

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**PROGRAMADOR DE SEIS CANALES
PARA UN SERVISISTEMA DE
TRATAMIENTOS ELECTROTERMICOS
POST-SOLDADURA**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRONICO

PRESENTADO POR:

Álvaro Renee Reyes Elguera

Promoción 1979-I

LIMA-PERÚ

1987

A mis padres, Alvaro y Eva.

A mi esposa e hija, Carmen y Aracelli.

A mis hermanos, Juan, Marie y Mili.

Y a la memoria de mi querida abuela

Constanza.

A mi asesor, Ing. Oscar Morales,
por su gran apoyo y colaboración.

EXTRACTO

TITULO: "PROGRAMADOR DE SEIS CANALES PARA UN SERVOSISTEMA DE TRATAMIENTOS ELECTROTERMICOS POST-SOLDADURA"

AUTOR : ALVARO RENEE REYES ELGUERA

GRADO QUE OPTA: TITULO PROFESIONAL EN INGENIERIA ELECTRONICA

FACULTAD: FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

UNIVERSIDAD: "UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA"

LIMA: LIMA-PERU

AÑO: 1987

En el tratado de este trabajo, contenido en cuatro capítulos, hacemos el diseño de un programador de seis canales que será utilizado para controlar la temperatura en los tratamientos electro-térmicos post-soldadura.

En el capítulo I, proporcionamos la introducción química-metalúrgica, de las causas y consecuencias de los tratamientos electro-térmicos que se son practicados a las tuberías de los Oleoductos y Gasoductos, después de haber sido soldadas. Podemos ver que la aplicación de altas temperaturas, en forma sistematizada, en estos tratamientos determinan un papel de mucha importancia en la Industria Petrolera.

Conocidas estas causas y consecuencias en el capítulo I, procedemos en el capítulo II a analizar la necesidad de diseñar un sistema que controle automáticamente y en forma sistematizada, la aplicación de estas altas temperaturas. Para la consecución de

este sistema de control, hacemos un estudio de las clases o tipos de acciones de control existentes dentro de la Ingeniería de Control, que nos proporcionará las bases conclusivas, para determinar las características y elementos, que pasarán a constituir nuestro sistema (SERVOSISTEMA) que nos permitirá satisfacer la necesidad antes mencionada.

En el Capítulo III, damos paso al diseño del elemento de más importancia dentro de nuestro servosistema concebido en el capítulo II. El capítulo se inicia con las premisas específicas que se tienen que considerar en el diseño, para posteriormente estructurarlo en dos partes; una de programación y otra de control, que conjugadas en una sola, nos proporcionará la facultad de ejecutar tanto la programación, como el control de la temperatura que será aplicada en los tratamientos electrotérmicos post-soldadura, anteriormente citados.

Finalmente, en el Capítulo IV, hacemos la exposición de la forma como nuestro programador automático de seis canales, integrado al servosistema en que será usado; nos brinda resultados óptimos de control de la temperatura; en comparación con otro método que ha sido utilizado muy anteriormente.

| | Pág. |
|--|--------|
| 2.2 Necesidad de Implementar un Servosistema | 21 |
| 2.2.1 Clase de Servosistema a utilizar | 25 |
| 2.2.2 Característica de nuestro Servosistema | 42 |
| 2.3 Sistema de Medición: Termocupla | 44 |
| 2.4 Resistencias Calefactoras | 50 |
| 2.5 Fuente de Energía: Transformador de Secundario Múltiple | 62 |
| 2.6 El Registrador | 69 |
| CAPITULO III: DISEÑO DEL PROGRAMADOR AUTOMÁTICO DE SEIS CANALES | 75 |
| 3.1 Premisas del Diseño | 75 |
| 3.2 Sección Generatriz de los Programas | 79 |
| 3.2.1 Fuente de Corriente | 79 |
| 3.2.2 Generador Rampa | 87 |
| 3.2.3 Generador de Secuencia del Programa | 102 |
| 3.3 Sección de Control | 106 |
| 3.3.1 Circuito Rastreador | 106 |
| 3.3.2 Latches | 109 |
| 3.3.3 Acondicionador y Amplificador de Señal de Termocupla | 116 |
| 3.3.3.1 Compensación de la "Junta Iría" o de Referencia | 116 |
| 3.3.3.2 Amplificador para Señal de Ter- mocupla | 121 |
| 3.3.3.3 Circuito Comparador | 127 |
| 3.4 Esquema Circuitual General del Programador | 132 |

| | Pág. |
|--|------|
| CAPITULO IV; METODO DE AJUSTE DEL PROGRAMADOR AL PROCESO | 133 |
| 4.1 Técnicas para conseguir resultados óptimos | 133 |
| 4.1.1 Termocuplas | 134 |
| 4.1.2 Selección y Emplazamiento de las Resistencias | 135 |
| 4.1.3 Recubrimiento Térmico | 140 |
| 4.1.4 Energización y Registro | 142 |
| 4.2 Comparación con otro Método | 144 |
| CONCLUSIONES | 148 |
| BIBLIOGRAFIA | 149 |
| ANEXOS | 150 |

PROLOGO

La labor desplegada para la elaboración de este trabajo, nace con la inquietud de querer mejorar, u optimizar la forma de ejercer el control del incremento o decremento de la temperatura, en un proceso en la cual, el realizarlo en una forma manual o empírica no nos brindaba las garantías necesarias para obtener los resultados que debían de conseguirse. Estos resultados que se debían de obtener eran determinantes y decisivos para poder establecer la debida confiabilidad y seguridad, en los trabajos en la que muchas situaciones de riesgo estarían presentes.

Considerando los avances tecnológicos por los que está pasando la Ingeniería Electrónica en estos últimos años, sobre todo en la diversa gama de componentes y dispositivos fabricados, tanto en pequeña, mediana como gran escala, y de los cuales podemos disponer para los efectos de cualquier diseño. Hemos acondicionado las necesidades de nuestras inquietudes, al hecho de integrar un grupo de estos dispositivos con el propósito de presentar un diseño que nos represente la posibilidad de prefijar o pre-establecer variables (temperatura y tiempo) que sean controladas en forma óptima.

Para poder determinar con más panorama, la funcionalidad de nuestro diseño, previamente a él, realizaremos un estudio analítico de las características básicas, de las técnicas de control, a partir de las cuales podemos generar el modelo o sistema, dentro del cual, nuestro elemento a diseñar represente el eje, en torno al

cual gire toda la posibilidad de ejecutar el control más ajustado de las variables del proceso.

Anteriormente a este estudio nos vemos precisados, a hacer una revisión de todos los fenómenos que se dan, y por qué se dan, en los procesos cuyas variables o parámetros será objeto de control. Por sobre todo para evaluar la importancia de la responsabilidad que tendría el elemento a diseñarse, dentro de un sistema de control cuya eficiencia es determinante.

