como es normal, se energiza la válvula del combustible principal (DIESEL), el cual se inflama en contacto con la llama del gas, produciéndose el cambio a llama baja.

El quemador puede permanecer en llama baja, aunque no haya material, pues es pequeña la llama.

2.7 MODULACION DE LLAMA PRINCIPAL

Estando en "llama baja", el operador puede, cuando lo estime conveniente, (usualmente en el mismo momento en que se inicia la entrada de materiales al horno rotativo), mover el control para pasar de llama baja a principal. Ejecutada esta operación, se tienen las dos opciones de control del quemador: modo manual, y operación automática del modulador de llama.

2.7.1 MODO MANUAL

En esta posición, el operador controla la modulación de aire/combustible, pudiendo abrir o cerrar el inyector del caldero para obtener mayor o menor temperatura. No es recomendable su uso, pues requiere control permanente del operador; por supuesto los límites si funcionan, brindando seguridad al equipo.

2.7.2 CONTROL AUTOMÁTICO DE MODULACION

Si, al pasar de llama baja a principal, se está, en la opción automática, entonces se realizará la siguiente secuencia:

- a.- Se abrirá el modulador del quemador desde la posición cerrada hasta una posición previamente prefijada denominada "posición de arranque", la misma que usualmente esta cerca al 40% de máxima apertura, y cuyo valor se visualiza en el indicador correspondiente. En esta posición, el caldero recibirá mas o menos el mismo porcentaje del calor máximo (40%).

- b.- Al incrementarse muy rápidamente la apertura del modulador, la llama y la temperatura de los materiales, crecen a ritmo acelerado. El sensor de temperatura de los agregados (materiales), indicará la magnitud de la misma. Al llegar esta temperatura al 80%, de la temperatura prefijada en el control de "temperatura deseada" (set point), el sistema electrónico asume el comando del control de temperatura.

- c.- El sistema automático, a cargo del control, abrirá o cerrará el modulador, en función de la diferencia de

temperatura entre la temperatura deseada, y la real sensada por la termocupla. Es en esta función o posición donde normalmente se trabaja. Por esta razón, el ajuste de la inyección de aire y combustible, debe ser muy cuidadosamente realizada, si se desea obtener máxima eficiencia del caldero, y control optimizado del proceso.

- d.- El ajuste mas crítico es el la relación óptima de aire combustible, por ser este el factor principal para el rendimiento del caldero. Usualmente se lo realiza utilizando un analizador de los gases de combustión, tratando de obtener igual porcentaje de CO y de CO₂, y la mínima cantidad de combustible residual crudo. Debe cuidarse de no exceder la cantidad de aire, pues esto solo produce menor temperatura (al tener que calentar aire no utilizado), e ineficiencia del proceso.

CAPITULO III

CIRCUITO AMPLIFICADOR DE VOLTAJE DE TERMOCUPLAS

Se desea realizar un diseño tal que nos entregue un voltaje en el rango de los voltios, que sea linealmente proporcional a la temperatura que sensen las termocuplas que van a trabajar entre 100 a 600 grados Farentheit, el mismo que debe tener una compensación de temperatura para la unión de referencia, y ser insensible a cambios de voltaje y temperatura del amplificador.

3.1 CONDICIONES DE DISEÑO

El circuito debe incluir para esta aplicación particular dos amplificadores, el uno para la termocupla que mide la temperatura de los agregados, y el otro para la termocupla que mide la temperatura de los gases combustionados. Esta disposición es usualmente la que mejores resultados prácticos brinda, pues la temperatura de los materiales a ser calentados (agregados), posee una inercia térmica grande, es decir hay un retardo de tiempo entre la aplicación del calor y la elevación y transporte del material hasta el punto de

medición, mientras que la temperatura de los gases cambia mas rápidamente, proporcionando así un medio de protección contra elevaciones desmesuradas y violentas de temperatura.

3.2 CARACTERISTICAS DE LOS AMPLIFICADORES:

Las características que se desean para los amplificadores de las termocuplas son:

- a.- Que respondan linealmente al amplificar los pequeños voltajes producidos por las termocuplas.
- b.- Que tengan mínimo ruido inherente o propio del amplificador para que este no enmascare la señal.
- c.- Un amplio rechazo de la señal de la línea de 60 Hz.
- d.- El diseño de los amplificadores, se puede realizar para que entregue cero voltios si los cables de la termocupla se corto circuitan accidentalmente.
- e.- También se diseña para que entregue un voltaje muy grande, con respecto al normal suministrado por las TC. para simular una temperatura "fantasma" muy elevada, cuando se interrumpa o arranque el ó los conductores de

la termocupla. Permitiendo así sensar esta condición y tomar las medidas correctivas pertinentes.

f.- Debe tener una compensación de la junta fría o de referencia a fin de que entregue un voltaje proporcional a la temperatura real de la termocupla independiente de la temperatura de la junta de referencia.

g.- Como el voltaje a amplificar es quasi continuo, es decir, con cambios muy lentos en el tiempo, se requiere que el amplificador no tenga voltajes ni corrientes DC variables.

Aunque los amplificadores discretos realizados con componentes independientes, son los que poseen el menor ruido inherente, de haber escogido correctamente los elementos, sin embargo, sus características térmicas (voltajes y corrientes DC variables en el tiempo) son inferiores a las que podemos obtener con amplificadores operacionales, por tener éstos un mejor seguimiento de temperatura entre todos los transistores y elementos existentes en la pastilla de silicio. De la amplia gama de opamps existentes, debemos seleccionar aquel que posea, las mejores características térmicas, ya que como se vio en el capítulo de termocuplas, la magnitud de voltaje que entregan estas es muy pequeña, del orden de muy pocos milivoltios.

3.3 SELECCION DE LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES PARA TERMOCUPLAS

Las características deberían ser las siguientes:

- a.- Muy pequeño voltaje diferencial (V_{offset}) entre sus terminales.
- b.- Pequeña corriente de polarización (I_{bias})
- c.- Corriente diferencial entre las entradas muy pequeña
- d.- Mínima sensibilidad a los cambios de temperatura de los voltajes y corrientes diferenciales $d(V_{io}/T)$
- e.- Ruido inherente reducido
- f.- Gran rechazo a las señales de modo común CMR
- g.- Gran rechazo a las señales de la fuente de poder PSRR

Como se observa de la tabla # 3.3 un OPAMP adecuado es el LM 725, si la impedancia de la fuente es pequeña.

TABLA : 3.3 CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE VARIOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES, FIGURAS DE MERITO.

CARACTERISTICAS	LM108	LM324	LM725	LM741
I _{io}	0.05	5	2	20 nA
V _{io}	0.7	2	0.5	2 mV
CMR	100	70	120	90 db
PSRR	96	100	114	90 db
d V _{io} /d T	3	15	0.6	15 uV/C

FIG DE MERITO 1
 $(CMM)(PSRR)/(I_{io})(V_{io})(dV_{io}/d T)$

FIG DE MERITO 1 91429 47 22800 14

FIG DE MERITO 2 4571 233 45600 270
 sin I_{io}

CLARAMENTE SI ES UN CIRCUITO DE ALTA IMPEDANCIA
 EL MEJOR ES EL LM108

SI EL CIRCUITO ES DE BAJA IMPEDANCIA
 EL MEJOR ES EL LM725

3.4 PARAMETROS DEL DISEÑO DE LOS AMPLIFICADORES

1. Se especifica que el opamp entregue 1 voltio por cada 100 grados Fahrenheit. El voltaje suministrado por las termocuplas tipo "K" es de 22.59 micro voltios por grado Fahrenheit. Luego la amplificación con realimentación debe ser de:

$$A_{vf} = 1 \text{ V} / (22.588854 \times 10^{-6} \times 100 \text{ F}) = 442.69$$

2. El circuito de compensación de junta fría. Las termocuplas entregan un voltaje lineal proporcional a la diferencia de temperatura de las juntas caliente y fría. Es decir, que si ambas estan a la misma temperatura(por ejemplo 90 grados Fahrenheit) el voltaje entregado es cero. Se desea sin embargo que el Opamp entregue un voltaje de 0.90 voltios en estas condiciones. Luego el circuito de compensación debera entregar a la entrada un voltaje de:

$$0.90 / 442.69 \quad \text{voltios a } 90 \text{ F}$$

o sea igual a 2.129 milivoltios

3. Para minimizar los voltajes "offset" diferenciales, propios del amplificador operacional, debemos utilizar un

circuito de balanceo del OPAMP. El mismo que luego debera ser ajustado con entrada cero para que de un voltaje de salida cero.

4. Las resistencias en las entradas diferenciales de los opamps deberán ser de igual valor para que las corrientes de polarización (bias) no produzcan errores.
5. Para garantizar la linealidad de los amplificadores se desea que la amplificación diferencial A_{vd} , sea mucho mas grande que la amplificación con realimentación A_{vf} .
6. La compensación de junta fría consiste en escoger un resistor de magnitud y coeficiente de temperatura adecuados, tal que nos suministre un voltaje proporcional a la temperatura relativa de la junta fría.

3.5 COMPENSACION DE JUNTA FRIA

El voltaje suministrado por la termocupla es linealmente proporcional a la diferencia de temperaturas de la junta caliente y la junta fría. También es una función del material del que esta compuesta la termocupla, y para la TC. de hierro níquel vanadio y cobre llamada tipo "K", el coeficiente de correlación (K_k), es mas o menos 22.6 micro-

voltios por grado Fahrenheit. Se desea que el voltaje de salida del Opamp sea de 1 voltio por cada 100 grados Fahrenheit, luego el amplificador debe tener una ganancia de voltaje de:

$$A_{vf} = 1/(100F \cdot Kk) = 442.7$$

Para la compensación se debe colocar un resistor con coeficiente de temperatura "alfa" positivo. Si se pasa una corriente constante en este resistor, el voltaje producido será función de la magnitud del resistor, que es a su vez función de la temperatura. La magnitud de un resistor en función de la temperatura es:

$$R = R_0(1 + \text{Alfa} \times T)$$

y la caída de voltaje producida por una corriente constante será:

$$V = I \times R_0(1 + \text{Alfa} \times T)$$

la misma que vemos esta compuesta de dos componentes, uno constante $I \times R_0$, y otro variable proporcional a la temperatura.

De lo anterior, se deduce que si se suman los voltajes

producidos por la termocupla y por la resistencia de compensación, nos sobra un voltaje constante IR_0 , no proporcional a la temperatura, el mismo que debería ser eliminado, sumando un voltaje de igual magnitud y de signo contrario.

Luego hay tres voltajes que se suman para obtener un voltaje de salida compensado y correcto a cualquier temperatura, estos son:

a.- Voltaje de la termocupla "TC" :

$$TC = Kk(T_c - T_f)$$

Kk constante termocupla

T_c temperatura junta caliente

T_f temperatura junta fría

b.- Voltaje de la resistencia de compensación "Vb"

$$V_b = R_0(1 + \text{Alfa} \times T)$$

R_0 valor del resistor de compensación a cero grados F.

Alfa coeficiente de resistividad en función de temperatura.

c.- Voltaje constante a ser restado del producido por la resistencia de compensación al pasar una corriente I por

el resistor R_b cuyo valor es igual a R_o :

$$V_b = R_o \times I$$

3.6 CIRCUITO EQUIVALENTE PARA ANALISIS DE COMPENSACION

Este circuito lo realizamos, de acuerdo a las consideraciones anteriores, utilizando un sumador, una resistencia de compensación R_b , la cual variará su resistencia en función de la temperatura ambiente, y un resistor R_a , de valor fijo y constante, es decir, con un coeficiente alfa = 0. Como estas consideraciones ideales no se las consigue, utilizamos un resistor devanado de cobre para la compensación, y un resistor de niquelina para el resistor de referencia por tener muy bajo coeficiente de temperatura. Resistor de cobre:
(para compensación)

$$\begin{aligned} \text{Coeficiente de temperatura Alfa}_{Cu} &= 0.003870 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\ &= 0.002150 \text{ } ^\circ\text{F}^{-1} \end{aligned}$$

Resistor de Niquelina: (Referencia)

$$\begin{aligned} \text{Coeficiente de temperatura Alfa}_{Ni} &= 0.000283 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\ &= 0.000157 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \end{aligned}$$

Termocupla tipo K:

$$\text{Coeficiente } K_k = 0.000\ 022.58884 \text{ voltios}/^\circ\text{F}$$

Fuente de corriente constante:

Esta será de cualquier magnitud, cuidando que la potencia que se disipa en los resistores sea muy pequeña, para evitar calentamiento en los mismos, y error en la medición. Ver figura 3.6

Tenemos:

R_{o_Cu} y R_{o_Ni} son los valores de los resistores a $0^\circ F$

$$R_a = R_{o_Ni}(1 + \alpha_{Ni} T_1)$$

$$R_b = R_{o_Cu}(1 + \alpha_{Cu} T_1)$$

$$V_o = V_{TC} + V \cdot R_b - V \cdot R_a$$

$$V_o = (T_2 - T_1)K_k + R_{o_Cu}(1 + \alpha_{Cu} T_1)I - R_{o_Ni}(1 + \alpha_{Ni} T_1)I$$

$$V_o = K_k T_2 - K_k T_1 + R_{o_cu} \cdot I + R_{o_cu} \cdot \alpha_{cu} \cdot T_1 \cdot I - R_{o_ni} \cdot I - R_{o_ni} \cdot \alpha_{ni} \cdot T_1 \cdot I$$

Queremos que el voltaje de salida sea, linealmente proporcional a la temperatura de la junta caliente (T_2), por tanto debemos eliminar todos los términos que no sean función de T_2 , esto es:

$$R_{o_Cu} \cdot I = R_{o_Ni} \cdot I$$

Si las corrientes son iguales, entonces:

$$R_{o_Cu} = R_{o_Ni} = R_o$$

es decir que $R_a = R_b$ a $0^\circ F$

También tenemos:

$$T1(-Kk + R_o.A\alpha_{Cu}.I - R_o.A\alpha_{Ni}.I) = 0$$

de donde:

$$R_o = Kk / (A\alpha_{Cu} - A\alpha_{Ni}).I$$

Calculamos los valores de R_o , R_a y R_b a diferentes temperaturas, utilizando un programa de computación. (Ver programa y valores computados a continuación).

El amplificador de la temperatura de los gases, debe también tener una compensación de junta fría, la diferencia, es que por motivos de diseño requerimos que el voltaje de salida sea de cero voltios, para 100°F, manteniendo la misma pendiente de 1 voltio por 100°F. Luego la compensación de junta fría se la realiza, a 100 °F, obteniéndose diferentes valores, para los resistores de compensación, y referencia. Ver programas de computación y resultados teóricos calculados en las siguientes páginas.

Los valores de los resistores a 100°F son:

	AGREGADOS	CHIMENEA
RESISTOR DE COMPENSACION	2.75 ohmios	2.27 ohmios
RESISTOR DE REFERENCIA	2.30 "	2.27 "

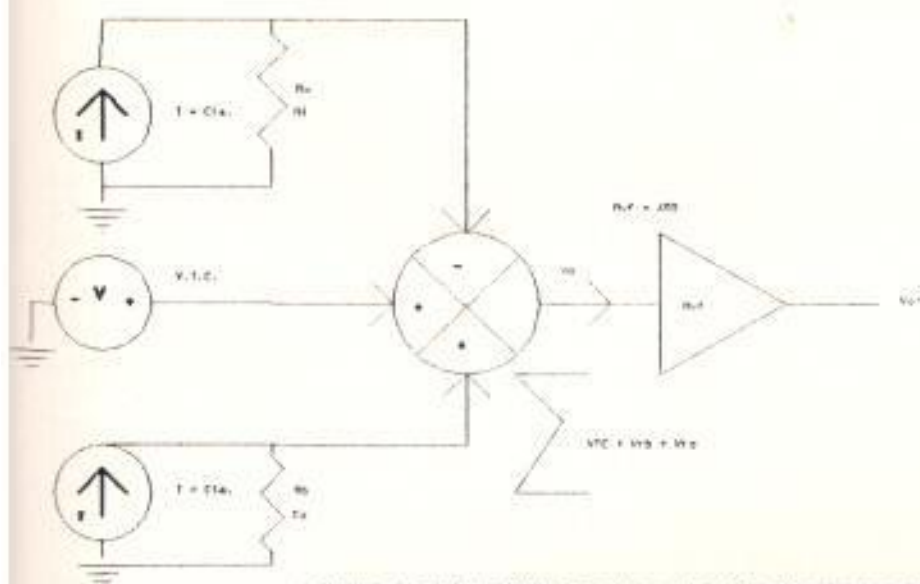


Figura 3.6 Simulación de la Compensación

```

! RESISTENCIAS DE COMPENSACION DE JUNTA FRIA
!*****
!
! PARA EL AMP DE AGREGADOS
!
! TC voltaje producido por la termocupla
! JF voltaje producido por la resistencia de compensacion
! VF voltaje a restarse de JF = Ra x I
! Ra resistencia constante (Niquelina)
! Rb el resistor variable en f(temp) (Cu, o, Al)
! La termocupla tipo "K" produce ~22.59 microvolts F

LET Kk = 22.58884e-6 ! coeficiente termocupla "K"
LET Alf_cobre = 0.003870 *5/9 ! coef. temperat F)
LET Alf_aluminio = 0.004000 *5/9
LET Alf_hierro = 0.005000 *5/9
LET Alf_carbon = -0.000500 *5/9 !negativo para carbon
LET Alf_niquelina = 0.000283 *5/9 ! ohmios/ohmios F
LET I = 5e-3 ! icte = 5 ma
LET Avf = 1/(100*Kk) ! 1 voltio cada 100 F
DEF Ro = Kk/(I*(Alf_cobre - Alf_niquelina)) !valor de Ro
DEF Ra = Ro*(1+Alf_niquelina*T1)
DEF Rb = Ro*(1+Alf_cobre*T1)
DEF Vo = Avf*((T2-T1)*Kk+I*Rb-I*Ra)

PRINT " Amplificacion voltaje con realimentacion Avf =";Avf

PRINT "Ro =";Ro;"valor de los resistores a 0 F"
PRINT
PRINT "TEMPERATURA F Ra= REFERENCIA Rb COMPENSACION "
PRINT " "
FOR T1 = 0 to 800 step 100
PRINT "T1= ";T1," Ra=";Ra," Rb =";Rb
NEXT T1
PRINT
PRINT
PRINT "Voltaje de Salida Compensado funcion temperatura F"
PRINT "-----"
FOR T1 = 100 to 300 step 100
FOR T2 = 100 to 500 step 150
PRINT "Temp T1 =";T1,"Temp T2=";T2,"Vo=";Vo
NEXT T2
PRINT
NEXT T1
END