Este diseño ha sido desarrollado básicamente con el propósito de atender a la necesidad de efectuar un control ajustado, de los tratamientos electrotérmicos post-soldadura. Estos tratamientos son efectuados en su mayoría en la Industria Petrolera. Pero esto no limita a que este diseño pueda ser usado en el control de la temperatura en otra clase de procesos. Como podría ser en los grandes Hornos con quemadores de Gas; en la que usando electroválvulas en el circuito de salida, y haciendo ligeras variaciones en el circuito de entrada, conseguiríamos una aplicación adicional consiguiendo la misma eficiencia que podríamos conseguir como en el proceso anterior.

Es necesario agregar, que aparte de la facultad de programar y controlar, de la cual será proveido nuestro diseño, hemos pensado en la productividad, funcionalidad, y automatismo del elemento, al haberlo dotado de una característica especial, como lo es la de poseer, seis canales por donde entran las señales analógicas que contienen la información del estado real en la que se encuentran

las variables del proceso, y de seis canales de salida por donde emitimos las señales analógicas de control de estas variables. Todo esto para conseguir mayor funcionalidad, y poder contar con la posibilidad de efectuar un multicontrol, en uno o varios procesos a la misma vez.

CAPITULO I

INTRODUCCION A LOS TRATAMIENTOS ELECTROTERMICOS POST-SOLDADURA

1.1 Generalidades

Dentro de la Industria Petrolera, el uso de Aceros al Carbono tanto como el de Aceros aleados con Cromo-Molibdeno, es muy difundido, especialmente en la construcción de Hornos Tubulares, Recipientes a presión, equipos de Perforación de Pozos que incluyen objetos o materiales como, albergues para cabezales de pozos, tuberías de revestimiento, sellos y otras herramientas manufacturadas, con los elementos arriba mencionados. Algunos de estos equipos van ubicados en medios oxidantes, compuestos corrosivos de azufre, en presencia de hidrógeno, o dentro de pozos perforados en campos sulfurosos o ácidos, donde el aquebrantamiento o cuarteadura del metal debido a la influencia de estos medios químicos, altas presiones y temperaturas, pueden ocurrir. Tales cuarteaduras pueden ocasionar fugas o derrames de petróleo o gases, ocasionando incidentes o contaminando tierra, ríos y mares.

Para minimizar estos riesgos es necesario controlar ajustadamente todos los procesos metalúrgicos que caracterizan a estos materiales. Para esto, la intención de esta parte es difundir los aspectos metalúrgicos que conllevan a la participación de otra disciplina como lo es la Electrónica, en la Opti

mización del control de dichos procesos.

1.1.2 Aspectos Metalúrgicos

De estudios e investigaciones realizadas en la Ingeniería Metalúrgica y en la Ingeniería Química, podemos decir que en una mezcla sólida donde intervengan solamente el Hierro y el Carbono, se presentan fases o mejor dicho formas cristalográficas particulares, definidas básicamente por la temperatura de la mezcla, y por el porcentaje de Carbono presente. Así tenemos, que la fase "austenítica" presenta cristalografía cúbica de caras centradas y solamente se limita a rangos de temperatura encima de 723°C y concentraciones de carbono inferiores a 1.8%, en igual forma la fase "ferrítica" tiene limitada su formación a temperaturas bajas y porcentaje de carbono inferiores a 0.80%.

Además de las dos estructuras mencionadas que son netamente soluciones sólidas, existen otros constituyentes que son compuestos químicos, como la "cementita" o carbono de hierro (Fe_3C). También existen otras estructuras que realmente son mezclas o variaciones de las 3 mencionadas anteriormente, como la "perlita" (mezcla de ferrita mas cementita), o como la "martensita" (inclusión de átomos de C en cristales alargados de "ferrita").

Si a la mezcla de hierro y carbono le adicionamos algún otro elemento, automáticamente las líneas de trans-

formación variarían limitando de esta forma, las zonas de permanencia de las estructuras a diferentes rangos de temperaturas y concentraciones, y sobre todo existen elementos que adicionados a la mezcla estabilizan ciertas estructuras.

Los aceros al cromo-molibdeno tienen 5 cualidades fundamentales, que hacen de ellos materiales excelentes para servicios cuya severidad está dada por la presencia de altas temperaturas, medios corrosivos y oxidantes.

- a) Alta resistencia a la oxidación debido a la presencia del cromo, incrementándose la resistencia conforme se incremente el contenido de cromo.
- b) Alta resistencia mecánica a temperaturas elevadas, gracias a la presencia del Mo que promueve formación de estructuras de gran resistencia mecánica y estables hasta temperaturas del orden de 500-600°C.
- c) Resistencia a la corrosión por azufre y sus compuestos.
- d) Resistencia al daño por hidrógeno (Hydrogen Embrittlement e Hydrogen Blistering).
- e) Bajo creep a temperaturas de operación entre 500-600°C.

Los aceros al cromo-molibdeno son aceros templables al aire y dependiendo de las transformaciones metalúrgicas que se verifiquen, las propiedades mecánicas varían

rán significativamente, por ello es necesario que los procesos efectuados en ellos deben ser llevados en forma adecuada para evitar la formación de estructuras "dañinas" para los usos que se den. La ASTM especifica requerimientos mínimos de propiedades mecánicas para ensayos estáticos de tensión en la que se deben cumplir valores estandarizados, variando según el proceso al cual hayan sido sometidos.

Con lo anteriormente anotado podemos concluir, que estos aceros tienen gran propensión al temple, y por ende al aguantamiento y mantención de tensiones internas, por lo que es muy importante, cuadrar las variables "TEMPERATURA Y TIEMPO" que predominan en los procesos, que generan las características mencionadas. Estos procesos son los tratamientos térmicos.

1.2 Tratamientos Térmicos

1.2.1 Objetivo

Los tratamientos térmicos tienen por objeto, mejorar las propiedades y características de los aceros, y consiste en calentar las piezas y herramientas a temperaturas adecuadas, durante un cierto tiempo, y luego enfriarlas en condiciones convenientes. De esta forma se modifica la estructura microscópica de los aceros, se verifican transformaciones físicas y a veces hay también cambios en la composición del metal.

El TIEMPO y la TEMPERATURA son los factores principales y hay que fijarlos siempre de antemano, de acuerdo con la composición del acero, la forma y el tamaño de las piezas, y las características que se quieran obtener.

1.2.2 Influencia

Los tratamientos térmicos aplicados normalmente a estos tipos de aceros son los que generalmente se aplican a los aceros endurecibles, es decir, recocido, normalizado y temperado, todos ellos con la finalidad de restaurar tamaños de grano y darle propiedades mecánicas adecuadas. Por ejemplo, el normalizado y temperado proveen resistencia mecánica suficiente para cumplir con valores de diseño especificadas en varias secciones del código ASME (American Society of Mechanical Engineering) para calderos y recipientes a presión.

De ensayos efectuados en aceros al 5Cr-1/2 Mo, en lo referente a tratamientos térmicos, se pueden deducir las siguientes variaciones estructurales y características:

- a) La influencia de un revenido es más marcada cuanto más elevada sea la temperatura.
- b) Un tratamiento a 710°C forma estructuras muy alargadas, aumentando su tamaño conforme dure el tratamiento.
- c) En tratamientos relativamente largos (unas 2 horas)

se inicia la formación de carburos a 750°C, disminuyendo la dureza. A los 875°C la formación de perlita es completa.

En la Industria Petrolera, especialmente en los sistemas de explotación, refinación, almacenamiento y transporte del petróleo y derivados, se utilizan constantemente aceros aleados 5Cr-1/2 Mo, particularmente los tipos ASTM A 335-P5, ASTM A 357, ASTM A 213 T5; y un tipo de trabajo encuadrado también dentro de los tratamientos térmicos, que se realiza con mucha frecuencia tanto en el montaje de equipos nuevos como en las reparaciones de instalaciones existentes, es la Soldadura. Por ello, un conocimiento de la metalurgia y de los efectos remanentes que trae consigo esta actividad, es muy importante para poner de manifiesto la seguridad y la eficiencia al servicio de esta industria.

1.3 Tratamientos Térmicos Post-Soldadura

En los procesos de soldadura de aceros al carbono, tanto como en los aceros al Cr-Mo, se presentan fenómenos metalúrgicos generados básicamente, como consecuencia de la alta velocidad de enfriamiento del material fundente, que se está depositando, a altas temperaturas, por un corto período de tiempo. Estos fenómenos cuantificados como un enlace de debilidades en la propia soldadura y en las áreas adyacentes afectadas de la estructura que ha sido soldada, son identificados en la meta-

lurgia como, alta dureza, y concentración de tensiones internas, que particularmente crearían susceptibilidad a los severos ataques de corrosión y aquebrantamiento de la estructura.

Los TRATAMIENTOS TERMICOS POST-SOLDADURA efectuados a estas estructuras, en forma sistematizada, cuadrando las variables "tiempo y temperatura", tienen el propósito de promover la recristalización, resistencia y ductibilidad de la soldadura y de las áreas afectadas, eliminando los fenómenos anteriormente mencionados, para asegurar una estructura metalúrgica firme y uniforme, y con garantía a un mayor tiempo de duración en el servicio.

1.3.1 Clases o Tipos

- 1.- Tratamiento Gaso-Térmicos Post-Soldadura.
- 2.- Tratamientos Exo-Térmicos Post-Soldadura.
- 3.- Tratamiento Electro-Térmico Post-Soldadura

La presencia de estos tres métodos representan alternativas que implican tener un claro panorama del trabajo que se va a ejecutar y de las características tecnológicas con las que puede superar un método al otro. Un resumen específico de estos métodos, basados en experiencias teórico-prácticas, nos abrirá las puertas para hacer un análisis equilibrado que nos permitirá concluir más adelante, con el estudio racional y depurado del sistema que representará la optimización del control de las variables predominantes del proceso,

1.3.1.1 Tratamientos Gasotérmicos Post-Soldadura

Es el método por el cual, haciendo uso del gas propano, gas natural, u otro gas inflamable, se le proporciona energía calorífica, para ser aplicada a la soldadura y a las áreas adyacentes afectadas por ésta. Este método es la respuesta frecuente para los tratamientos térmicos post-soldadura de grandes recipientes o grandes secciones de ellos, de las cámaras de los reactores, y de otros elementos en la que, muy altas temperaturas por largos períodos de tiempo se requieren en el proceso (una semana o más), y ningún control preciso del incremento o decremento de la temperatura respecto al tiempo, es establecido por las codificaciones internacionales que reglamentan estos procesos.

1.3.1.2 Tratamiento Exotérmicos Post-Soldadura

Es el método en el cual se utilizan compuestos químicos que al reaccionar, generan calor proporcionando temperaturas específicas de acuerdo a la cantidad de compuesto utilizado y del espesor del metal que se está tratando.

Generalmente, este método es conveniente cuando el promedio del área que requiere calentamiento es relativamente pequeña y el espesor

de la estructura que ha sido soldada es inferior a 1". En situaciones en las que se requieran tratamientos térmicos post-soldadura de tuberías para oleoductos con espesores superiores a 1", y en la que las velocidades de calentamiento, tiempos de mantenimiento, y velocidades de enfriamiento representen condiciones inviolables en los trabajos de reparación y construcción de oleoductos, este método no satisface las necesidades para cumplir con tales condiciones.

En el gráfico adjunto podemos notar las limitaciones que se presentan para el control de la temperatura.

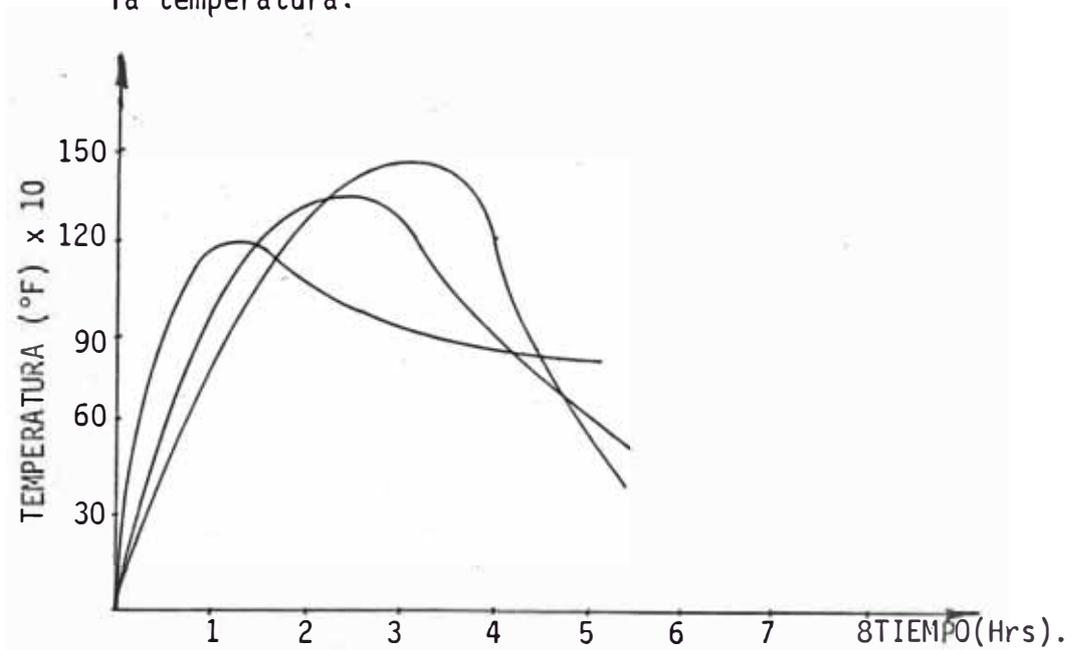


Fig. 1,1

1.4 Tratamientos Electrotérmicos Post-Soldadura

Este método utiliza la corriente eléctrica en forma sistemática para realizar los tratamientos y existen fundamentalmente dos tipos:

1.4.1 Calentamiento por Corrientes de Inducción de Alta Frecuencia

Este procedimiento se utiliza para aliviar tensiones post-soldadura en materiales de espesores reducidos, y también para endurecer superficialmente, pequeñas piezas de acero, por temple de su zona periférica. El calentamiento por corrientes de alta frecuencia se efectúa por muy pocos minutos, pudiendo además, si se desea, localizar el tratamiento en zonas muy limitadas.