```

Ok. run

Amplificacion de voltaje con realimentacion $A_{vf} = 442.696$
 $R_o = 2.26707$ valor de los resistores a 0 F

TEMPERATURA F	Ra= REFERENCIA	Rb COMPENSACION
T1= 0	Ra= 2.26707	Rb = 2.26707
T1= 100	Ra= 2.30271	Rb = 2.75449
T1= 200	Ra= 2.33836	Rb = 3.24191
T1= 300	Ra= 2.374	Rb = 3.72933
T1= 400	Ra= 2.40964	Rb = 4.21675
T1= 500	Ra= 2.44529	Rb = 4.70417
T1= 600	Ra= 2.48093	Rb = 5.19159
T1= 700	Ra= 2.51657	Rb = 5.67901
T1= 800	Ra= 2.55222	Rb = 6.16643

Voltaje de Salida Compensado en funcion de temperatura F

Temp T1 = 100	Temp T2= 100	Vo= 1 voltios
Temp T1 = 100	Temp T2= 250	Vo= 2.5 voltios
Temp T1 = 100	Temp T2= 400	Vo= 4. voltios
Temp T1 = 200	Temp T2= 100	Vo= 1 voltios
Temp T1 = 200	Temp T2= 250	Vo= 2.5 voltios
Temp T1 = 200	Temp T2= 400	Vo= 4 voltios
Temp T1 = 300	Temp T2= 100	Vo= 1. voltios
Temp T1 = 300	Temp T2= 250	Vo= 2.5 voltios
Temp T1 = 300	Temp T2= 400	Vo= 4. voltios

```

! RESISTENCIAS DE COMPENSACION DE JUNTA FRIA
!
!*****
! AMPLIFICADOR DE TEMP GASES DE CHIMENEA
!
! TC voltaje producido por la termocupla
! JF voltaje producido por la resistencia de compensacion
! VF voltaje a restarse de JF = Ra x I
! Ra resistencia constante ( Niquelina)
! Rb el resistor variable en f(temp) (Cu, o, Al)
! La termocupla tipo "K" produce ~22.59 microvoltio F

LET Kk = 22.58884e-6 ! coef termocupla "K"
LET Alf_cobre = 0.003870 *5/9 ! coef. temperatur F)
LET Alf_aluminio = 0.004000 *5/9
LET Alf_hierro = 0.005000 *5/9
LET Alf_carbon = -0.000500 *5/9 ! negativo para carbon
LET Alf_niquelina = 0.000283 *5/9 ! ohmios/ohmios F
LET I = 5e-3 ! Icte = 5 ma
LET Avf = 1/(100*Kk) ! p 1 voltio 100 F
DEF R100 = Kk/(I*(Alf_cobre - Alf_niquelina)) !
DEF Ra = R100*(1+Alf_niquelina*(T1-100))
DEF Rb = R100*(1+Alf_cobre*(T1-100))
DEF Vo = Avf*((T2-T1)*Kk+I*Rb-I*Ra)

PRINT " Amplificacion de voltaje con realimentacion Avf =";Avf

PRINT "R100 =";R100;"valor de los resistores a 100 F"
PRINT
PRINT "TEMPERATURA F Ra= REFERENCIA Rb COMPENSACION "
PRINT " "
FOR T1 = 0 to 800 step 100
PRINT "T1= ";T1," Ra=";Ra," Rb =";Rb
NEXT T1
PRINT
PRINT
PRINT "Voltaje de Salida Compensado F(temperatura F)"
PRINT "-----"
FOR T1 = 100 to 300 step 100
FOR T2 = 100 to 500 step 150
PRINT "Temp T1 =";T1,"Temp T2=";T2,"Vo=";Vo
NEXT T2
print
NEXT T1
END

```

Ok. run

Amplificacion de voltaje con realimentacion $A_{vf} = 442.696$
 $R_{100} = 2.26707$ valor de los resistores a 100 F

TEMPERATURA F	Ra= REFERENCIA	Rb COMPENSACION
T1= 0	Ra= 2.23143	Rb = 1.77965
T1= 100	Ra= 2.26707	Rb = 2.26707
T1= 200	Ra= 2.30271	Rb = 2.75449
T1= 300	Ra= 2.33836	Rb = 3.24191
T1= 400	Ra= 2.374	Rb = 3.72933
T1= 500	Ra= 2.40964	Rb = 4.21675
T1= 600	Ra= 2.44529	Rb = 4.70417
T1= 700	Ra= 2.48093	Rb = 5.19159
T1= 800	Ra= 2.51657	Rb = 5.67901

Voltaje de Salida Compensado en funcion de temperatura F

Temp T1 = 100	Temp T2= 100	Vo= 0 voltios
Temp T1 = 100	Temp T2= 250	Vo= 1.5 voltios
Temp T1 = 100	Temp T2= 400	Vo= 3. voltios
Temp T1 = 200	Temp T2= 100	Vo= 0 voltios
Temp T1 = 200	Temp T2= 250	Vo= 1.5 voltios
Temp T1 = 200	Temp T2= 400	Vo= 3. voltios
Temp T1 = 300	Temp T2= 100	Vo= 2.45746e-14 voltios
Temp T1 = 300	Temp T2= 250	Vo= 1.5 voltios
Temp T1 = 300	Temp T2= 400	Vo= 3. voltios

3.7 DISEÑO DEL CIRCUITO ELECTRONICO AMPLIFICADOR DE T.C.

El amplificador será realizado utilizando un operacional LM725 como se determinó anteriormente.

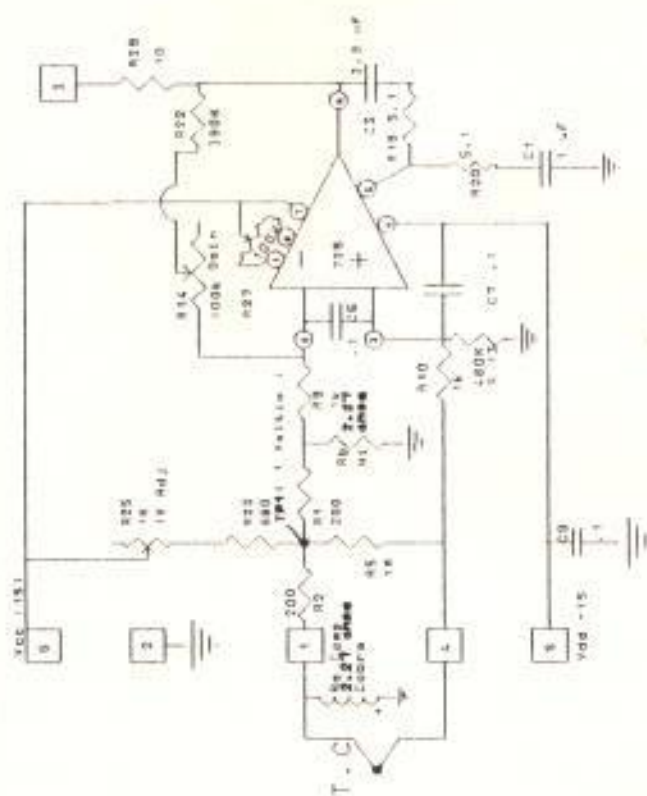
La amplificación requerida fue de 442.696, lo obtenemos con un resistor de entrada de 1K ohmios, y un resistor de realimentación de 443 K ohmios, dividido en uno fijo de 390K y otro variable de 100 K para poder ajustar la ganancia.

Utilizamos un voltaje ajustable de 1 voltio en TP1 el mismo que através de los resistores R1 y R2 de 200 ohmios de níquelina, funcionan como las fuentes de corriente constante de $1\text{v}/200\text{ ohmios} = 5\text{ ma}$. Esta corriente al pasar a través de Ra, y Rb compensan la junta fría.

Para proteger contra la ruptura de la termocupla, utilizamos un resistor de 1 Mega ohmio. El cual desde la fuente de referencia de +1 voltios casi no produce voltaje en v+ mientras la termocupla no se rompa, pero da una magnitud de 1/3 de voltio al romperse la TC. Lo que equivale a una temperatura de 13.000 grados Fahrenheit, lo cual hace que el caldero automáticamente se apague. A esta temperatura simulada se llama "Temperatura Fantasma".

El circuito lleva como es normal compensación de voltaje "offset" y compensación de frecuencia. Se ajusta la ganancia de $V+$ atenuando su magnitud $1/443$ con los resistores $R10$ y $R13$.

T.C. Amplificador de Chimenea



T.C. Amplificador de Agregados

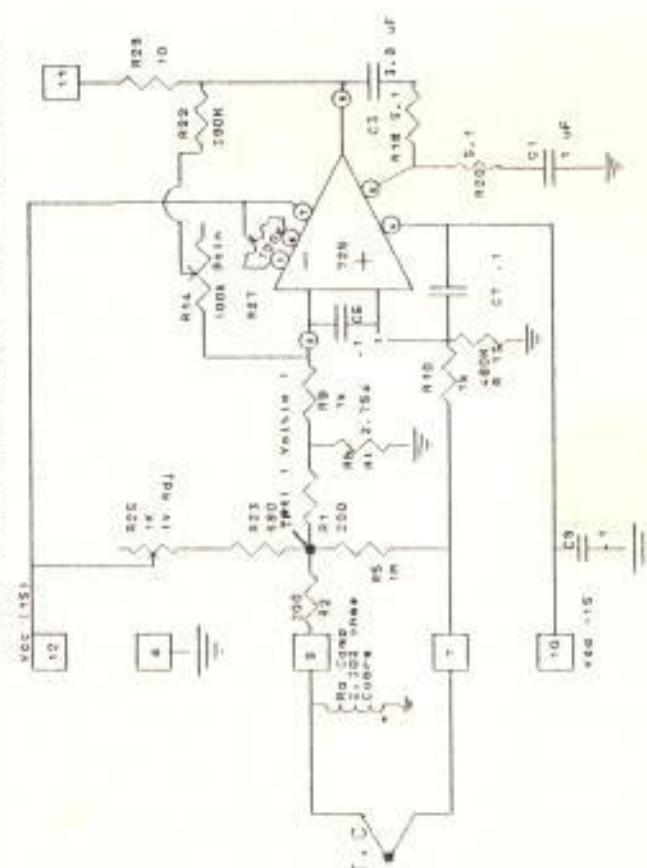


Figura # 3.7 Circuito de amplif. termocps

CAPITULO IV

ANALISIS DE LOS CIRCUITOS DE RETARDO DE TIEMPO

TEMPORIZADORES

Se requiere para el funcionamiento descrito en el capítulo, de dos circuitos de retardo de tiempo, el uno de treinta (30) segundos, para el tiempo que debe durar la purga de los gases, y el otro de quince (15) segundos, que es el tiempo de prueba para que el detector, sense la presencia de llama continua.

4.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

De los varios tipos de temporizadores, por su confiabilidad y repetibilidad, utilizamos un OPAMP como comparador de un voltaje fijo regulable, con otro producido en un capacitor que se carga a través de un resistor desde una fuente de voltaje continuo.

Cuando se tiene un voltaje DC alimentando una red resistiva capacitiva el tiempo que demora el capacitor en cargar dependera de la constante de tiempo, es decir de los valores de la resistencia y del capacitor.

4.2 TEMPORIZADOR DE PURGA

El circuito de la figura 4.2 nos entrega un retardo de tiempo de 30 segundos, para lo cual se diseña, con una constante de tiempo de 44 segundos dada por el resistor de 22 Mega-ohmios y el capacitor de 2 μF .

Mientras el voltaje del capacitor sea menor al voltaje fijado en TP2 el voltaje a la salida del amplificador operacional 741 será muy pequeño para energizar el transistor, cuando los dos voltajes sean iguales la salida del amplificador operacional 741 (IC2) energizará el transistor y por lo tanto las bobinas TDI 30 segundos y K2 estarán energizadas haciendo que sus contactos respectivos abran o cierren según el diseño del sistema eléctrico.

4.3 TEMPORIZADOR DE 15 SEGUNDOS

Usa el mismo circuito del temporizador de Purga, salvo que la constante de tiempo debe ser menor, y utilizamos realmente tan sólo 20 segundos, como constante de tiempo, dada por un resistor de 10 Mega ohmios y un capacitor de 2 μF .

La figura 4.3 presenta dicho circuito. En ambos temporizadores utilizamos el OPAMP 741 por no ser críticos

los valores de voltajes y corrientes diferenciales requeridos, obteniendo un muy buen funcionamiento.

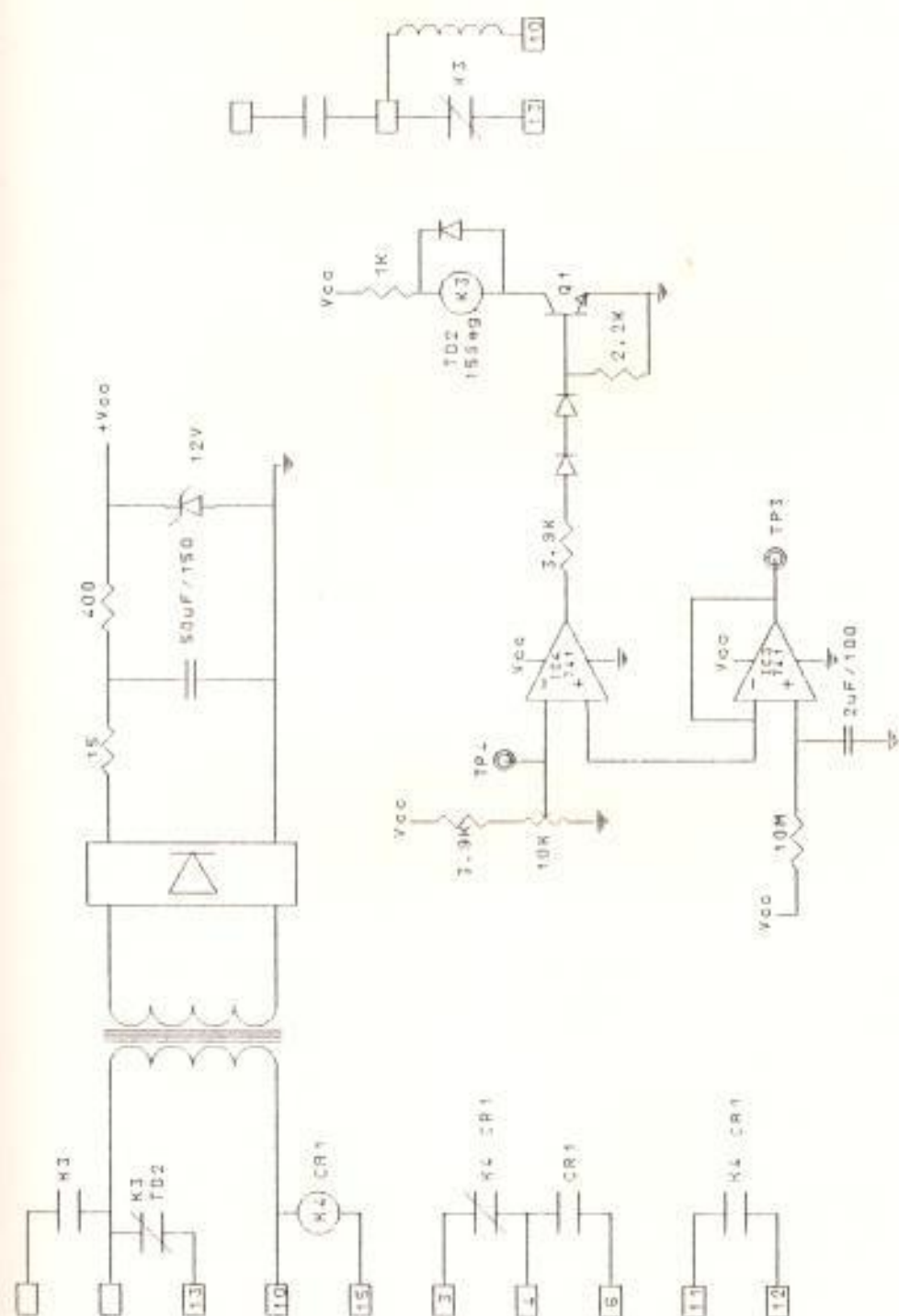


Figura # 4.3 TEMPORIZADOR DE 15 SEG.

CAPITULO V

REGISTRO CONTINUO DE TEMPERATURA DEL MATERIAL

Y

LIMITES DE SEGURIDAD

5.1 REGISTRO CONTINUO DE TEMPERATURA DE LOS MATERIALES

El grabador muestra la temperatura del agregado para un período de 24 horas que es el tiempo de duración de cada carta circular.

El rango de temperatura que se puede graficar en esta carta tiene como límite inferior 100° F y como límite superior 500° F.

En la carta circular estan dibujados varios círculos concéntricos que equivalen a temperaturas que van desde 100° F hasta 500° F en pasos de 25° F cada círculo.

Para hacer rotar esta carta circular usamos un motor

sincrónico de 120 Voltios AC con una gran desmultiplicación de forma que cada vuelta de la carta equivalga a 24 horas de grabación.

Por otro lado la plumilla que dibuja sobre la carta circular se mueve por la acción de un motor jaula de ardilla que tiene una gran desmultiplicación. Este motor gira en ambos sentidos y permite mover la plumilla entre el extremo interior de la carta al extremo exterior de la carta.

Se quiere que la plumilla del grabador se mueva graficando la temperatura del agregado y que no grafique temperaturas inferiores a 100°F ni superiores a 500°F.

El objetivo es sensar el movimiento de la plumilla através de un potenciómetro, del cual se toma un voltaje proporcional al desplazamiento de la misma, el cual se lo compara con el voltaje de referencia, es decir, con el del agregado, el mismo que suministra 1 voltio por cada 100°F. de temperatura de los materiales.

Cuando el voltaje del agregado es mayor que el voltaje de la plumilla el motor girará en sentido de las manecillas del reloj, y la plumilla se desplaza hacia una temperatura mas alta, hasta igualar los voltajes.