Las piezas se colocan en el interior de una espira o conjunto de espiras de forma apropiada, a través de las cuales se hace pasar corriente eléctrica de alta frecuencia que calienta las piezas a alta temperatura; luego se enfría moderadamente. Las espiras están constituidas por un tubo de cobre refrigerado interiormente por agua. La corriente eléctrica crea en el interior de las espiras un campo magnético alternativo que a su vez da lugar a corrientes eléctricas alternativas de alta frecuencia en las piezas, que son suficientes para calentar el acero.

Un circuito de calentamiento por Inducción es fundamentalmente un transformador, en el que el primario está

den de 800°C á 1000°C.

En este procedimiento, el efecto de histéresis que es casi despreciable, no ejerce ningún efecto cuando la temperatura sobrepasa los 768°C, porque a partir de esa temperatura el acero es amagnético. Entonces el calentamiento se efectúa exclusivamente por corrientes de Foucault, actuando el acero de la periferia de las piezas soldadas como una resistencia que se calienta al paso de la corriente eléctrica, de acuerdo con la Ley de Joule. El calor desarrollado será proporcional a: RI^2 siendo la resistencia del circuito R, e I la intensidad de la corriente que la atraviesa.

Para generar corrientes de alta frecuencia para el tratamiento térmico de piezas de acero que han sido soldadas, existen tres tipos que son las más frecuentemente usadas:

- Motor-Generador: Se emplean para frecuencias relativamente bajas de 60 á 25,000 ciclos por segundo, con capacidades variables desde 5 kW hasta varios cientos de kW; que se utilizan para profundidades de calentamiento desde 1,5 á 5 mm.

- Generadores de Válvulas: Se emplean para frecuencias muy elevadas; desde 100,000 á 5'000,000 de ciclos por segundo, con capacidades de 5 á 100 kW.
- Generadores de Chispa: Se utilizan para frecuencias muy elevadas desde 20,000 á 1'000,000 de ciclos, con pequeñas capacidades de 5 á 40 kW.

En consecuencia, podemos concluir que este procedimiento nos proporciona altas temperaturas por espacios cortos de tiempo; por lo tanto, las variables temperatura-tiempo que son las que predominan en los tratamientos térmicos post-soldadura, para los efectos de su dominio y control, quedarían restringidas.

1.4.2 Calentamiento por Resistencias Eléctricas

Este procedimiento o método es el que haciendo uso de resistencias eléctricas previamente encapsuladas en medios aislantes eléctricos, se genera calor que es transmitido a la pieza que ha sido soldada, por medio de radiación como también por convección; consiguiéndose altas temperaturas por espacios relativamente largos.

El uso de este procedimiento nos representará la alternativa más adecuada para ejercer un optimizado control de la temperatura en función del tiempo, en los trata-

mientos térmicos post-soldadura para el alivio de tensiones, en las soldaduras y áreas adyacentes de las tuberías usadas en los oleoductos.

En el capítulo siguiente se realizará un estudio analítico en que se detallarán ampliamente las características de un sistema elaborado a partir de este último procedimiento, y que pone de manifiesto la preminencia de programar el control de las variables del tratamiento.

CAPITULO II

ANALISIS E IMPLEMENTACION DE NUESTRO SERVOSISTEMA CON PROGRAMADOR DE SEIS CANALES

2.1 Normas Técnicas que Cumplir

En la actualidad, las actividades Industriales en el campo de la Construcción, fabricación o reparación; por los riesgos que se presentan de por medio, es preciso que se tome las máximas previsiones en el campo de la seguridad, frente a situaciones accidentales o pérdidas de vidas. Para esto existen Organismos Internacionales conformados por profesionales debidamente calificados, que en base a haber acumulado, un amplio vaqaje de información, experiencia, e investigación en estos menesteres; estandarizan o normalizan los procesos dentro de las actividades industriales mencionadas, para minimizar al máximo estos riesgos y para que se pueda conseguir máxima eficiencia de servicio con bases científicas debidamente fundamentadas. Dentro de muchos organismos que recopilan o codifican estas normas podemos mencionar entre otros:

API ; AMERICAN PETROLEUM INFORMATION

ASTM ; AMERICAN SOCIETY FOR

ASME ; AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERING

AWS ; AMERICAN WELDING SOCIETY

ASCE ; AMERICAN SOCIETY OF CIVILS ENGINEERING

Para los efectos de nuestro trabajo, que está centrado como una actividad dentro de la construcción y reparación en la industria

petrolera (tratamientos electro-térmicos post-soldadura); específicamente en oleoductos y gasoductos, son regidos por una de las codificaciones internacionales más aplicadas en nuestro continente y en muchas partes de otros. Este es el código ASME.

Este reglamento tiene partes que norman o dictaminan la actividad respectiva a ejecutarse. Mencionaremos los 5 códigos básicos del ASME:

- 1.- Refinery Piping USASB 31.3, Pressure Vessel Sección VIII
División 1.
- 2.- Nuclear Power Components, Sección III
- 3.- Nuclear Power Piping USASB 31.7. Power Boilers.
- 4.- Power Piping USASB 31.10 .
- 5.- Gas Transmision USASB 31.8 .

Dentro del código "Refinery Piping USASB 31.1, Pressure Vessel, Sección VIII, División 1", específica en su capítulo correspondiente a "STRESS RELIEVING" (alivio de tensiones), lo siguiente.

Cualquier soldadura sobre tuberías de acero al carbono que tenga 0.32%, o un carbono equivalente (Cmás 1/4Mn) de 0.65%, o aceros al cromo molibdeno, se le debe de practicar un tratamiento térmico para el alivio de tensiones, cuando el espesor de la estructura supera los 7/8", de la siguiente manera:

"La soldadura y las partes adicionales afectadas deben de ser calentadas a una velocidad que no supere los 400°F/Hr; siendo que la temperatura a alcanzar debe estar dentro del rango de 1100°F-1350°F. Una vez alcanzada esta temperatura, se le debe de mantener en ésta, un período de tiempo equivalen

te a 1 hora por cada pulgada de espesor que tenga la estructura que ha sido soldada; después debe ser enfriada sistemáticamente con disminución de calor de tal forma que la velocidad de enfriamiento no supere los 400°F/Hr ."

Adicionalmente a estas normas, las AWS y el JCC determina sobre estos tratamientos térmicos post-soldadura, que:

- El control de la temperatura debe de ser lo suficientemente preciso.
- Si es usado combustible; éste no deberá afectar las soldadura o el metal base, ni la llama de los quemadores debe incidir sobre el material y menos sobre las soldaduras.
- La temperatura del tratamiento se medirá con termocuplas debidamente calibradas, las que serán ubicadas donde se espere la mayor y menor temperatura.
- Las diferencias de temperatura durante el calentamiento entre uno y otro punto no debe exceder los 100°C (212°F).
- La temperatura inicial del elemento antes de ser tratado no debe ser inferior a los 300°C.
- Cuando el tratamiento térmico es local, el ancho de la banda de tratamiento será 6 veces el espesor de la soldadura, a cada lado de ella.
- El aislamiento de la zona tratada será como mínimo 12 veces el espesor, a cada lado de la soldadura.
- Para cuantificar la eficiencia del tratamiento y antes de ser sometidas a prueba de dureza y ductilidad de la pieza deberán hacerse inspecciones como:

- a.- Inspección visual de la zona tratada.
- b.- Ensayos no destructivos como los Rayos X o ultrasonido.
- C.- Así mismo, lo más importante será la verificación y análisis de las cartas de registro impreso en papel, de la secuencia o ciclo del tratamiento térmico efectuado.