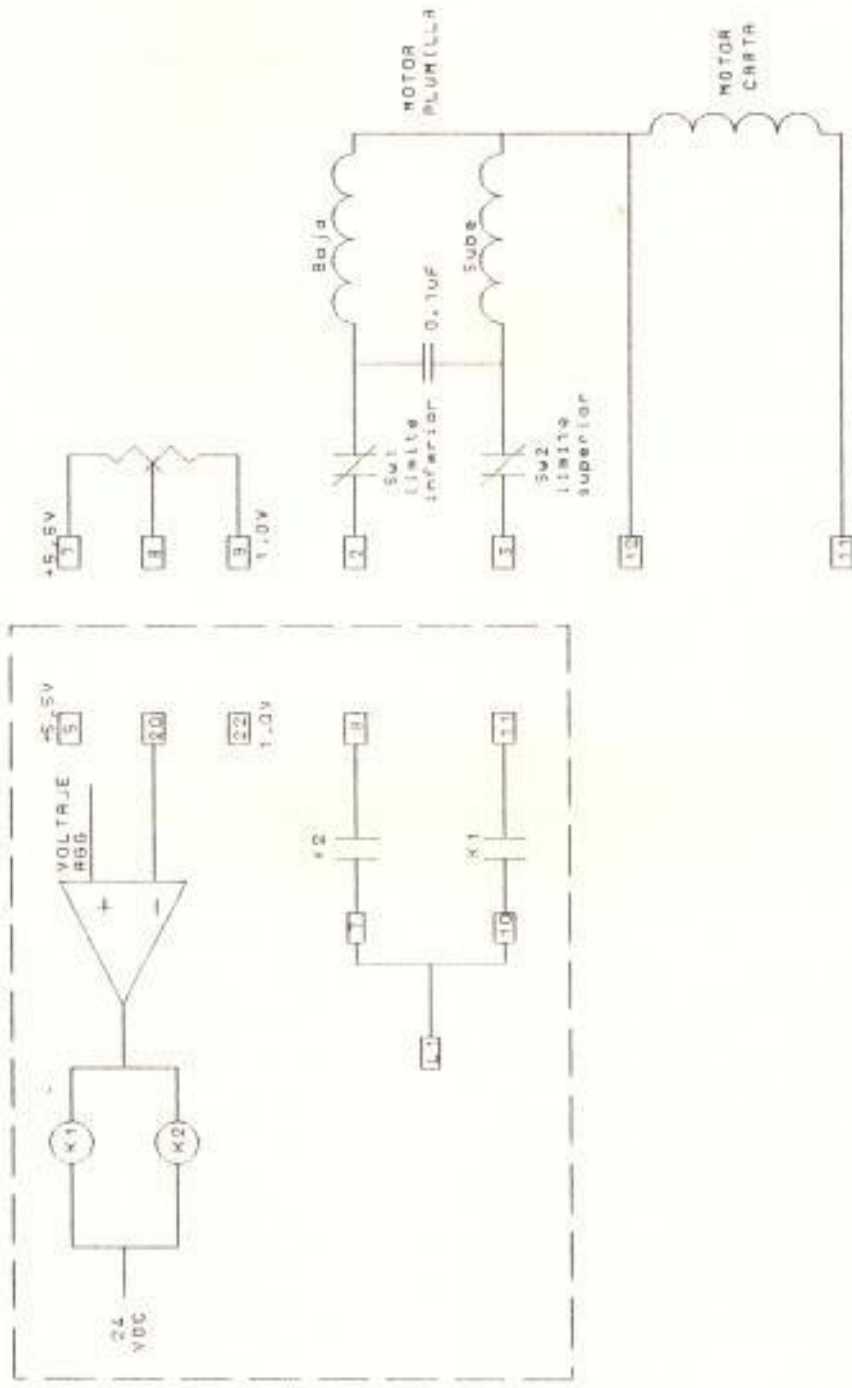


Figura # 5.1 GRABADOR CIRCULAR DE 24 H

5.2 LIMITES

5.2.1 TEMPERATURA MAXIMA DEL AGREGADO

El material, usualmente tiene un límite máximo de temperatura permisible, a fin de evitar deterioros, daños al equipo, o peligro. Por este motivo es normal, el fijar un límite máximo de temperatura, que la impida que la misma exceda cierto valor aún cuando el operador, por negligencia o error, haya puesto una temperatura deseada mayor.

Para este caldero "GENCO", utilizado en la producción de concreto asfáltico, la temperatura límite superior es de 420°F. Este límite fija la temperatura máxima del agregado lo que significa que cuando la temperatura del agregado sea mas alta que la temperatura límite fijada el quemador automáticamente cambia a modo de fuego bajo.

5.2.2 TEMPERATURA DE CAMBIO A AUTOMATICO

Como se mencionó con anterioridad, el sistema automático debe entrar en funcionamiento, cuando la temperatura de los agregados sea muy cercana a la temperatura deseada (set point), a fin de evitar una sobre reacción del sistema, o seguimiento periódico (cacería), y experimentalmente, se

encontró que un punto adecuado era al 90% de la temperatura deseada.

5.2.3 LIMITE DE TEMPERATURA DE LOS GASES

Los gases de la combustión, que escapan através de la chimenea, son sensados mediante tres termocuplas, la primera, cuya señal es amplificada por un operacional con compensación de junta fría, semejante al utilizado para la medición de los agregados. Nos entrega también un voltaje lineal proporcional a la temperatura, con una magnitud de 1 voltio cada 100°F. Como el medidor de temperatura de los gases de la chimenea tiene una escala de 100°F. hasta 600°F, se compensa la junta fría a 100°F. De tal forma que nos entrega un voltaje de 0 Voltios a 100°F. y 5 voltios a 600°F. Las dos termocuplas restantes se describen en el capítulo de "DETECCION AVANZADA DE TEMPERATURA".

El comportamiento del voltaje en función de la temperatura en grados Fahrenheit es:

$$V_0 = 0.01 \times ^\circ F - 1$$

Este voltaje luego de pasar por un seguidor emisor (ICI 741) va a alimentar el indicador de temperatura de los gases. Para conseguir que la lectura sea correcta se debe ajustar RANGE STACK (R15).

AJUSTE

Se aplica + 5 voltios a la entrada [18], ajustamos R15 de manera que la lectura en el indicador de gases sea 600°F.

5.2.4 INDICADOR DE GASES

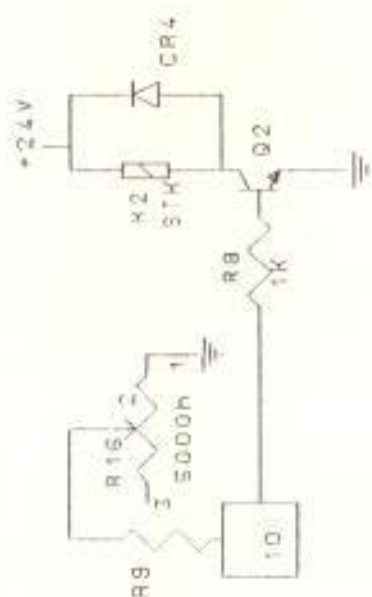
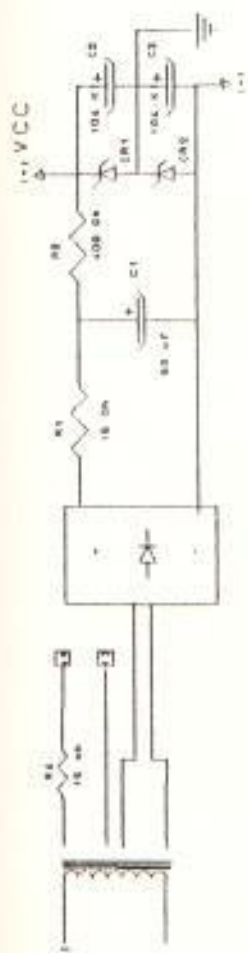
El indicador de gases (en panel) es un indicador de bobina móvil de 65 ohmios y 1 ma; adicionalmente a la aguja indicadora de gases posee dos agujas las cuales de manera manual son fijadas para que limiten la temperatura mínima (aguja verde) y máxima (aguja anaranjada) de los gases.

5.2.5 ANALISIS DE FUNCIONAMIENTO

La detección de temperatura límite se basa en dos foto resistores uno por cada límite de temperatura los cuales no reciben luz excepto cuando la temperatura de los gases exceden los límites fijados provocando en el foto resistor la disminución de la resistencia y por lo tanto aumentando la corriente que alimenta el transistor Q₂ el cual hace que se energize K2. Ver figura 5.2

K2 se energiza dependiendo de la corriente base que circule en el transistor Q₂; esta corriente puede ser

ajustada por medio de RANGE STACK LIMIT (R16) que no es otra cosa que un ajuste de sensibilidad que permite la reacción del foto resistor con una cantidad de luz adecuada.



RANGE STACK

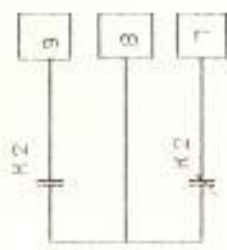
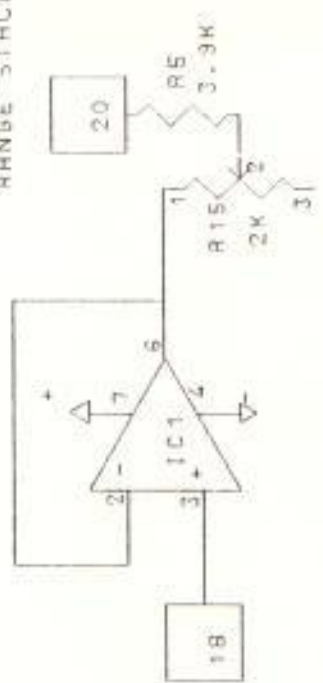


Figura # 5.2 Limite de Temperatura de los gases

5.3 CIRCUITO DE LIMITES Y DE GRABACION DE TEMPERATURA

La figura 5.3 presenta el circuito electrónico, empleado para la fijación de los dos límites propuestos, y para el control del grabador circular de 24 horas.

5.3.1 ANALISIS DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL GRABADOR

Para que el motor de control de la plumilla gire incrementando la temperatura, es necesario cerrar el contacto K1, y para que descienda, debe cerrarse el contacto K2, estos dos relés son controlados por los transistores Q1 y Q3 respectivamente. Estos transistores, se energizan en función del voltaje de salida del OPAMP Z3, que funciona como comparador de ganancia limitada a 70 veces, a fin de presentar un pequeño intervalo de NO movimiento de la plumilla. Cuando uno de los transistores están saturados, la corriente en la bobina del relé es de $22v/5.300 = 4.15$ ma. Lo que implica un voltaje de salida del OPAMP de ~ 1 voltio, o sea que el voltaje diferencial es igual a $1/70 = 0.0142$ voltios, que es igual a $1.42^{\circ}F$.

Como se desea que los límites mínimo y máximo de temperatura a registrar sean de $100^{\circ}F$. y $500^{\circ}F$. respectivamente, se deben ajustar los potenciómetros R6, y R5, hasta obtener un

voltaje de 1.00 voltios en el terminal N° 22, y 5.00 voltios en el terminal N°5. Estos dos ajustes presentan una pequeña interacción.

5.3.2 ANALISIS DEL CIRCUITO DE LIMITE MAXIMO

Para obtener este voltaje se utiliza el potenciómetro R17 con el cual se ajusta la resistencia hasta tener un voltaje de 4.2 voltios que corresponde a la temperatura máxima permisible (420°F), este voltaje es comparado con el voltaje del agregado, por el OPAMP Z1, que funciona como comparador de ganancia limitada a 21 veces. Mientras el voltaje del agregado sea inferior al voltaje límite la salida del circuito integrado Z1 estará saturado positivamente y por lo tanto K3 estara energizado (condición normal de trabajo). Cuando la temperatura del agregado supere la temperatura límite, K3 dejará de estar energizado y el quemador cambia al modo de fuego bajo.

5.3.3 TEMPERATURA DE CAMBIO A AUTOMATICO

El circuito que se utiliza para fijar la temperatura de cambio es una fracción del voltaje de TEMPERATURA DESEADA (set point), el mismo que lo he construido mediante los resistores R14 de 44.2K y el resistor R10 de 4.7k lo que nos da una fracción de $44.2k/(4.7k+44.2K) = 0.903$ y mientras la temperatura del agregado sea inferior a la temperatura de

cambio la salida de Z2 sera positiva manteniendo energizado K4, cuando se llegue a la temperatura de cambio K4 se descuergizará y el control sera automático, (con modulación de aire/combustible).

CAPITULO VI

DETECCION AVANZADA DE TEMPERATURA Y DE MATERIALES

6.1 DETECCION AVANZADA DE TEMPERATURA

El objetivo del circuito de Detección Avanzada de Temperatura (ATD por sus siglas en ingles) es anticiparse, a la señal de la temperatura de los materiales, utilizando la variación de la temperatura de los gases, por tener ésta un menor tiempo de reacción con respecto a la temperatura de los materiales. Modificando los parámetros de funcionamiento para satisfacer la necesidades futuras del caldero.

Si se produce un cambio brusco de temperatura es necesario aumentar o disminuir la llama, según el sentido del cambio, para poder mantener posteriormente la temperatura de trabajo adecuada.

Se obtiene esta detección avanzada de la temperatura de los materiales, sensando mediante dos termocuplas, la temperatura de los gases de la chimenea, las termocuplas, poseen diferen-

cia inercia térmica, es decir la una posee muy poca masa, y la otra una masa mayor, permitiendo que en condición de estado estable entreguen igual voltaje en función de la temperatura, pero que su tiempo de respuesta transiente sea diferente. La de menor masa se calentará o enfriará por efecto de los gases circundantes mas rápidamente que la de masa mayor. Esto nos permite detectar cambios bruscos de temperatura.

6.2 DETECCION DE CAMBIOS BRUSCOS DE TEMPERATURA.

El tiempo de respuesta de una termocupla depende de la cantidad de calor que llega a ella, y de la masa de la misma.

Al blindar una termocupla, o sea introducirla dentro de un cilindro metálico, se incrementa su masa y se retarda su tiempo de respuesta.

La diferencia del tiempo de respuesta de las termocuplas nos permite obtener el gráfico de la figura # 6.2 el cual muestra el comportamiento de las termocuplas para incrementos y decrementos bruscos de temperatura.

Para detectar cambios repentinos de temperatura usamos la característica descrita anteriormente, el voltaje entregado

por cada termocoupla ingresa al circuito comparador IC2 de la figura 6.2.a el voltaje a la salida del amplificador operacional será función del cambio de temperatura ver figura 6.2.b Cuando se produce un incremento de temperatura la diferencia de voltaje será negativa, cuando la temperatura es estable no hay diferencia de voltaje y cuando se produce un decremento de temperatura la diferencia de voltaje sera positiva.

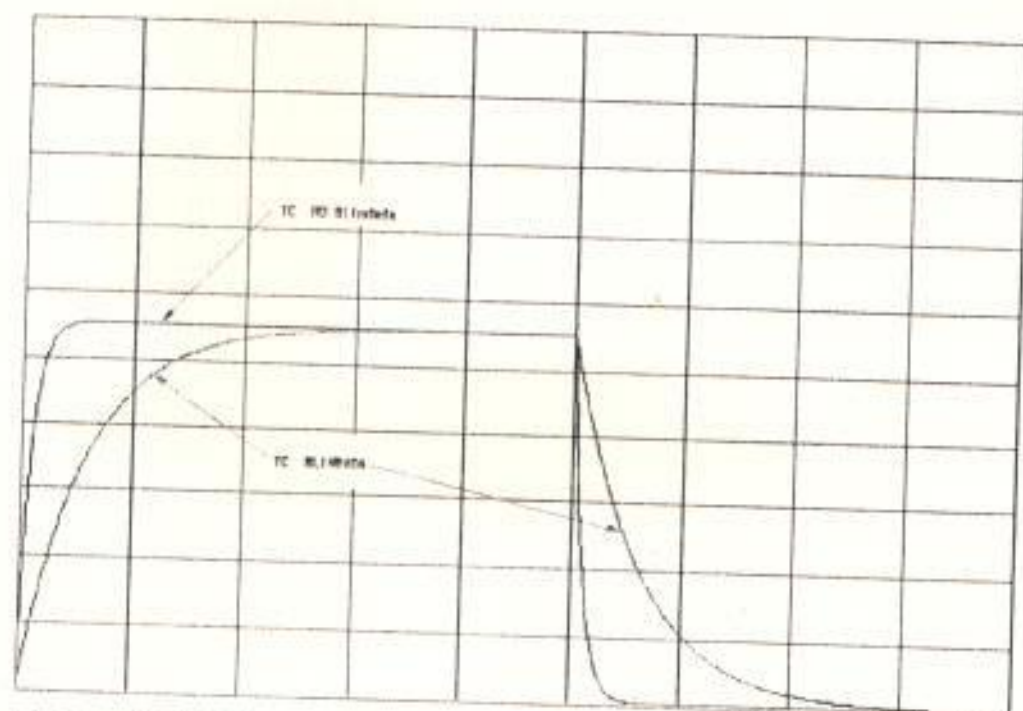


Figura # 6.2.1 Temperatura real de dos termocupias con diferente inercia térmica.

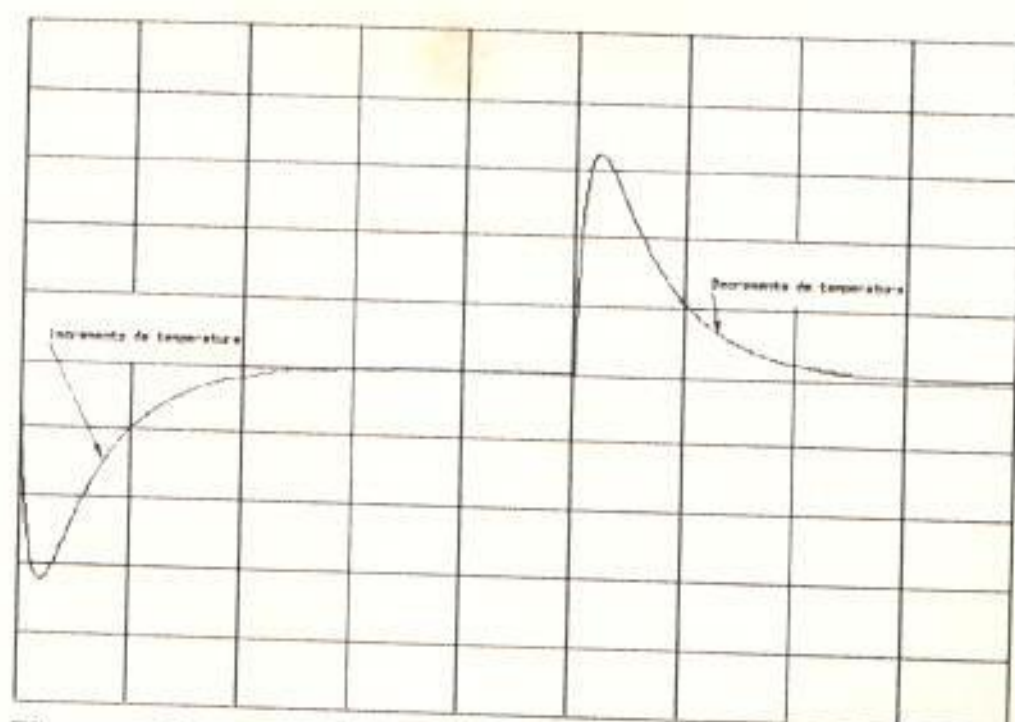


Figura # 6.2.2 Voltaje de salida del Opamp en función del cambio de temperatura.

6.3 DETECCION AVANZADA DE LOS MATERIALES

Cuando se detecta que la cantidad de material, que va a ingresar al tambor va a variar, se desea modificar la llama, así cuando el material ingrese al tambor las nuevas condiciones de trabajo permitirán mantener la temperatura correcta.

Los materiales ingresan al tambor através de una banda transportadora, en esta banda transportadora un par de metros antes del ingreso del material está ubicada una balanza la cual pesa el material y envía un voltaje DC al circuito ATD figura 6.4 terminal N° 5, este voltaje dc entregado por la balanza es proporcional al peso del material, usualmente la cantidad de material que ingresa al tambor es uniforme por lo tanto el voltaje DC entregado por la balanza es constante y se lo usa como voltaje de referencia, alaceniéndolo en el capacitor C3.

Cuando la cantidad de material varía el voltaje DC entregado por la balanza también varía y es comparado con el voltaje de referencia, por lo tanto en la salida del comparador (IC3 LM741) obtenemos un voltaje que es función del incremento o decremento del material (TP2).

Como se envia la señal de incrementar la temperatura antes que llegue el material es necesario hacer un cálculo correcto del tiempo que tarda el material en llegar al tambor y el tiempo que demora el alcanzar la temperatura requerida para que de esta manera los dos eventos ocurran al mismo tiempo. Si esto no ocurre se obtendrá una parte del material sobre o sub calentado.

Por lo tanto es necesario:

- a.- Aumentar la llama, cuando el material que ingresa va a aumentar, ó cuando la temperatura se ha incrementado.
- b.- Disminuir la llama, cuando el material que ingresa va a disminuir, ó cuando la temperatura ha decrecido.

6.4 ANALISIS DEL CIRCUITO DE DETECCION AVANZADA

El circuito de detección avanzada de temperatura (ATD) figura 6.4, funciona de la siguiente forma:

Los voltajes entregados por las termocuplas ingresan al operacional, pasando cada una por un filtro de paso bajo, para eliminar señales indeseables de 60Hz. El voltaje entregado por la termocupla sin blindar ingresa en el terminal N°

6, el entregado por la termocupla blindada ingresa en el terminal N° 7, en la salida del opamp IC2 (741) con una amplificación regulable entre 50 y 2200 veces, en el punto de prueba 3 (TP3) obtenemos el voltaje diferencial de la termocuplas amplificado.

El voltaje diferencial de las termocuplas, a su vez es sumado en IC1 con el voltaje que se obtiene a la salida del opamp IC3, el cual indica los cambios ocurridos en la cantidad de material que ingresa al tambor, el objetivo de estos dos voltajes es enviar una señal a la tarjeta de control para que esta la procese y como resultado abra o cierre la compuerta de modulación del caldero. A la salida o punto de prueba 4 obtenemos un voltaje el cual es positivo cuando se requiere aumentar la temperatura (abrir la compuerta) y es negativo cuando es necesario disminuir la temperatura (cerrar la compuerta) .

Cabe anotar que la señal de voltaje, terminal N° 21, que se envía a la tarjeta de control para cerrar o abrir la compuerta del caldero esta presente únicamente durante el tiempo necesario para alcanzar equilibrio. Cuando se haya alcanzado a las nuevas condiciones de trabajo el voltaje de salida será cero voltios, indicación de que no se necesita de modificaciones.

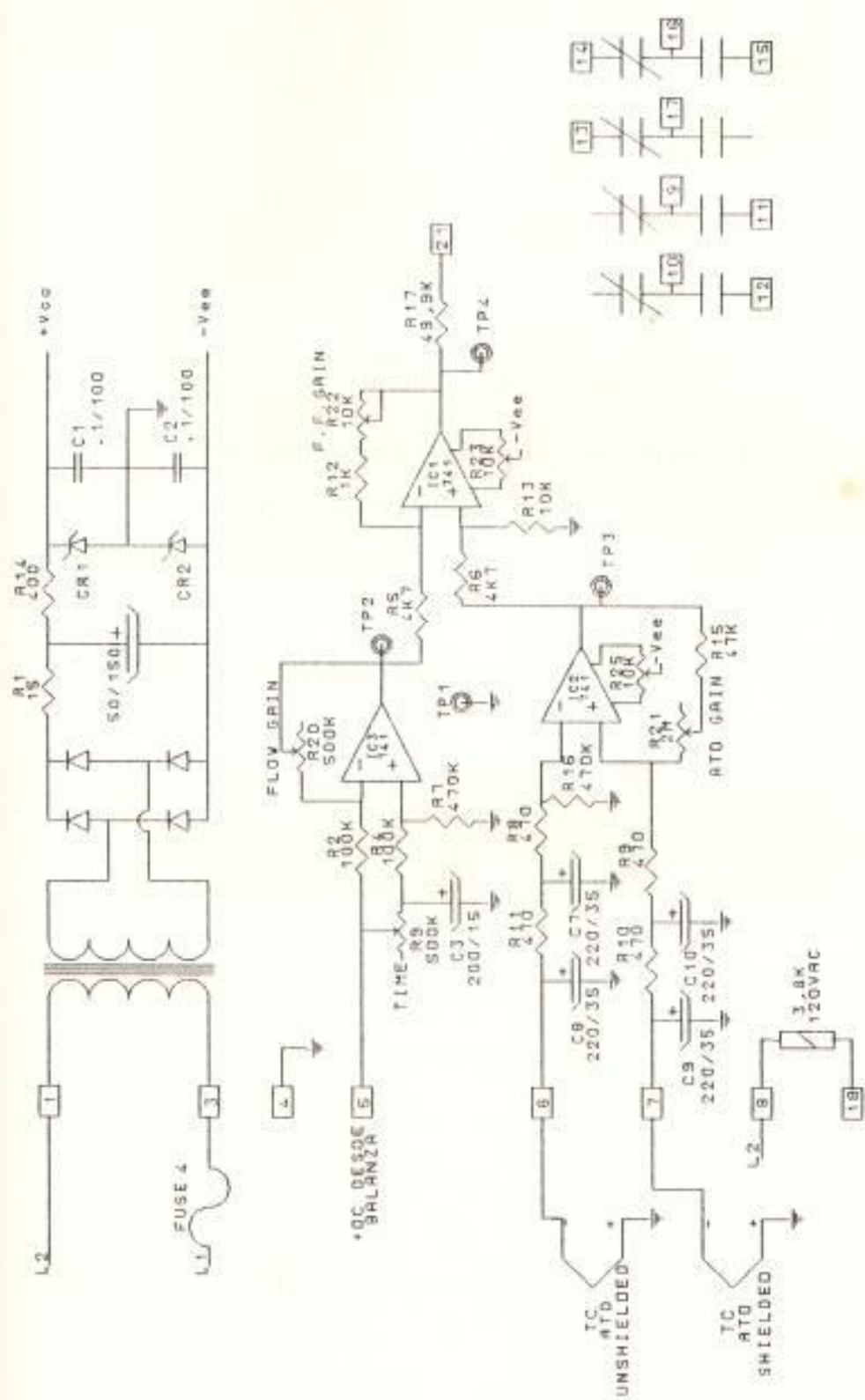


Figura # 6.4 DETECCION AVANZADA DE TEMP

CAPITULO VII

CIRCUITO DE AUTO-CONTROL

El objetivo de este circuito es controlar automáticamente la temperatura del caldero en función de los parámetros establecidos para su funcionamiento.

7.1 PRINCIPALES PARAMETROS REFERENCIALES

Los principales son:

- a.- El valor de temperatura fijada del agregado, y la temperatura real del mismo.
- b.- La cantidad de material que ingresa al tambor, y los cambios bruscos de material, y/o temperatura de los gases de la chimenea.
- c.- La posición de la compuerta del caldero.
- d.- Un control lineal proporcional a estos cambios.

- e.- Un control integral de temperatura, para permitir que el circuito electrónico, espere hasta la reacción del cambio de temperatura de los materiales.
- f.- Control derivativo de temperatura para mejor tiempo de respuesta del sistema.

7.2 DESCRIPCION DEL SISTEMA MECANICO DE CONTROL

El control de temperatura del caldero se lo hace, cerrando o abriendo la compuerta de entrada de aire, y desplazando el husillo de inyección de combustible, estos dos mecanismos, estan complementados con otros, tales como el control de la presión del combustible, la válvula de regulación de máximo caudal de aire, la presión del aire de inyección, la temperatura del combustible, la regulación de la válvula de retorno de combustible, y el poder calorífico del mismo. Este mecanismo se mueve, por acción de un motor de inducción jaula de ardilla de 1/4 HP, 120V 60 Hz, el cual puede girar en dos direcciones, mediante la inversión de devanado principal y de arranque, el mismo que desplaza su corriente mediante un capacitor. Este motor tiene engranajes para tener gran desmultiplicación de velocidad. Rotando en el mismo eje hay un potenciómetro de posicionamiento. Y dos fines de carrera, a fin de evitar sobre-posicionamiento. Este sistema, puede accionarse manualmente, durante el proceso de control de

combustión. Los ajustes manuales previos a la operación automática, buscan obtener:

- a) Suficiente pero no excesivo combustible - aire en la posición "cerrada".
- b) Óptima relación, en la posición normal de trabajo, esto es cerca del punto más común de operación.
- c) Máxima capacidad de generación de calor en la posición totalmente abierta.

La compuerta es abierta hasta la posición de arranque establecida y en estas condiciones el caldero eleva la temperatura, hasta la temperatura de cambio, en la cual el sistema automático de control de temperatura toma el mando, Ver figura 7.2 circuito electrónico que permite el posicionamiento de la compuerta hasta la condición de arranque.

7.3 INTERFASE DEL CONTROL ELECTRONICO AL MOTOR

El motor, como ya se especificó, es de inducción y funciona con 120V/60Hz. Como el control electrónico nos suministra un voltaje DC de pequeña magnitud, utilizamos dos relés electrónicos de estado sólido, General Electric S228, lo que nos da excelente aislación galvánica y protección, para nuestro circuito de control. Un relé se energiza con voltaje positivo, e incrementa la apertura de las compuertas, el otro se energiza con voltaje negativo, y cierra las compuertas. ver figura 7.3

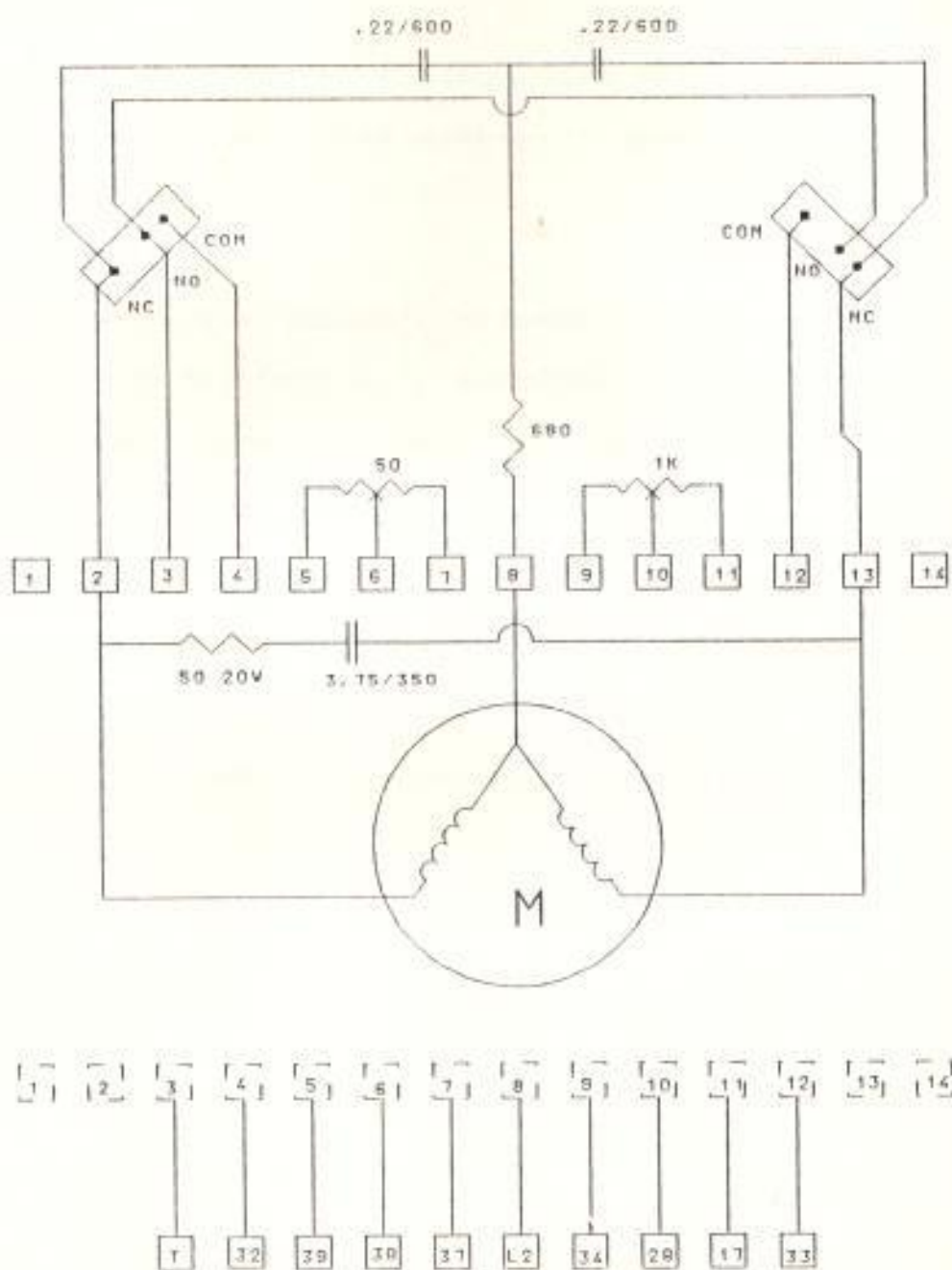


Figura # 7.3 Alambrado motor de MODULACION

7.4 DESCRIPCION DEL SISTEMA ELECTRONICO DE CONTROL

Este circuito figuras 7.4 utiliza, tres modelos de control automático de temperatura estos son : Banda Proporcional, Integral, y Derivativo.

La temperatura del agregado, es comparada con la temperatura establecida de referencia y, dependiendo, de la diferencia que exista ya sea esta positiva o negativa se abrirá o cerrará la compuerta del caldero.

A medida que el motor mueva el potenciómetro de posicionamiento, este enviará una señal de retroalimentación en este caso, un voltaje (negativo) proporcional a la apertura de la compuerta el cual ingresará al sistema de control.

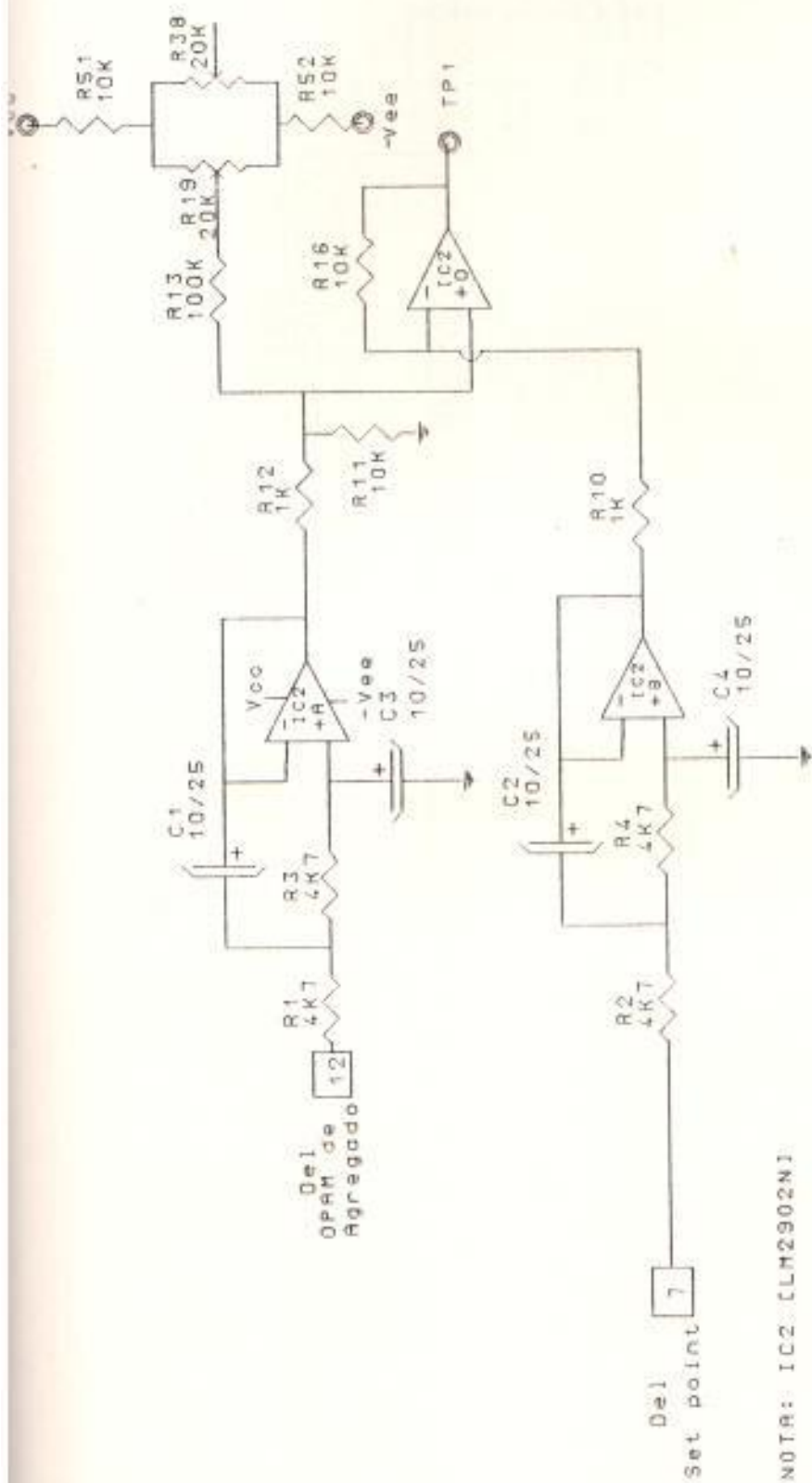


Figura # 7.4 CONTROL AUTOMATICO (1/2)