Evidentemente podemos concluir, que precisamos de la implementación de un sistema de control que nos garantice el cumplimiento eficiente de estas normas o códigos; que a la postre nos darán seguridad y larga vida de duración en este tipo de construcciones petroleras como lo son mayormente los Oleoductos, Gasoductos, Refinerías y otros.

2.2 Necesidad de Implementar un Servo Sistema

El término controlar es tan general que puede usarse como sinónimo de gobernar, guiar, dirigir, conducir, etc. En nuestro proceso, el control se realiza actuando sobre elementos específicos que nos dan origen a la denominación de elementos u órganos de control.

Regular es controlar para obtener una respuesta preestablecida o programa. En Ingeniería muchas veces se confunden los términos controlar y regular; un problema de control es un problema de regulación. De modo más preciso podemos decir que "Regular es controlar un proceso para obtener una respuesta predeterminada y mantenerla a pesar de las perturbaciones". La regulación puede ser manual o automática.

El control es automático cuando se realiza sin la intervención de la mano del hombre, tal es el caso de la necesidad de incrementar, mantener, o decrementar la temperatura en nuestros tratamientos electrotérmico pos-soldadura que estamos abordando.

Ahora bien, la acción sobre los elementos de control tiene lugar, después de la observación, percepción o medición de las variables que caracterizan el fenómeno que vamos a controlar. La magnitud deseada (fijada con anterioridad) y la diferencia o error es la que actuará sobre el proceso.

Así pues nuestro proceso de regulación o control atraviesa por las etapas siguientes:

- Medición : Captación de la magnitud a controlar.
- Comparación: Detección del error entre el valor medio y el valor prefijado o programado con anterioridad.
- Acción : La señal del error (que será amplificada) que actuará sobre los órganos de control o mando.

El resultado final de estas tres operaciones nos dará la respuesta deseada.

Cuando el sistema es capaz por sí sólo de medir (captar la señal de salida o variable a controlar), comparar con el va-

lor pre-establecido y actuar sobre los órganos de mando, se dice que es un sistema de regulación automático. Un caso típico encuadrado dentro de lo definido es el sistema que implementaremos. FIG. 2.1 .

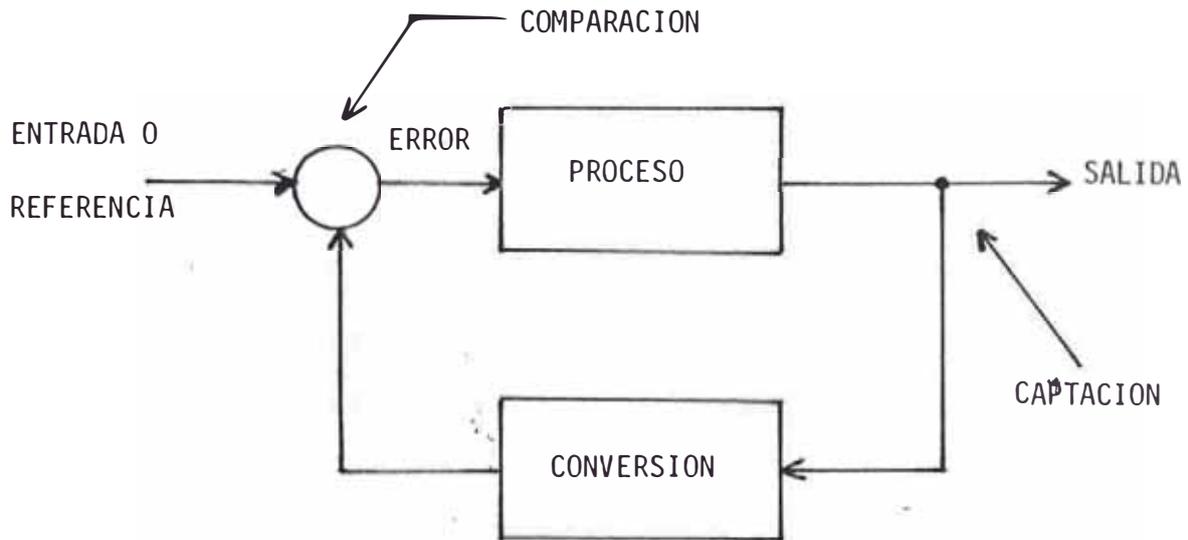


FIG. 2.1

Para nuestro caso, el grupo de dispositivos o elementos debidamente organizados constituirán la cadena de control o regulación y que no aparezcan aislados sino que serán aplicados al control de las variables (temperatura, tiempo).

La Ingeniería en el campo del control tiene por finalidad el diseño de la cadena o rama de regulación que conjuntamente con los elementos o procesos a controlar, conforman el sistema de control automático. Para esto existen dos grandes técnicas o filosofías para resolver el problema de control:

- Control Lógico: En este caso las informaciones captadas en la etapa de medición y las ordenes dadas a los elementos de control son de tipo lógico. La presencia o ausencia de estas señales sin importar sus respectivas magnitudes, que por lo general son fijas son los que ponen en funcionamiento el sistema.
- Control Continuo: En este caso las señales en juego aparecen en forma continua o analógica y es necesario conocer su magnitud para el correspondiente funcionamiento del sistema.

Según sus formas de ejercer el control en el sistema se dan dos tipos:

- Sistema de Bucle Abierto: cuando la acción (entrada) principal es independiente de la salida.
- Sistema de Bucle Cerrado: cuando la acción (entrada) principal depende también de la salida. Se caracterizan estos sistemas por la presencia de una realimentación de toda o parte de la salida hacia la entrada (feedback).

Podemos determinar por consiguiente, que por las necesidades de ejercer un control continuo en bucle cerrado donde nuestras variables a controlar son de posición y de velocidad, los elementos que agruparemos y describiremos adecuadamente en nuestra implementación conforman un "SERVO SISTEMA".

2.2.1 Clase de Servo Sistema a Utilizar

Sabemos que el Servo Sistema ejecuta un control automático comparando el valor efectivo de salida de un proceso con el valor o los valores deseados, determina la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero a un valor pequeño. La forma en que el control automático produce la señal o las señales de control recibe el nombre de "ACCION DE CONTROL".

En esta sección haremos un resumen sustancial de las acciones de control básicas utilizadas comúnmente en los controles automáticos industriales, que nos darán el soporte necesario para tener un claro panorama del sistema que implementaremos y de los elementos que lo constituirán.

2.2.1.1 Clasificación de los Controles Automáticos

De acuerdo a su acción de control se puede clasificar en:

a.- Controles de dos Posiciones o de SI-NO:

En un sistema de dos posiciones, el elemento accionador tiene solamente dos posiciones fijas que en muchos casos son simplemente conectado y desconectado.