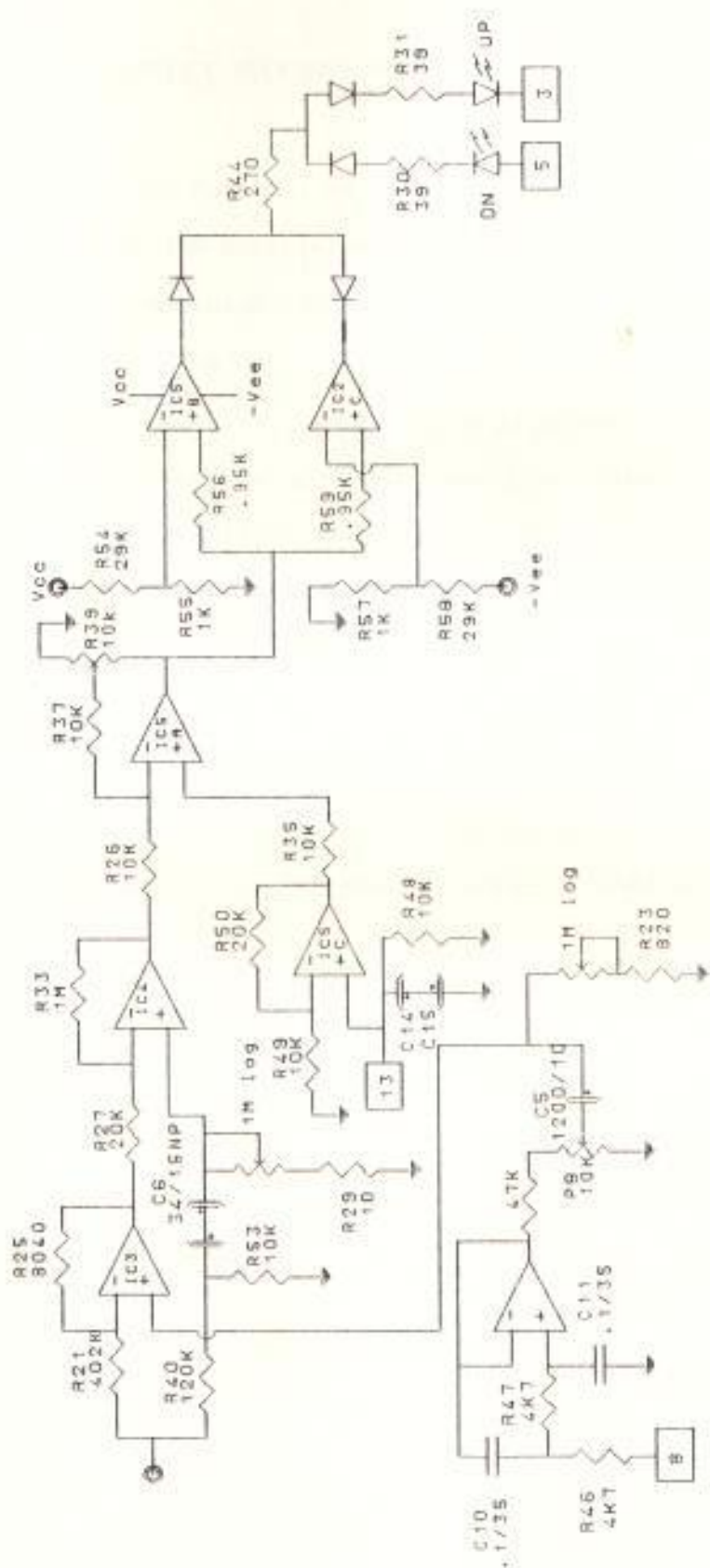


Figura # 7.4 CONTROL AUTOMATICO (2/2)

7.4.1 CONTROL PROPORCIONAL

Este control, se obtiene por la comparación de los voltajes de los materiales, y el de la temperatura deseada. Si la temperatura de los materiales, es inferior a la deseada, se obtiene un voltaje positivo a la salida del circuito de la figura 7.4, en el punto de prueba TP1, en el caso inverso se obtiene un voltaje negativo. Este voltaje (TP1), después de amplificarlo, es procesado por un comparador de ventana, el cual da un voltaje positivo si $TP1 > 0.5$ voltios, da un voltaje negativo si $TP1 < 0.5$ voltios, y da cero voltios si TP1 esta entre estos dos límites. Ver figura 7.4.1 que muestra las características de la ventana. La salida, controla los dos relés de estado sólido, para abrir, cerrar, o no actuar el motor de modulación de compuerta.

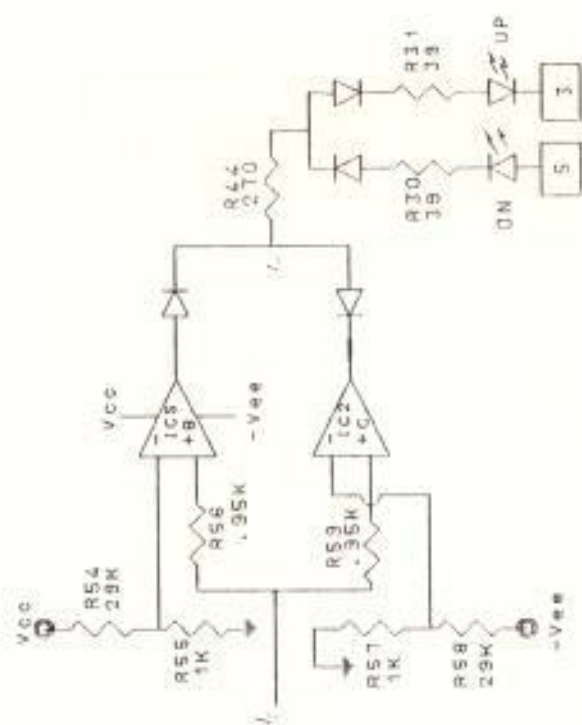
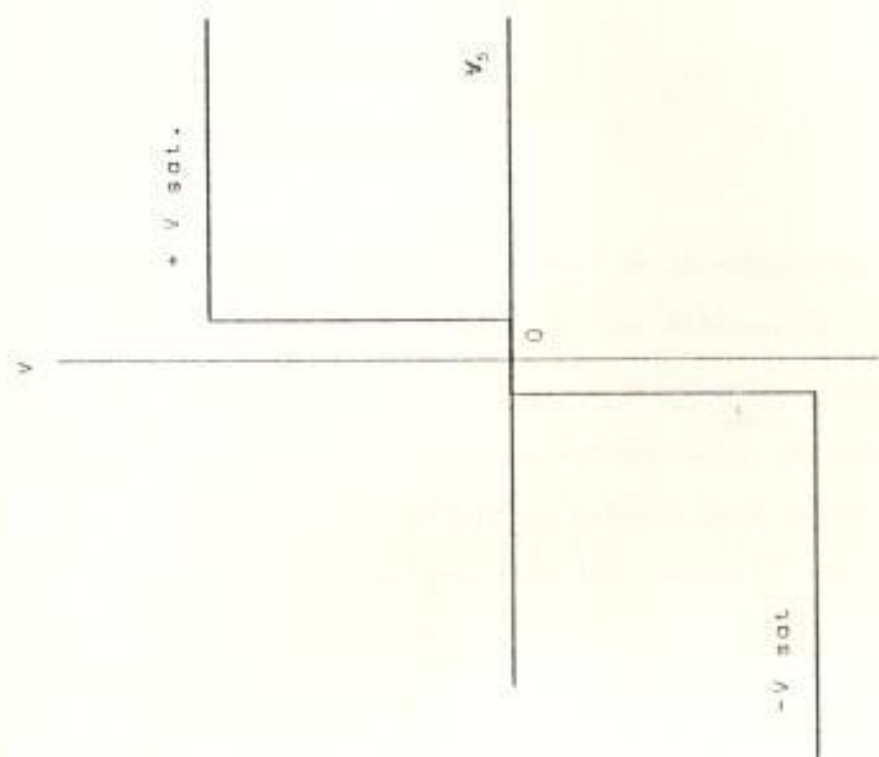


Figura # 7.4.1.1 COMPARADOR DE VENTANA

CIRCUITO Y FUNCION DE TRANSFERENCIA

7.4.2 CONTROL INTEGRAL

Es mejor si, el movimiento de la compuerta, se lo hace en pasos proporcionales a la diferencia de temperatura existente, es decir a mayor diferencia de temperatura, mayor el movimiento, ya sea ascendente o descendente. En esta forma se le da tiempo al caldero para reaccionar, ajustando el tiempo de reacción del control electrónico, al del calentamiento de los materiales, que como es natural toma algunos minutos para llegar a su valor de estado estable.

Funciona de la siguiente forma: Al moverse el motor de compuerta, la señal proporcional a la rotación, producida en el potenciómetro de posicionamiento, ingresa mediante un filtro pasa bajo a un seguidor unitario, se toma una fracción de esta señal, la misma que es almacenada (integrada) en un capacitor. Esta carga acumulada en este capacitor, impide el movimiento de la compuerta, hasta que la misma sea disipada después de 4 ó 5 constantes de tiempo cuando podrá moverse otra vez el motor de la compuerta. La magnitud de P/B fija el paso incremental, y la constante de tiempo, fija el período de reposo. Ver figura 7.4.2.

Entre paso y paso debe existir un tiempo de espera que sirve para permitir que la temperatura del agregado llegue a la temperatura establecida de referencia, si esto no ocurre se

procede a dar otro paso y así sucesivamente hasta que las temperaturas sean iguales, el control "Reset" permite ajustar este tiempo de espera.

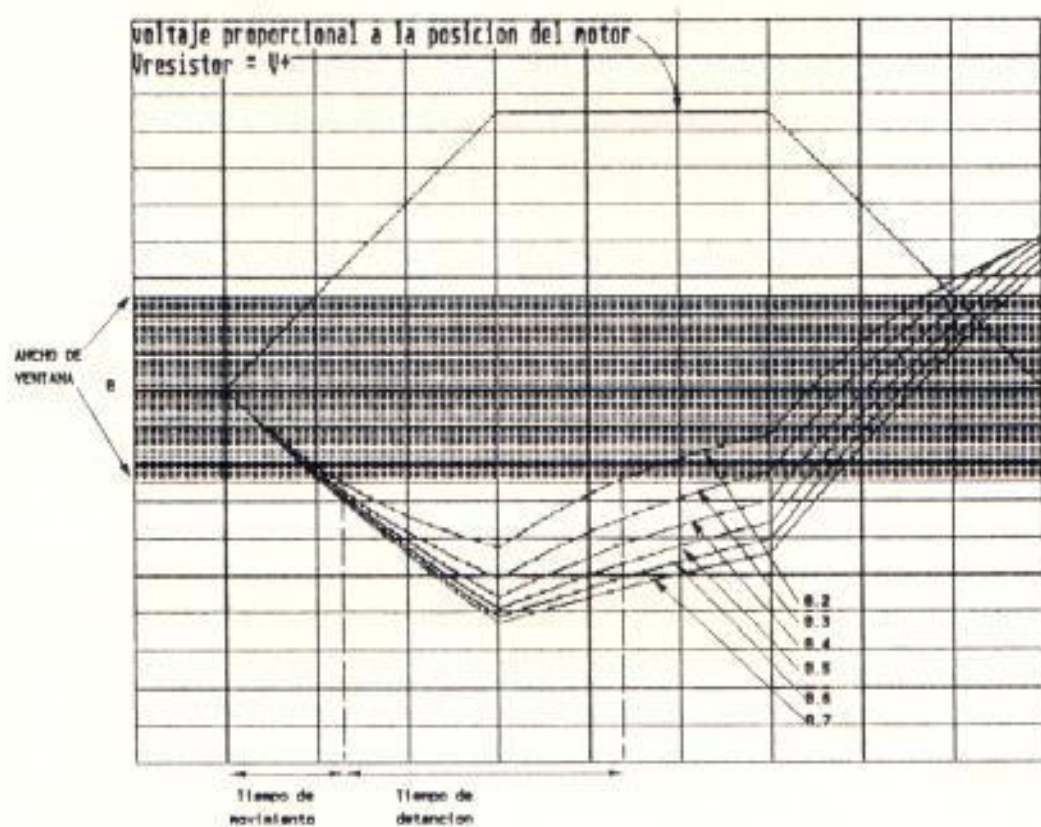


Figura # 7.4.1 CURVAS DE RESPUESTA DEL CONTROL PROPORCIONAL
 ($P/B = 0.8$, $\tau_2 = 0.2 + 0.7$)

7.4.3 CONTROL DIFERENCIAL

El objetivo de este tipo de control, es incrementar la sensibilidad del sistema, a cambios bruscos de voltaje, ya sea por exceso o defecto de temperatura. A fin de conseguir este funcionamiento, al voltaje obtenido en TPI, se le incrementa en magnitud, en forma proporcional a la rapidez de cambio del voltaje TPI, obteniéndose así un tiempo de respuesta menor. La magnitud de este volaje adicional, y el tiempo de duración del mismo, quedan fijados por una constante de tiempo dada por un capacitor y la resistencia de carga "RATE", como puede observarse en la figura 7.4.3 donde se observa el comportamiento del circuito para varias posiciones de este potenciómetro.

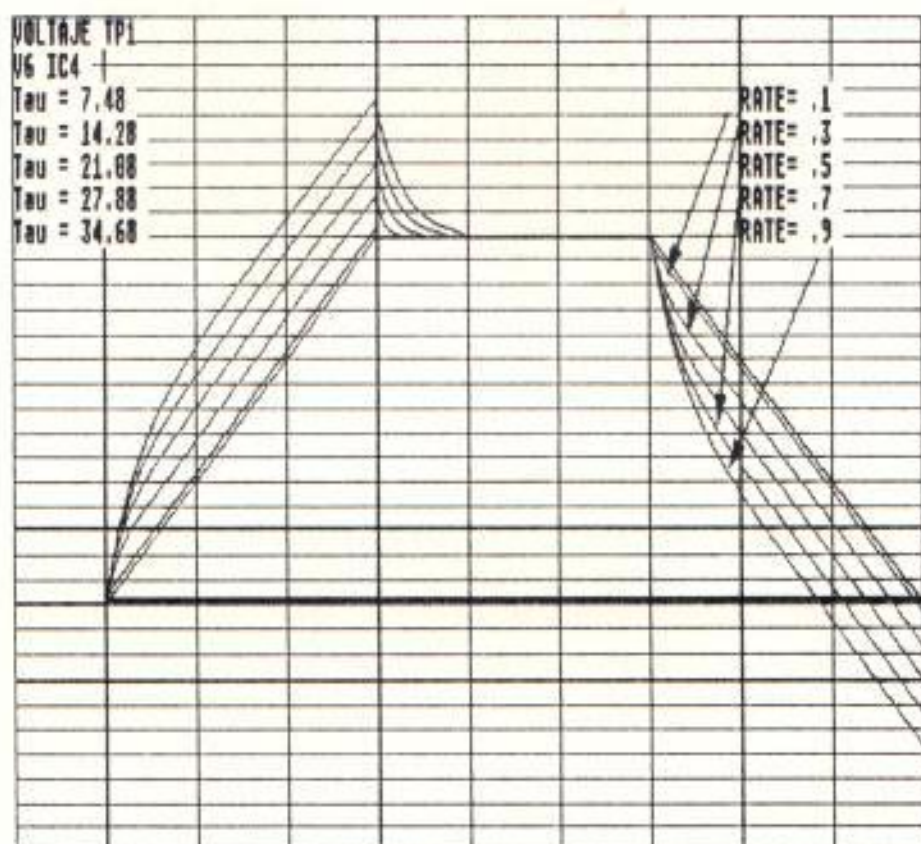


Figura # 7.4.3 CONTROL DERIVATIVO, EN FUNCION DE LA MAGNITUD TAU1 RC

7.4.4 CONTROL ADELANTADO DE TEMPERATURA Y MATERIALES

Además de controlar la temperatura, el sistema automático debe estar alerta a cambios en la cantidad de material que ingresa al secador, y también a cambios bruscos de temperatura, esto se lo realiza utilizando la señal que envía la tarjeta ATD, si esta señal es un voltaje positivo la compuerta debe abrirse, si es negativo la compuerta debe cerrarse. Este voltaje, estará presente únicamente, mientras sea necesaria la modificación para la condición futura.

No se desea que el motor que mueve la compuerta, pueda ser accionado, cuando exista una leve diferencia de temperatura, por esto usamos un circuito comparador de ventana, que permite tener un rango en el cual el voltaje de salida es cero y así no se mueve el motor a pesar de existir alguna diferencia de temperatura.

7.5 ANALISIS DEL CIRCUITO DE AUTO CONTROL

El circuito esquemático, se observa en la figuras 7.4

Las entradas 6 y 12, corresponden respectivamente, a la temperatura real del agregado y a la temperatura de referencia establecida, estas dos señales son comparadas entre si y el resultado lo tenemos en el punto de prueba 1

(TP1) , si el voltaje es positivo significa que la temperatura del agregado es mayor que la temperatura de referencia. Al hacer un análisis de los amplificadores que comparan las dos señales, se obtiene el siguiente voltaje en el punto de prueba 1:

$$TP1 = 11 \times 0.909090(\text{voltaje en [12]}) - 10(\text{Voltaje en [6]})$$

$$TP1 = (-10)(V[12]) - 10(V[6])$$

El primer OPAMP, es un filtro pasa bajo de ganancia unitaria, a estos se adiciona mediante el sumador de salida, un voltaje de compensacion, por desbalances de los operacionales, de suerte que se tenga cero voltios de salida cuando las entradas [12], y [6] esten a tierra, mediante el ajuste de R19.

El voltaje en TP1 alimenta el circuito integrado IC3, en la entrada inversora, con una amplificación de:

$$Av3 = -(8040/402k) = -0.02$$

esta salida alimenta IC4 con una amplificación de:

$$Av4 = - 1 \times 10^6 / 20k = -50$$

luego en la salida de IC4 el voltaje es igual a

$$(-.02)(-50) = 1$$

El voltaje del terminal 6 de IC4 = TP1

El mismo voltaje de Entrada TP1, através del atenuador formado por los resistores R40 y R53, y el capacitor NO polarizado C6, conjuntamente con el potenciómetro "RATE", alimentan la entrada no inversora de IC4, donde este voltaje es amplificado $50+1 = 51$ veces. Este circuito, tiene una constante de tiempo :

$$T_{a1} = (9.23k + Rate * 1 \times 10^6) \times 34 \mu F$$

Ver figura 7.4.3

Toda variación de voltaje en TP1 con una duración menor a T_{a1} , será amplificada (control derivativo)

$$10 / (120 + 10) \times 51 = 3.92 \text{ veces}$$

y será sumada, al voltaje TP1 en el terminal 6 de IC4. En el terminal N°8 entra la señal negativa, del control de posición, pasa por un filtro pasa bajo de 10 Hz, y, la salida del seguidor unitario alimenta un divisor de voltaje, y el potenciómetro de banda proporcional P/B, obteniéndose así un

voltaje entre cero y 17.5% del de posición, es decir, que el voltaje en el cursor de P/B será:

$$-15 \times 0.175 = -2.63 \text{ voltios al } 100\% \text{ de apertura}$$

$$V_{\text{cursor}} = (P\%) \times (P/B) (-2.6316) \text{ voltios}$$

donde: P% es el porcentaje de apertura del modulador.

P/B es el porcentaje del potenciómetro.

El voltaje del cursor en el circuito formado por C5 (1200uF) y la resistencia del potenciómetro "Reset" de 1.000.000 ohmios logarítmico, genera un voltaje en la entrada no inversora de IC3, durante un tiempo controlado por la constante de tiempo $\tau = (R_{\text{Reset}} + 4.53k)(1200 \mu F)$ o sea entre 5.436 y 1200 segundos. Este voltaje es amplificado 1.02 veces por IC3, y luego -50 veces por IC4, obteniéndose así un voltaje en la salida de IC4 de

$$V_{\text{cursor}} = (P\%) \times (P/B) (15 \times 10k / (10k + 47k)) \text{ voltios}$$

$$V_{\text{cursor}} = (P\%) (P/B) (2.6216) \text{ voltios}$$

donde P% es el porcentaje de apertura del modulador.

P/B es el porcentaje del potenciómetro.

$$V_o \text{ IC4} = (P\%) (P/B) (2.6216) (1.02) (-50)$$

$$V_o \text{ IC4} = -133.7 (P\%) (P/B)$$

Es decir que un incremento rápido de la posición del

modulador, por ejemplo un 5% para un $P/B = 1$ producirá un voltaje en la salida de IC4, de -6.65 voltios, que durará un tiempo proporcional a τ^2 . Como podemos ver, este voltaje negativo impedirá que continúe incrementándose, razón por la cual este se detiene, durante un lapso de tiempo hasta que esta magnitud haya descendido hasta la magnitud del voltaje TPI, que como es obvio, fue la causa fundamental del incremento inicial rápido de la posición del modulador. Así, este proporcional integral, permitirá el ulterior incremento.

CAPITULO VIII

MONITORES DE PRESION, VACIO, LLAMA, LUBRICACION

CIRCUITO ELECTRICO

8.1 MONITOR DE LLAMA

El detector de llama posee una respuesta suficientemente rápida para prevenir accidentes, además está construido con un retardo de pocos segundos para evitar el apagado del proceso, en caso de que la llama este centellando o que haya un esparcimiento de humo.

El detector de llama es sensible a una distante radiación ultravioleta, haciendo que de esta manera la luz incandescente y blanca de los ladrillos refractarios no cause una activación errónea.

La señal del sensor de luz ultravioleta, por medio de conductores recubiertos de teflón para altas temperatura, es llevada hasta un control de estado sólido, el mismo que está recubierto de una goma de silicon, haciendo que este

control sea más resistente, prolongando así su vida útil, sin embargo el sensor de luz ultravioleta tiene aproximadamente una duración promedio de 5000 horas de trabajo.

ESPECIFICACIONES ELECTRICAS

Entrada: 115 V 60 Hz.

Temperatura ambiente máxima: 160 °F.

8.2 MONITOR DE PRESION Y VACIO

El interruptor de presión que se emplea es de presión diferencial, cuyo funcionamiento consiste en el movimiento de un diafragma que actúa en polo simple o doble para mover un interruptor de resorte.

El movimiento del diafragma está restringido por por la calibración de un resorte el mismo que es ajustado para la presión diferencial que se desea, logrando de esta forma que un micro/interruptor eléctrico cambie su posición. El movimiento del diafragma es transmitido directamente al interruptor por medio de un acoplamiento mecánico.

ESPECIFICACIONES

Temperatura límite: -30 a 180 °F para aire seco o gas.

Presión máxima: 25 Psig.

Presion de trabajo : 5 psig.

Rango electrico : 15 A, 110-120 V, 60 Hz.

8.3 MONITOR DE LUBRICACION

Es similar a los anteriores, pues tambien esta constituido por un diafragma coarrugado metalico, el cual se deflecta bajo la presion normal del aceite de trabajo, de 60 PSI.

8.4 FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO ELECTRICO

El sistema de ventilación consiste de dos ventiladores grandes, el uno esta en la parte posterior del tambor el cual sopla los gases y el otro ubicado en la parten anterior del tambor el cual extrae los gases, el funcionamiento de estos ventiladores produce una variación de presión que acciona dos interruptores de presión.

El encendido de los ventiladores se lo hace de forma manual por el operario de la planta y es independiente del sistema de control del caldero. El circuito de control eléctrico trabaja de la siguiente forma:

Cuando el interruptor de presión del extractor cierra se energiza el contactor EXH y esto hace que se cierre un contacto EXH que permite que la luz indicadora del extractor se encienda.

De igual manera, cuando el interruptor del ventilador se cierra, se energiza el contactor BLR y hace que se cierre el contacto BLR, que permite que la luz indicadora del ventilador se encienda.

Otro contacto, EXH es cerrado cuando el interruptor del extractor se energiza, permitiendo a través de este y otros contactos RF y TD2 normalmente cerrados que el contactor TD1 con retardo de tiempo de 30 segundos se energice, estos 30 segundos es el tiempo que dura el ciclo de purga.

Cuando el ciclo de purga ha concluido se energiza TD1 el cual cierra el contacto TD1 que energiza la luz indicadora del listo "R", en este momento se puede dar inicio al encendido del caldero.

Para encender el caldero se presiona la botonera de arranque la cual, cierra el circuito de Guarda "homing" que energiza, el contactor principal "RL", el transformador de encendido, la válvula piloto de gas y TD2 que tiene un retardo de tiempo de 15 segundos.

Si al pasar 15 segundos no se detecta llama el contactor RF permanece abierto y por lo tanto el contactor RL no se enclava, no se abre la válvula del combustible, no se enciende la luz de llama baja y el contactor TDI se desenergiza, ocasionando que el sistema vuelva a la condición de pre purga. Ver figura 8.1 para el circuito de alambrado del caldero y los enclavamientos.

Si antes de pasar 15 segundos se detecta llama se cierra el contacto del detector de luz ultravioleta se energiza el contactor RF y el contactor RL se enclava a través del contacto normalmente abierto RF y del contacto normalmente abierto RL, a la vez la luz indicadora de llama baja "LF" se enciende y se abre la válvula del combustible.

Una vez que la luz de fuego bajo se ha encendido, se mueve manualmente el interruptor "BURNER FIRE", desde la posición de fuego bajo, a la posición de fuego principal, esto hace que la luz indicadora de fuego alto se encienda, y también que el contactor CR1 se energice, esto ocurre mientras permanescan cerrados los contactos K2 del "STACK", que indica que la temperatura de los gases, esta debajo de la temperatura límite de los gases, y K3 del circuito "RECORD Y LIMIT" que indica que la temperatura del agregado es inferior a la temperatura límite del agregado.

A través de los contactos K1 del "STACK", y CR2 normalmente cerrados, se energiza el motor que abrirá la compuerta. El contacto K1 se abre cuando la compuerta llega a la posición de ARRANQUE, fijada previamente y el contacto CR2 se abre cuando el sistema funciona automáticamente.

El control no entra en automático, mientras no se alcance la temperatura de cambio, de modo que, pase a modo automático, es el contacto K4 del circuito "RECORD Y LIMIT", el que permaneciera abierto, hasta que se alcance la temperatura de cambio deseada.

Cuando K4 se cierre y el interruptor del control del caldero, este en automático, se energiza el contactor CR2 y este se enclava, permitiendo que el circuito de AUTO CONTROL tome el control del sistema.

Si la temperatura de cambio, se logra antes que la compuerta llegue a la posición de ARRANQUE, el contacto CR2 normalmente cerrado se abre, asegurando que el control sea efectuado por el sistema automático.

Para apagar el caldero, se presiona la botonera de PARE esto causa que el contactor principal RL, se desenergice y por lo tanto todo el sistema se apague.

CAPITULO IX

RESULTADOS EXPERIMENTALES

ANTECEDENTES:

Los diagramas esquematicos de los circuitos electrónicos, no existían y aún una visita personal, del Superintendente de Mantenimiento, a la fabrica "GENERAL COMBUSTION CORPORATION" (GENCO), en Orlando Florida EE.UU., no fueron fructiferos. Por esta razón el primer paso fué la obtención de diagramas, desde las tarjetas electrónicas del caldero.

PROCEDIMIENTOS:

Despues de mucho bregar, e intentos frustrados, dada la complicada estructura de los mismos, a veces con circuitos impresos de doble lado, opacos, y recubiertos con barnices, experimentalmente se encontro un metodo, que facilito grandemente el trabajo. Este consiste en la remocion posible de los barnices, utilizando diluyentes calientes, luego de lo cual se obtuvieron fotocopias de ambos lados de las tarjetas, las mismas, que mediante marcadores de tinta indeleble, aplicada a las pistas de las fotocopias, nos dan el reverso.

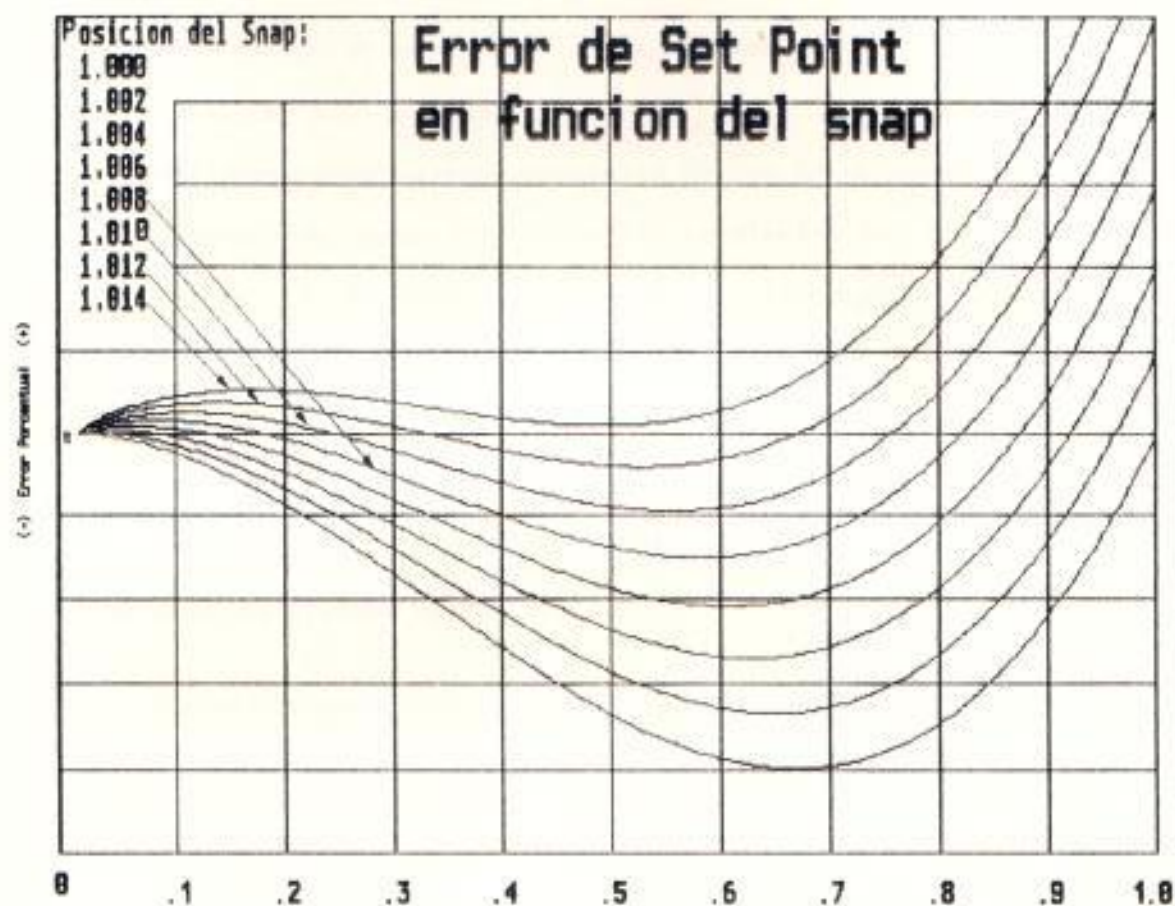
En un papel transparente, superpuesto a la imagen inversa, se dibujaron los componentes, procediendo entonces a obtener los circuitos. Como es natural, a veces existían errores en los circuitos electrónicos obtenidos. Estos errores se detectaban, cuando al analizar el circuito, este no cumplía una función lógica. En cuyo caso se procedía a la corrección de los mismos.

Con el circuito obtenido y analizado, se pasaba a la verificación experimental de su funcionamiento. Cada circuito fue verificado experimentalmente, algunos de ellos, trabajaban marginalmente, es decir solo bajo condiciones muy críticas de ajuste, en cuyo caso se rediseñaron y contruyeron, hasta obtener un buen funcionamiento.

RESULTADOS

El sistema completo, con algunas de las tarjetas originales del equipo, con otras modificadas, y con otras construidas, fue armado como prototipo, se realizaron ajustes, cambios, y verificaciones, hasta que se obtuvo un funcionamiento correcto.

Este sistema completo es el que se presenta en esta tesis, con todos los circuitos esquemáticos ya modificados. A modo de ejemplo de los trabajos realizados, presento, el análisis de error, producido en un potenciómetro "Set Point", para varias posiciones del resistor de carga "Snap", como se ve en la figura N°9.1



Error en funcion del 'Set Point' para varias posiciones del 'snap'

Figura # 9.1 ERROR POR CARGA "SNAP"

EN POTENCIOMETRO "SET POINT"

Errores como el anterior fueron corregidos, (ver figura 7.5.1) donde el error se redujo a cero, mediante el utilizar la entrada no inversora del seguidor unitario, con impedancia casi infinita.

El sistema ha sido probado en forma experimental, se espera que en poco tiempo se pueda hacerlo funcionar en la industria, y poder evaluar sus bondades.

Se realizaron pruebas experimentales de las termocuplas tipo "K", sumergiendo en agua con hielo los terminales de la junta de referencia, y a 100°C la junta de la termocupla, el voltaje medido con un multímetro Fluke 87, fue de 4.02 milivoltios, lo que nos da una constante $K_k = 40.2 \text{ uV}/^{\circ}\text{C} = 22.33 \text{ uV}/^{\circ}\text{F}$, valor cercano al suministrado por las tablas experimentales de laboratorios "GORDON COMPANY" en los EE.UU. Ver anexo "A", con un valor de $22.5889 \text{ uV}/^{\circ}\text{F}$.

En las mediciones de los amplificadores compensados de junta fría, hay un error experimental de 2°F , posiblemente por utilizar para los resistores alambre de cobre comercial.

En las figuras 9.2, 9.3, 9.4, y 9.5 se presentan fotografías del trabajo realizado, en tarjetas individuales, y del conjunto completo. Es visible el modulador, simulado mediante un motor de inducción reversible con gran desmultiplicación, con puntero indicador de posición, e interruptores límites de carrera.