Sea la señal de salida del control $m(t)$, y la señal de error actuante $e(t)$. En un con

control de dos posiciones, la señal $m(t)$ permanece en un valor máximo o mínimo, según que la señal actuante sea positiva o negativa, de modo que:

$$\begin{aligned} m(t) &= M_1 && \text{para } e(t) > 0 \\ &= M_2 && \text{para } e(t) < 0 \end{aligned}$$

Los controles de dos posiciones son generalmente dispositivos eléctricos, donde habitualmente hay una válvula accionada por un solenoide eléctrico. (RELE).

Las figuras 2.2 y 2.3 presentan los diagramas de bloques de controles de dos posiciones.

El rango en el que se debe desplazar la señal de error actuante antes de que se produzca la conmutación se llama brecha diferencial. En la figura 2.3 se indica la brecha diferencial. La brecha diferencial hace que la salida del control $m(t)$ mantenga su valor hasta que la señal de error actuante haya pasado levemente del valor cero. En algunos casos, la brecha diferencial es un resultado de fricción no intencional y movimiento perdido; sin embargo, se le provee deliberadamente para evitar la acción excesivamente frecuente del mecanismo de SI - NO.

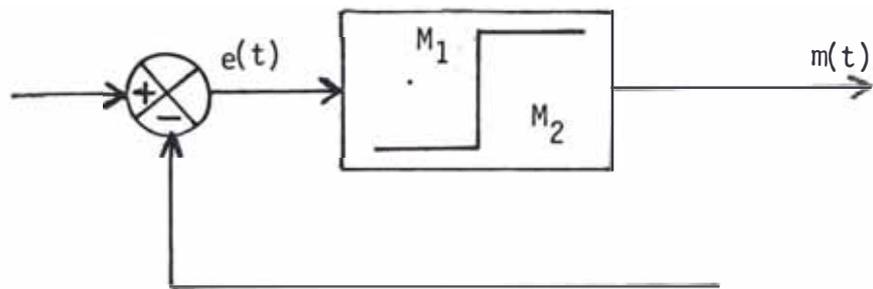


FIG. 2.2

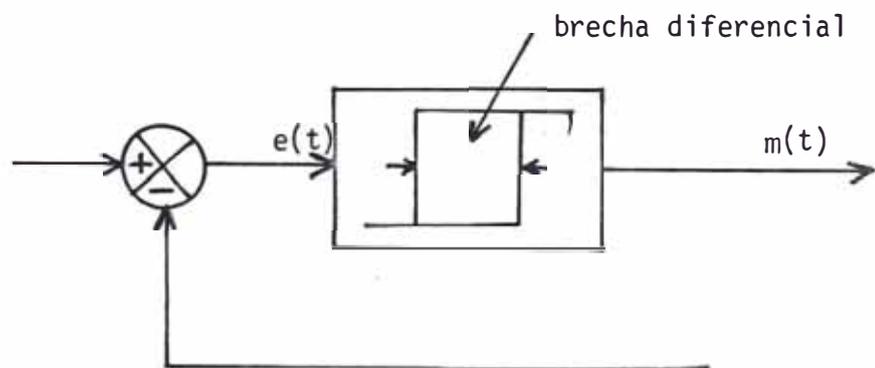


FIG. 2.3

b) Control Proporcional

Para un control de acción proporcional la relación entre la salida del controlador $m(t)$ y la señal de error actuante $e(t)$ es:

$$m(t) = K_p e(t)$$

o en magnitudes transformadas de Laplace:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p$$

donde K_p se le denomina sensibilidad proporcional o ganancia.

Cualquiera que sea el mecanismo en sí, y sea cual fuere la potencia que lo alimente, el control proporcional esencialmente es un amplificador con ganancia ajustable. El diagrama de bloque que le corresponde es el de la fig. 2.4.

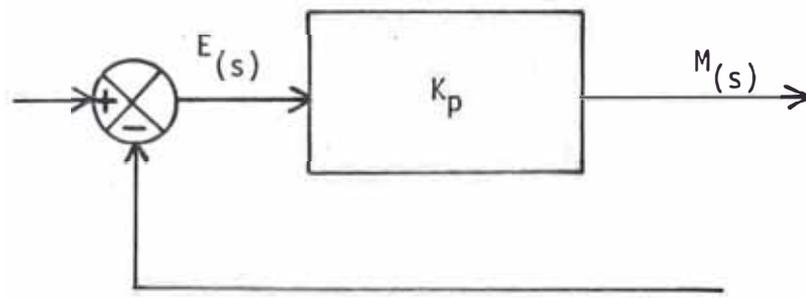


FIG. 2.4

c) Controles Integrales

En un control de acción integral, el valor de la salida del controlador $m(t)$ varía proporcionalmente a la señal de error actuante $e(t)$, es decir:

$$\frac{dm(t)}{dt} = K_i e(t) \quad \delta$$

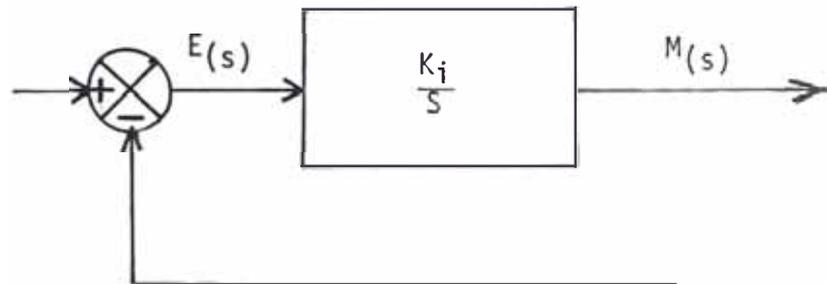


FIG. 2.5

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

donde K_i es una constante regulable. La función de transferencia del control integral es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

Aquí, si duplicamos el valor de $e(t)$, el valor de $m(t)$ varía dos veces más rápido. Para un error actuante igual a cero, el valor de $m(t)$ se mantiene estacionario. La acción de control integral recibe el nombre de control de reposición. La fig. 2.5 muestra el diagrama de bloque de este control.

d) Control Proporcional e Integral

Este tipo de acción de control queda definida por la siguiente ecuación:

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

o la función de transferencia del control es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

donde K_p representa la sensibilidad proporcional o ganancia, y T_i el tiempo integral. Tanto K_p como T_i son regulables. El tiempo integral regula la acción de control integral, mientras una modificación en K_p afecta tanto a la parte integral como a la proporcional de la acción de control. A la inversa del tiempo integral T_i se le llama frecuencia de reposición. La frecuencia de reposición es el número de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La frecuencia de repetición se mide en términos de repeticiones por minuto. La fig. 2,6 muestra un diagrama de bloques de un control proporcional e integral. Si la señal de error actuante $e(t)$ es una función escalón unita

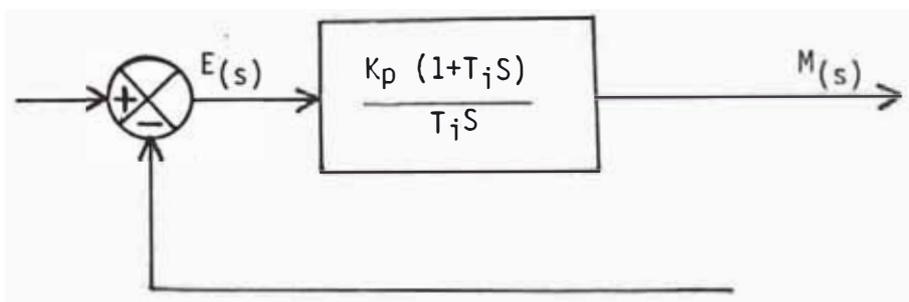


FIG. 2.6

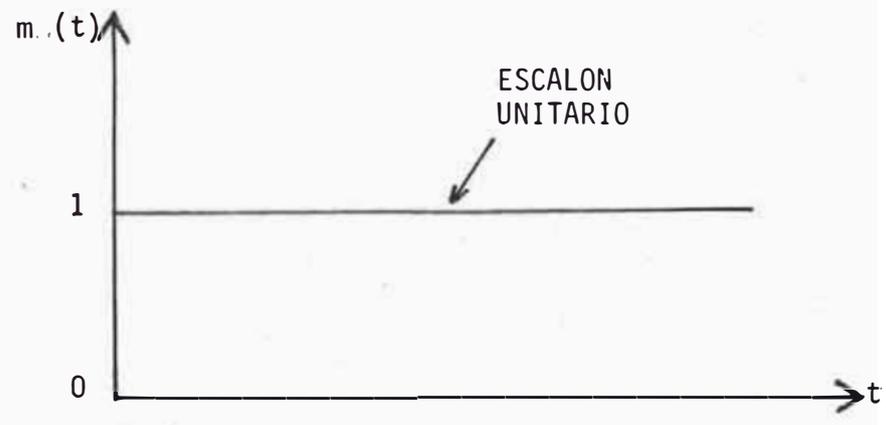


FIG. 2.7

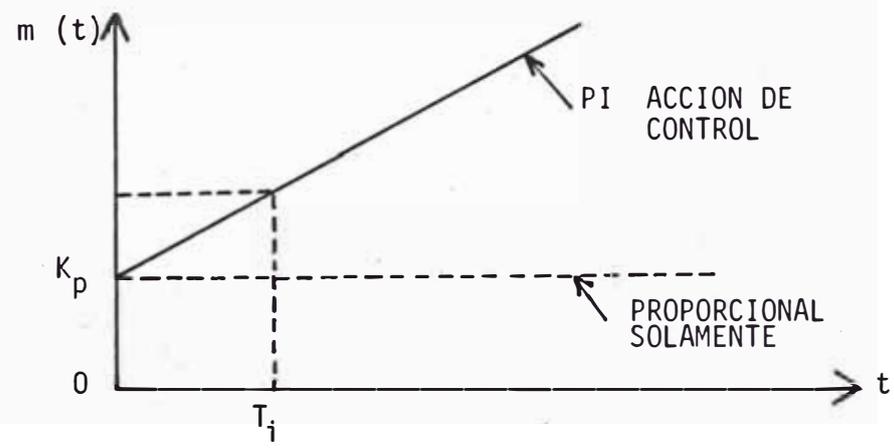


FIG. 2.8

rio como se ve en la fig. 2.7 la salida del control $m(t)$ pasa a ser la indicada en la fig. 2.8.

e) Control proporcional y Derivativo

La acción proporcional y derivativo queda definida por la siguiente ecuación:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

y la función de transferencia es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s)$$

donde K_p es la sensibilidad proporcional y T_d es el tiempo derivativo. Tanto K_p como T_d son regulables. La acción de control derivativa, a veces denominada control de velocidad, es cuando el valor de salida del control es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error actuante. El tiempo derivativo T_d es el intervalo en el que la acción de velocidad se adelanta al efecto de acción proporcional. La fig. 2.9 presenta un diagrama de bloques de un control proporcional y derivativo. Si la señal de error actuante $e(t)$ es una función rampa unitaria, como se ve en la fig.

2.9, la salida de control $m(t)$ es la que vemos en la fig. 2.10, la acción de control derivativo tiene caracter de anticipación. Sin embargo, por supuesto, la acción derivativa nunca puede anticiparse a una acción que no ha tenido lugar.

f) Control Proporcional y Derivativo e Integral

La combinación de los efectos de acción proporcional, acción de control derivativa y acción de control integral, se llama acción de control proporcional y derivativa e integral. Esta acción combinada tiene las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un control con esta acción de control combinada está dada por:

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

o la función de transferencia es:

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

donde K_p representa la sensibilidad proporcional, T_d el tiempo derivativo y T_i el tiempo integral. En la fig. 2.12 se puede