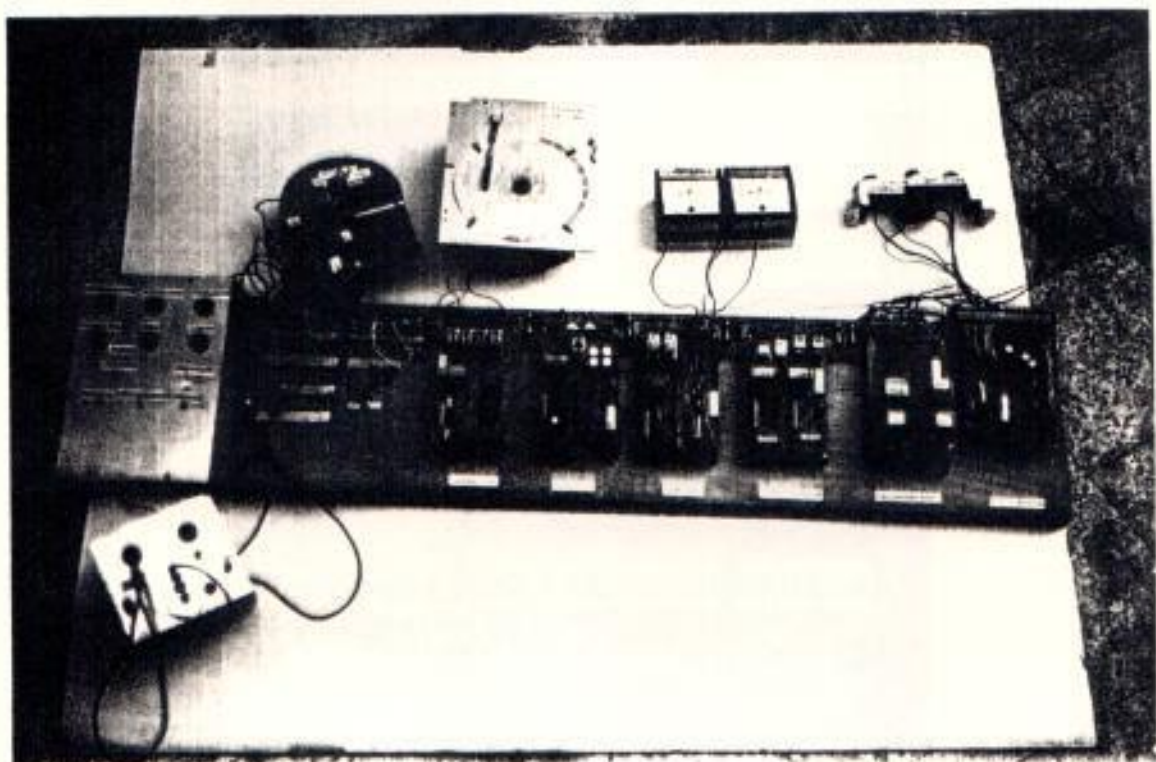


Figura # 9.2 Sistema de control completo

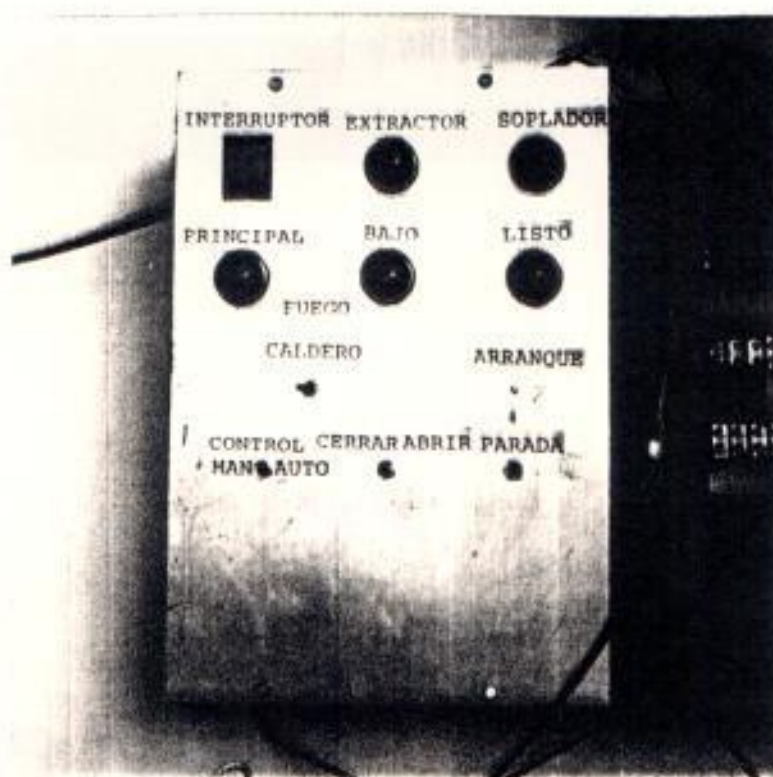


Figura # 9.3 Panel de control



Figura # 9.4 Panel de control en prueba

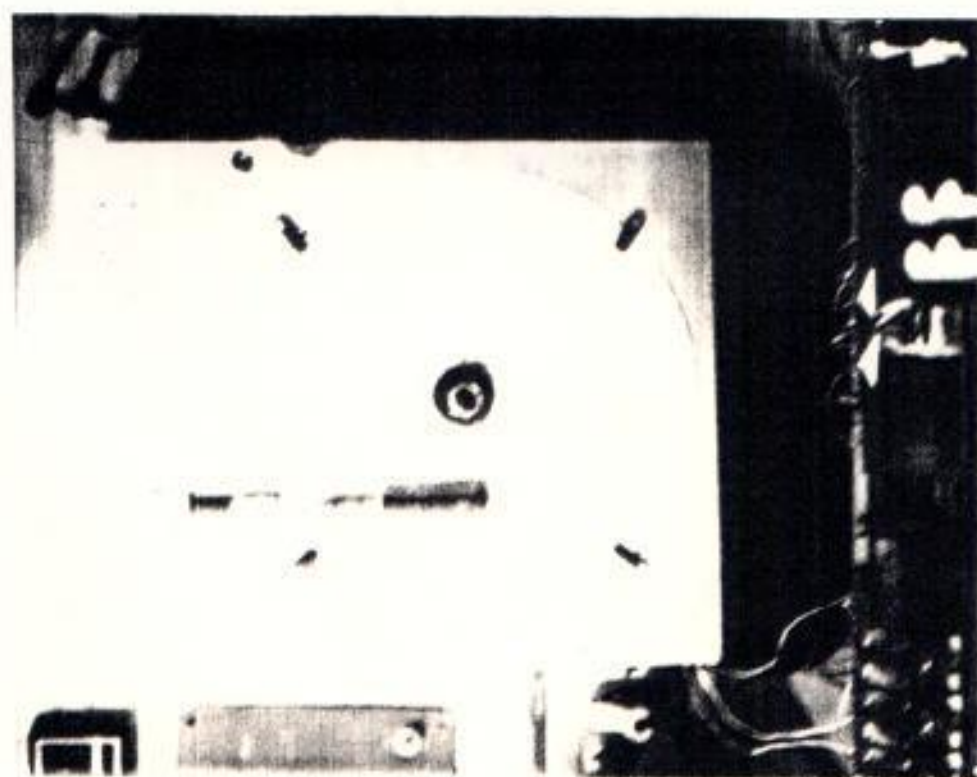


Figura # 9.5 Grabador Circular

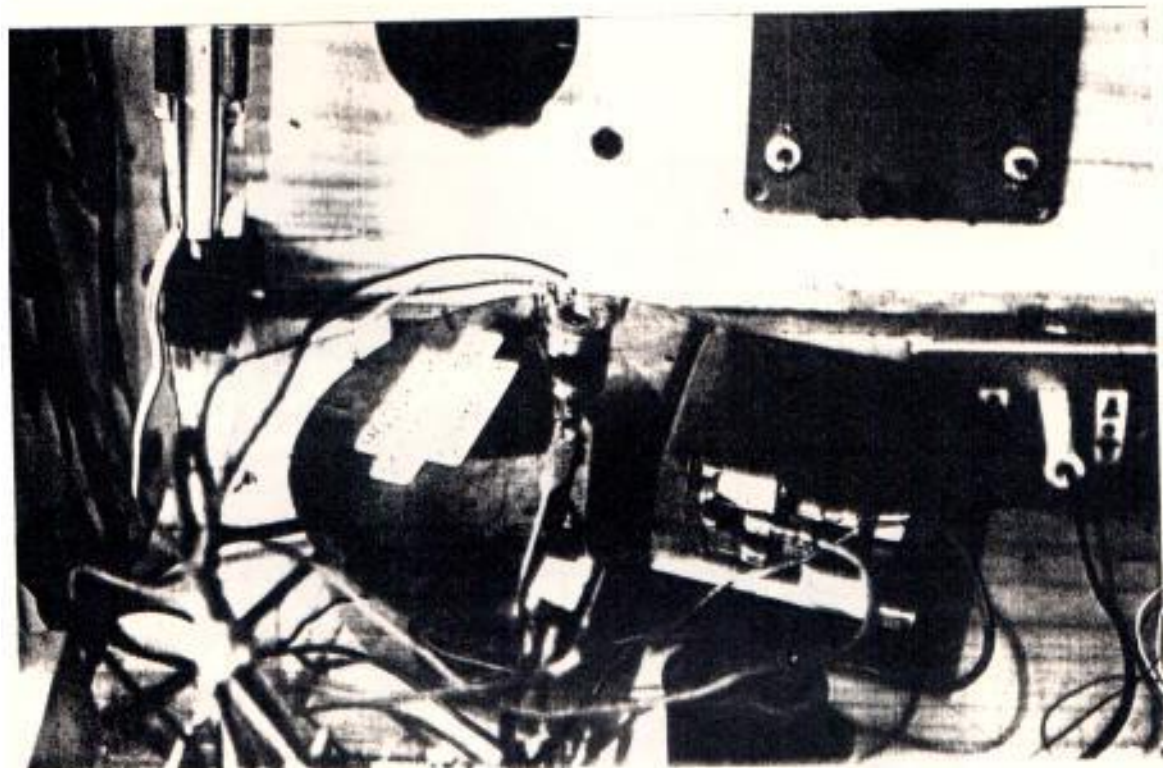


Figura # 9.6 Motor de posición del quemador

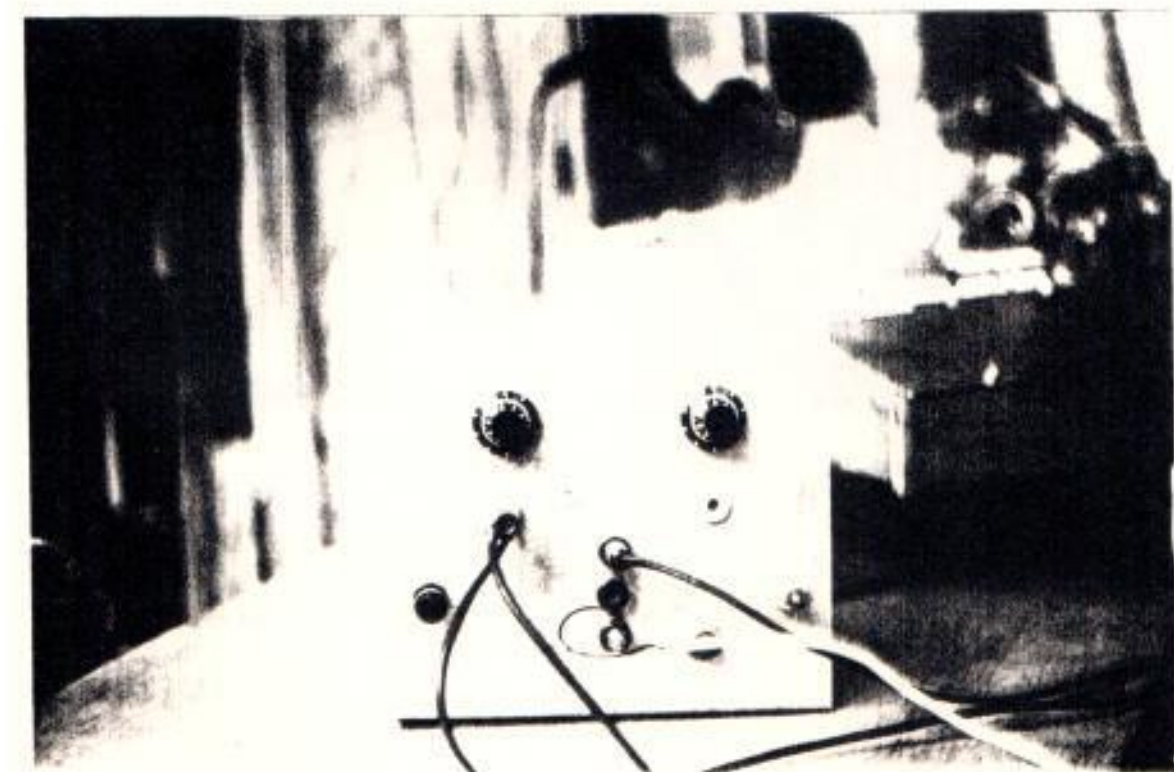


Figura # 9.7 Simulador de señales



Figura # 9.8 Sistema de control en el banco de prueba

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Los equipos industriales, y electrónicos en general, pueden ser reconstruidos, modificados, y mejorados con respecto a los diseños realizados en el exterior.
2. La falta de circuitos esquemáticos, que limita el servicio y mantenimiento, en nuestro país, es solucionable, aunque requiere de mucho tiempo y esfuerzo.
3. La experiencia que deja dicho trabajo, de diseño y análisis conjuntamente, con la simulación en prototipo o computadora, deja una agradable experiencia, que puede abrir nuevas fuentes de trabajo.
4. La sub ocupación profesional, y las bajas remuneraciones pueden ser empleadas, en beneficio de las mayorías Ecuatorianas, optimizando los productos, y reduciendo los costos de producción, como se ha analizado en esta tesis.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar el modelo final en tarjetas de circuito impreso mas grandes, ubicando mas puntos de prueba, y elaborar un manual de calibración y verificación de este sistema.
2. Debería estudiarse, el problema de la contaminación ambiental, producida por la combustión que conlleva el proceso.
3. El intercambio de información, como la de la presente tesis, con otras a nivel de Facultad o inter facultad, debería ser impulsada, como medio de difusión técnica.

B I B L I O G R A F I A

1. BELL DAVID ,Solid State Pulse Circuits, Prencis-Hall.
2. CHAPMAN, A. Heat Transfer, The Macmillan Company/Collier-Macmillan Limited, London,1970.
3. GENERAL COMBUSTION CORPORATION, Gencontrol II, Orlando Florida,USA
4. INDUSTRIAL INSTRUMENTS DIVISION, Barber Colman Company.
5. IOWA MANUFACTURING COMPANY, Cedarapids Manual 1988.
6. MORING FAIRES, V. Thermodynamics of Heat Power, The Macmillan Company ,New York. 1962.
7. NINCI, M. Termotecnica, Editorial Assandri, 1959.
8. SMITH, J. Modern Operacional Circuit Design, Wiley & Sons, Inc.New York, 1971.
10. TEMPERATURE MEASUREMENT, Gordon Company.
11. TOBEY-GRAEME-HUELSMAN. Operational Amplifiers Design and Aplications,Magraw-Hill Kogakusha, Tokyo Japan 1971.

APENDICE

TEORIA DE TERMOCUPLAS

TERMOCUPLAS

La termocupla es el método mas común para medir temperatura por efectos eléctricos. Al juntarse dos metales diferentes, se produce una fuerza electromotriz entre los puntos A y B, la misma que es función de la temperatura de la junta; este fenómeno se conoce como efecto SEEBECK.

Si los dos materiales se conectan a un circuito externo, de manera que circule corriente, la fuerza electromotriz puede alterarse ligeramente debido al efecto de PELTIER.

Además, si existe un gradiente de temperatura en uno o en ambos materiales, la fem puede tener otra ligera alteración debido al efecto THOMPSON.

La mayor dificultad para medir la fem producida por el efecto SEEBECK, que es la principal, se presenta al colocar un instrumento de medición pues se generará otra fem en estas uniones que dependerá de la temperatura de estas juntas.

Para analizar los circuitos termoeléctricos tendremos en cuenta que:

Al colocar un tercer metal en un circuito termoeléctrico, la fuerza electromotriz neta del circuito no se verá alterada si las nuevas conexiones se mantienen a la misma temperatura, (ley de los metales intermedios).

Como hemos mencionado la termocupla (TC) es un transductor de temperatura en el cual se desarrolla una fem que está en función de la diferencia de temperatura entre sus juntas fría y caliente.

Las termocuplas hechas de metales básicos o nobles son comunmente usadas para medir temperaturas en un rango que va desde cero absoluto hasta + 3200 °F, mientras que unidades especiales se pueden conseguir para temperaturas hasta 5600 °F.

SELECCION DE TERMOCUPLAS

Las termocuplas deben ser seleccionadas para ajustarse a las condiciones de la aplicación. Algunas de las consideraciones involucradas son:

- Tiempo de servicio.
- Temperatura
- Condiciones atmosféricas.
- Velocidad de respuesta.

La velocidad de respuesta está relacionada con el diámetro de los elementos de la termocupla, así, si el diámetro de los pares es pequeño la velocidad de respuesta es rápida, pero teniendo como desventaja un período de vida más corto a altas temperatura de trabajo. Diámetros de pares mayores proveen un tiempo de vida de trabajo más prolongado pero con un costo de velocidad de respuesta menor.

Es recomendable proteger las termocuplas con un adecuado tubo protector cuando el caso lo requiera.

TIPOS DE TERMOCUPLAS

Para ajustarse a las diferentes condiciones de trabajo en las cuales son utilizadas las termocuplas se han empleado diversos metales originando una amplia variedad entre las cuales las mas comunmente utilizadas son:

TIPO E

Son adecuadas para usar a temperaturas mayores a 1652 °F (900°C) en vacío, inerte, medianamente oxigenado o en atmósfera reducida. A temperatura inferiores a 0°C esta termocupla no se corroe. Y su principal característica es entregar la mas elevada fem por grado de todas las comunmente utilizadas.



TIPO J

Puede ser utilizada con o sin protección, donde exista una deficiencia de oxígeno. Debido a que el par JP (hierro) se oxida rápidamente a temperaturas arriba de 1000 °F se debe utilizar pares de grandes diámetros en compensación.

TIPO K

Debido a su precisión y confiabilidad, este tipo es usado ampliamente a temperatura arriba de 2300 °F. Una de sus mas importantes características es ser muy resistente a la corrosión ya sea por óxidos, u otros contaminantes usuales. En atmósferas oxidantes tales como hornos, lugares húmedos, se recomienda su empleo.

Este tipo de termocupla es mejor que la de tipo J, a pesar de su menor fuerza electromotriz, por tener una vida util mucho mayor en atmósferas ácidas o alcalinas.

TERMOCUPLA UTILIZADA

Basandonos en las condiciones de trabajo a las que van a ser expuestas las termocuplas en nuestro trabajo específico esto es ambiente húmedo, temperatura máxima 600°F y maquinaria expuesta la interperie, escojo la termocupla tipo "K" para el desarrollo de

esta tesis.

ECUACION DEL VOLTAGE GENERADO POR UNA TERMOCOUPLA TIPO " K "

Utilizamos para esta determinación, los valores experimentales de termocuplas tipo K presentados por la fábrica de equipos térmicos " GORDON COMPANY" (1) cuyos valores se pueden observar en la tabla suministrada a continuación.

Con estos valores experimentales, para una temperatura de referencia de la union fría de 32 F y por medio del analisis de regresión lineal se determinaron los valores de los parametros de la ecuación lineal a,b obteniendo la ecuación siguiente:

$$V = - 0.712454 + 2,25888 \times 10^{-2} \times F$$

con una correlacion $r = 0,99892$

Donde:

F = temperatura en grados Farenheit

V = voltaje producido en milivoltios.

Esta ecuación al ser probada con un computador para observar la desviación de los puntos experimentales con los valores analíticos nos dio: error máximo positivo = 22uV a una temperatura de 500°F; error máximo negativo = 30uV a una temperatura de 250°F; error

promedio = 0, y a las temperaturas de 170°F, 380°F, 570°F. un error de cero microvoltios.

Observando que la correlación es muy alta, y que los errores absolutos son muy pequeños, concluimos que las termocuplas son elementos quasi-lineales, que no requieren de compensación de linealidad. La ecuación general para la TERMOCOUPLA tipo K es por tanto:

$$V = 2,258885 \times 10^{-5} \times (T_j - T_{Ref})$$

T_j es la temperatura de la junta caliente y T_{Ref} es la temperatura de referencia, Analizando esta ecuación observamos que por cada incremento de 1° Fahrenheit (diferencia de temperatura entre la union fría y caliente) el voltaje generado sera de: $2,258885 \times 10^{-2}$ milivoltios; sin importar el rango de temperatura a la cual se este trabajando, (desde -100F hasta 900F). Ver tablas a continuación.

TERMOCUPLAS TIO K Voltaje termoelectrico como una función de temperatura (°F), referencia de juntas a 32°F 136

THERMOELECTRIC VOLTAGE IN MILLIVOLTS

F	C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	F
-450	-6.456	-6.456	-6.457	-6.457	-6.458							450
-440	-6.447	6.448	6.449	6.450	6.451	-6.452	-6.453	6.454	6.454	6.455	-6.456	440
-430	-6.431	-6.433	-6.435	-6.436	-6.438	-6.440	-6.441	6.443	-6.444	-6.445	-6.447	-430
-420	-6.409	-6.411	-6.414	-6.416	-6.419	-6.421	-6.423	-6.425	-6.427	-6.429	-6.431	-420
-410	-6.380	-6.383	-6.386	-6.389	-6.392	-6.395	-6.398	-6.401	-6.404	-6.406	-6.409	-410
-400	-6.344	-6.348	-6.352	-6.355	-6.359	-6.363	-6.366	6.370	-6.373	-6.377	6.380	-400
-390	-6.301	-6.306	6.310	-6.315	-6.319	-6.323	6.328	6.332	-6.336	-6.340	6.344	-390
-380	-6.251	-6.257	-6.262	-6.267	-6.272	-6.277	-6.282	-6.287	-6.292	-6.296	-6.301	-380
-370	-6.195	-6.201	-6.207	-6.213	-6.219	-6.224	-6.230	6.235	-6.241	-6.246	-6.251	-370
-360	-6.133	-6.139	-6.146	-6.152	-6.158	-6.165	6.171	-6.177	-6.183	-6.189	-6.195	-360
-350	-6.064	-6.071	-6.078	-6.085	-6.092	-6.099	-6.106	6.113	-6.119	-6.126	-6.133	-350
-340	-5.989	-5.997	-6.004	-6.012	-6.020	-6.027	-6.035	-6.042	-6.049	-6.057	-6.064	-340
-330	-5.908	-5.917	-5.925	-5.933	-5.941	-5.949	-5.957	-5.965	-5.973	-5.981	-5.989	-330
-320	-5.822	-5.831	-5.839	-5.848	-5.857	-5.866	-5.874	-5.883	-5.891	-5.900	-5.908	-320
-310	-5.730	-5.739	-5.748	-5.758	-5.767	-5.776	-5.786	-5.795	-5.804	-5.813	-5.822	-310
-300	-5.632	-5.642	-5.652	-5.662	-5.672	-5.682	-5.691	-5.701	-5.711	-5.720	-5.730	-300
-290	-5.529	-5.540	-5.550	-5.561	-5.571	-5.581	-5.592	-5.602	-5.612	-5.622	-5.632	-290
-280	-5.421	-5.432	-5.443	-5.454	-5.465	-5.476	-5.487	-5.497	-5.508	-5.519	-5.529	-280
-270	-5.308	-5.319	-5.331	-5.342	-5.354	-5.365	-5.376	-5.388	-5.399	-5.410	-5.421	-270
-260	-5.190	-5.202	-5.214	-5.226	-5.238	-5.249	-5.261	-5.273	-5.285	-5.296	-5.308	-260
-250	-5.067	-5.079	-5.092	-5.104	-5.116	-5.129	-5.141	-5.153	-5.165	-5.178	-5.190	-250
-240	-4.939	-4.952	-4.965	-4.978	-4.990	-5.003	-5.016	-5.029	-5.041	-5.054	-5.067	-240
-230	-4.806	-4.819	-4.833	-4.846	-4.860	-4.873	-4.886	-4.899	-4.912	-4.926	-4.939	-230
-220	-4.669	-4.683	-4.697	-4.710	-4.724	-4.738	-4.752	-4.765	-4.779	-4.792	-4.806	-220
-210	-4.527	-4.541	-4.556	-4.570	-4.584	-4.598	-4.613	-4.627	-4.641	-4.655	-4.669	-210
-200	-4.381	-4.396	-4.410	-4.425	-4.440	-4.454	-4.469	-4.484	-4.498	-4.512	-4.527	-200
-190	-4.230	-4.245	-4.261	-4.276	-4.291	-4.306	-4.321	-4.336	-4.351	-4.366	-4.381	-190
-180	-4.075	-4.091	-4.107	-4.122	-4.138	-4.153	-4.169	-4.184	-4.200	-4.215	-4.230	-180
-170	-3.917	-3.933	-3.949	-3.965	-3.981	-3.997	-4.012	-4.028	-4.044	-4.060	-4.075	-170
-160	-3.754	-3.770	-3.787	-3.803	-3.819	-3.836	-3.852	-3.868	-3.884	-3.901	-3.917	-160
-150	-3.587	-3.604	-3.621	-3.637	-3.654	-3.671	-3.688	-3.704	-3.721	-3.737	-3.754	-150
-140	-3.417	-3.434	-3.451	-3.468	-3.485	-3.502	-3.519	-3.536	-3.553	-3.570	-3.587	-140
-130	-3.242	-3.260	-3.277	-3.295	-3.312	-3.330	-3.347	-3.365	-3.382	-3.399	-3.417	-130
-120	-3.065	-3.082	-3.100	-3.118	-3.136	-3.154	-3.172	-3.189	-3.207	-3.225	-3.242	-120
-110	-2.883	-2.902	-2.920	-2.938	-2.956	-2.974	-2.992	-3.010	-3.029	-3.047	-3.065	-110
-100	-2.699	-2.717	-2.736	-2.754	-2.773	-2.791	-2.810	-2.828	-2.847	-2.865	-2.883	-100
-90	-2.511	-2.530	-2.549	-2.567	-2.586	-2.605	-2.624	-2.643	-2.661	-2.680	-2.699	-90
-80	-2.320	-2.339	-2.358	-2.377	-2.397	-2.416	-2.435	-2.454	-2.473	-2.492	-2.511	-80
-70	-2.126	-2.145	-2.165	-2.184	-2.204	-2.223	-2.243	-2.262	-2.281	-2.300	-2.320	-70
-60	-1.929	-1.949	-1.968	-1.988	-2.008	-2.028	-2.047	-2.067	-2.087	-2.106	-2.126	-60
-50	-1.729	-1.749	-1.769	-1.789	-1.809	-1.829	-1.849	-1.869	-1.889	-1.909	-1.929	-50
-40	-1.527	-1.547	-1.567	-1.588	-1.608	-1.628	-1.648	-1.669	-1.689	-1.709	-1.729	-40
-30	-1.322	-1.342	-1.363	-1.383	-1.404	-1.424	-1.445	-1.465	-1.486	-1.506	-1.527	-30
-20	-1.114	-1.135	-1.156	-1.177	-1.197	-1.218	-1.239	-1.260	-1.280	-1.301	-1.322	-20
-10	-0.904	-0.925	-0.946	-0.968	-0.989	-1.010	-1.031	-1.051	-1.072	-1.093	-1.114	-10
0	-0.692	-0.714	-0.735	-0.756	-0.777	-0.799	-0.820	-0.841	-0.862	-0.883	-0.904	0
0	-0.692	-0.671	-0.650	-0.628	-0.607	-0.585	-0.564	-0.543	-0.521	-0.500	-0.478	0
10	-0.478	-0.457	-0.435	-0.413	-0.392	-0.370	-0.349	-0.327	-0.305	-0.284	-0.262	10
20	-0.262	-0.240	-0.218	-0.197	-0.175	-0.153	-0.131	-0.109	-0.088	-0.065	-0.044	20
30	-0.044	-0.022	0.000	0.022	0.044	0.066	0.088	0.110	0.132	0.154	0.176	30
40	0.176	0.198	0.220	0.242	0.264	0.286	0.308	0.331	0.353	0.375	0.397	40
50	0.397	0.419	0.441	0.464	0.486	0.508	0.530	0.553	0.575	0.597	0.619	50
60	0.619	0.642	0.664	0.686	0.709	0.731	0.753	0.776	0.798	0.821	0.843	60
70	0.843	0.865	0.888	0.910	0.933	0.955	0.978	1.000	1.023	1.045	1.068	70
80	1.068	1.090	1.113	1.135	1.158	1.181	1.203	1.226	1.248	1.271	1.294	80
90	1.294	1.316	1.339	1.362	1.384	1.407	1.430	1.452	1.475	1.498	1.520	90
100	1.520	1.543	1.566	1.589	1.611	1.634	1.657	1.680	1.703	1.725	1.748	100
110	1.748	1.771	1.794	1.817	1.839	1.862	1.885	1.908	1.931	1.954	1.977	110
120	1.977	2.000	2.022	2.045	2.068	2.091	2.114	2.137	2.160	2.183	2.206	120
130	2.206	2.229	2.252	2.275	2.298	2.321	2.344	2.367	2.390	2.413	2.436	130
140	2.436	2.459	2.482	2.505	2.528	2.551	2.574	2.597	2.620	2.643	2.666	140
150	2.666	2.689	2.712	2.735	2.758	2.781	2.804	2.827	2.850	2.873	2.896	150
160	2.896	2.920	2.943	2.966	2.989	3.012	3.035	3.058	3.081	3.104	3.127	160
170	3.127	3.150	3.173	3.196	3.220	3.243	3.266	3.289	3.312	3.335	3.358	170
180	3.358	3.381	3.404	3.427	3.450	3.473	3.496	3.519	3.543	3.566	3.589	180
190	3.589	3.612	3.635	3.658	3.681	3.704	3.727	3.750	3.773	3.796	3.819	190

For fast service or factory assistance, call
815-678-2211

TERMOCUPLAS TIPO K - Voltaje termoelectrico como una función de temperatura(°F), referencia de juntas a 32°F

K

°F	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°F
THERMOELECTRIC VOLTAGE IN MILLIVOLTS												
200	3.819	3.842	3.865	3.888	3.911	3.934	3.957	3.980	4.003	4.026	4.049	200
210	4.049	4.072	4.095	4.118	4.141	4.164	4.187	4.210	4.233	4.256	4.279	210
220	4.279	4.302	4.325	4.348	4.371	4.394	4.417	4.439	4.462	4.485	4.508	220
230	4.508	4.531	4.554	4.577	4.600	4.622	4.645	4.668	4.691	4.714	4.737	230
240	4.737	4.759	4.782	4.805	4.828	4.851	4.873	4.896	4.919	4.942	4.964	240
250	4.964	4.987	5.010	5.033	5.055	5.077	5.101	5.124	5.146	5.169	5.192	250
260	5.192	5.214	5.237	5.260	5.282	5.305	5.327	5.350	5.373	5.395	5.418	260
270	5.418	5.440	5.463	5.486	5.508	5.531	5.553	5.576	5.598	5.621	5.643	270
280	5.643	5.666	5.688	5.711	5.733	5.756	5.778	5.801	5.823	5.846	5.868	280
290	5.868	5.891	5.913	5.936	5.958	5.980	6.003	6.025	6.048	6.070	6.092	290
300	6.092	6.115	6.137	6.160	6.182	6.204	6.227	6.249	6.271	6.294	6.316	300
310	6.316	6.338	6.361	6.383	6.405	6.428	6.450	6.472	6.494	6.517	6.539	310
320	6.539	6.561	6.583	6.606	6.628	6.650	6.672	6.695	6.717	6.739	6.761	320
330	6.761	6.784	6.806	6.828	6.850	6.873	6.895	6.917	6.939	6.961	6.984	330
340	6.984	7.006	7.028	7.050	7.072	7.094	7.117	7.139	7.161	7.183	7.205	340
350	7.205	7.228	7.250	7.272	7.294	7.316	7.338	7.361	7.383	7.405	7.427	350
360	7.427	7.449	7.471	7.494	7.516	7.538	7.560	7.582	7.604	7.627	7.649	360
370	7.649	7.671	7.693	7.715	7.737	7.760	7.782	7.804	7.826	7.848	7.870	370
380	7.870	7.893	7.915	7.937	7.959	7.981	8.003	8.026	8.048	8.070	8.092	380
390	8.092	8.114	8.137	8.159	8.181	8.203	8.225	8.248	8.270	8.292	8.314	390
400	8.314	8.336	8.359	8.381	8.403	8.425	8.448	8.470	8.492	8.514	8.537	400
410	8.537	8.559	8.581	8.603	8.626	8.648	8.670	8.692	8.715	8.737	8.759	410
420	8.759	8.782	8.804	8.826	8.849	8.871	8.893	8.916	8.938	8.960	8.983	420
430	8.983	9.005	9.027	9.050	9.072	9.094	9.117	9.139	9.161	9.184	9.206	430
440	9.206	9.229	9.251	9.273	9.296	9.318	9.341	9.363	9.385	9.408	9.430	440
450	9.430	9.453	9.475	9.498	9.520	9.543	9.565	9.588	9.610	9.633	9.655	450
460	9.655	9.678	9.700	9.723	9.745	9.768	9.790	9.813	9.835	9.858	9.880	460
470	9.880	9.903	9.926	9.948	9.971	9.993	10.016	10.038	10.061	10.084	10.106	470
480	10.106	10.129	10.151	10.174	10.197	10.219	10.242	10.265	10.287	10.310	10.333	480
490	10.333	10.355	10.378	10.401	10.423	10.446	10.469	10.491	10.514	10.537	10.560	490
500	10.560	10.582	10.605	10.628	10.650	10.673	10.696	10.719	10.741	10.764	10.787	500
510	10.787	10.810	10.833	10.855	10.878	10.901	10.924	10.947	10.969	10.992	11.015	510
520	11.015	11.038	11.061	11.083	11.106	11.129	11.152	11.175	11.198	11.221	11.243	520
530	11.243	11.266	11.289	11.312	11.335	11.358	11.381	11.404	11.426	11.449	11.472	530
540	11.472	11.495	11.518	11.541	11.564	11.587	11.610	11.633	11.656	11.679	11.702	540
550	11.702	11.725	11.748	11.770	11.793	11.816	11.839	11.862	11.885	11.908	11.931	550
560	11.931	11.954	11.977	12.000	12.023	12.046	12.069	12.092	12.115	12.138	12.161	560
570	12.161	12.184	12.207	12.230	12.254	12.277	12.300	12.323	12.346	12.369	12.392	570
580	12.392	12.415	12.438	12.461	12.484	12.507	12.530	12.553	12.576	12.599	12.623	580
590	12.623	12.646	12.669	12.692	12.715	12.738	12.761	12.784	12.807	12.831	12.854	590
600	12.854	12.877	12.900	12.923	12.946	12.969	12.992	13.016	13.039	13.062	13.085	600
610	13.085	13.108	13.131	13.154	13.178	13.201	13.224	13.247	13.270	13.293	13.317	610
620	13.317	13.340	13.363	13.386	13.409	13.433	13.456	13.479	13.502	13.525	13.549	620
630	13.549	13.572	13.595	13.618	13.641	13.665	13.688	13.711	13.734	13.757	13.781	630
640	13.781	13.804	13.827	13.850	13.874	13.897	13.920	13.943	13.967	13.990	14.013	640
650	14.013	14.036	14.060	14.083	14.106	14.129	14.153	14.176	14.199	14.222	14.246	650
660	14.246	14.269	14.292	14.316	14.339	14.362	14.385	14.409	14.432	14.455	14.479	660
670	14.479	14.502	14.525	14.548	14.572	14.595	14.618	14.642	14.665	14.688	14.712	670
680	14.712	14.735	14.758	14.782	14.805	14.828	14.852	14.875	14.898	14.922	14.945	680
690	14.945	14.968	14.992	15.015	15.038	15.062	15.085	15.108	15.132	15.155	15.178	690
700	15.178	15.202	15.225	15.248	15.272	15.295	15.318	15.342	15.365	15.389	15.412	700
710	15.412	15.435	15.459	15.482	15.505	15.529	15.552	15.576	15.599	15.622	15.646	710
720	15.646	15.669	15.693	15.716	15.739	15.763	15.786	15.810	15.833	15.856	15.880	720
730	15.880	15.903	15.927	15.950	15.974	15.997	16.020	16.044	16.067	16.091	16.114	730
740	16.114	16.138	16.161	16.184	16.208	16.231	16.255	16.278	16.302	16.325	16.349	740
750	16.349	16.372	16.395	16.419	16.442	16.466	16.489	16.513	16.536	16.560	16.583	750
760	16.583	16.607	16.630	16.654	16.677	16.700	16.724	16.747	16.771	16.794	16.818	760
770	16.818	16.841	16.865	16.888	16.912	16.935	16.959	16.982	17.006	17.029	17.053	770
780	17.053	17.076	17.100	17.123	17.147	17.170	17.194	17.217	17.241	17.264	17.288	780
790	17.288	17.311	17.335	17.358	17.382	17.406	17.429	17.453	17.476	17.500	17.523	790
800	17.523	17.547	17.570	17.594	17.617	17.641	17.664	17.688	17.711	17.735	17.759	800
810	17.759	17.782	17.806	17.829	17.853	17.876	17.900	17.923	17.947	17.971	17.994	810
820	17.994	18.018	18.041	18.065	18.088	18.112	18.136	18.159	18.183	18.206	18.230	820
830	18.230	18.253	18.277	18.301	18.324	18.348	18.371	18.395	18.418	18.442	18.466	830
840	18.466	18.489	18.513	18.536	18.560	18.584	18.607	18.631	18.654	18.678	18.702	840
°F	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°F

For fast service or factory assistance, call

815-678-2211

Tipos de Termocouplas, Rango de temperatura y Tolerancias

Termocoupla Tipo	Temperatura Rango	Temperatura Rango	Tolerancia C
	F	C	
B	870 a 1700	15998 a 3092	+ - 0.5%
E	0 a 900	32 a 1652	+ - 0.5%
J	a a 750	32 a 1382	+ - 0.75%
K	0 a 1250	32 a 2282	+ - 0.75%
N	0 a 1250	32 a 2282	+ - 0.75%
T	0 a 350	32 a 662	+ - 0.75%

Nota: Tomado del manual Gordon Temperatura Measurement.