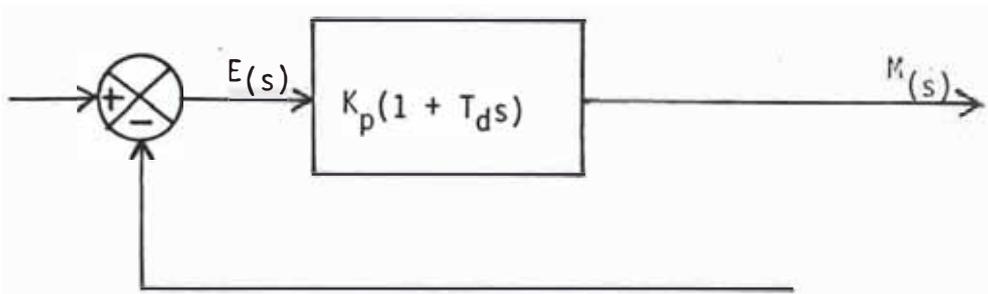


FIG. 2.9

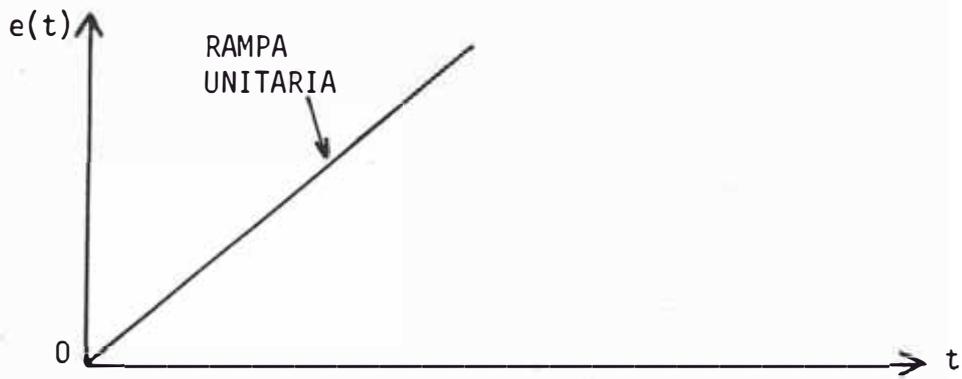


FIG. 2.10

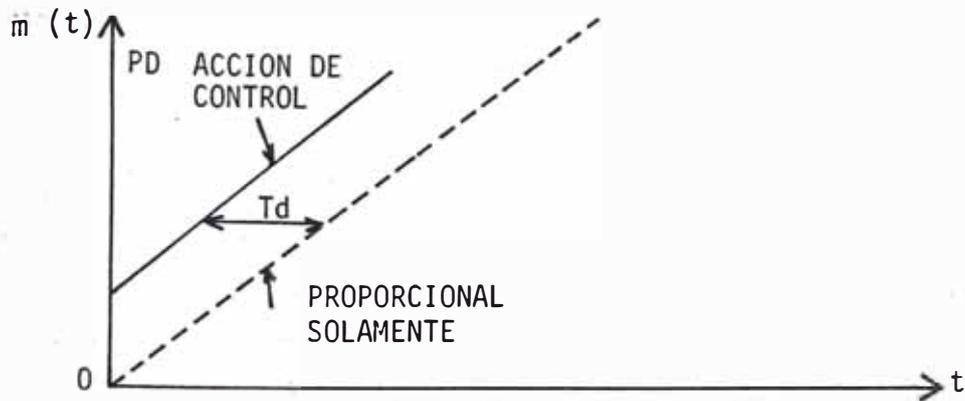


FIG. 2.11

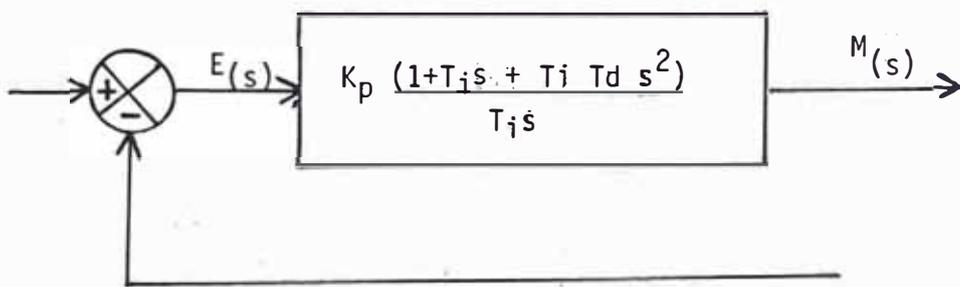


FIG. 2.12

ver el diagrama de bloques de un control proporcional y derivativo e integral. Si $e(t)$ es una función rampa unitaria como la de la fig. 2.13, la salida del control $m(t)$ es el que puede verse en la fig.2.14.

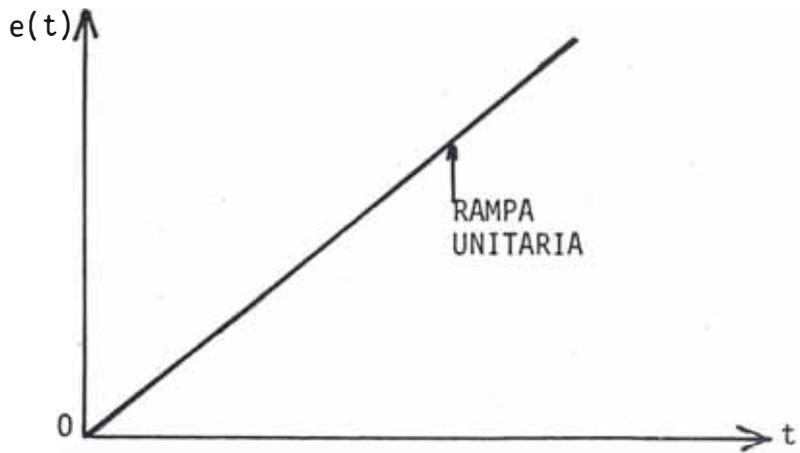


FIG. 2.13

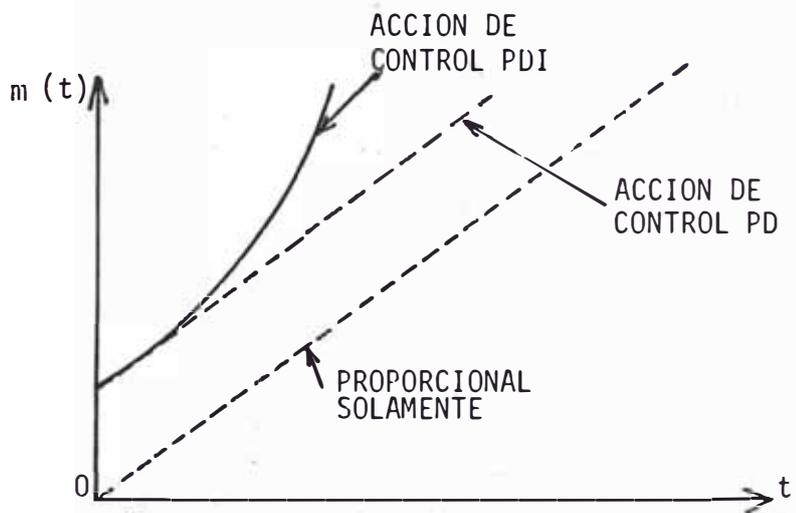


FIG. 2.14

2.2.1.2 Bases Conclusivas para la Implementación de nuestro Sistema

El enfoque analítico que anteriormente hemos hecho nos sitúa en una posición clara para poder implementar nuestro servo-sistema y definir qué tipo de acción de control utilizaremos en él, con el previo conocimiento por supuesto de las condiciones que tenemos que satisfacer, para conseguir establecer seguridad y confiabilidad de cumplir con los requerimientos y normas analizadas anteriormente.

Nuestro sistema deberá tener una "ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL Y DERIVATIVO E INTEGRAL CON ENTRADA DE REFERENCIA VARIABLE".

Haciendo un microanálisis a la clase de control que utilizaremos, cuando nos referimos a proporcional y derivativo e integral, y por lo anteriormente explicado en cuanto a esta clase de acción de control, podemos entender que ésta, solamente nos controlará sólo parte de nuestros parámetros en el proceso; pero la otra característica adicional, que son las variaciones en la entrada de referencia del sistema, obedecen a la necesidad de que en nuestro proceso (tratamiento electro-térmico post-soldadura), tenemos que controlar valores pre-

establecidos de referencia, variables en el tiempo, que necesitan darse siguiendo un orden programado, no solamente para una salida sino para seis salidas, cuyos parámetros a ser controlados son los mismos, pero regidos por un solo programa de orden.

Resumiendo las características explicadas podemos decir que nuestro servosistema a implementar nos deja la importancia de la necesidad imperante de emplear un elemento con dispositivos electrónicos sistemáticamente integrados en su función, y que será el elemento primordial y estratégico que nos permitirá desarrollar el trabajo que satisfaga nuestros objetivos.

Este elemento al cual nos referimos es un "PROGRAMADOR O CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE SEIS CANALES"; del cual nos ocuparemos íntegramente en el siguiente capítulo.

En la fig. 2.15 hacemos un esquema que nos muestra la interrelación física de los elementos que consideramos los más indicados a nuestro juicio, para integrar nuestro servosistema que ejecutará el control automatizado de las variables en nuestros tratamientos electrotérmicos post-soldadura, en las tuberías

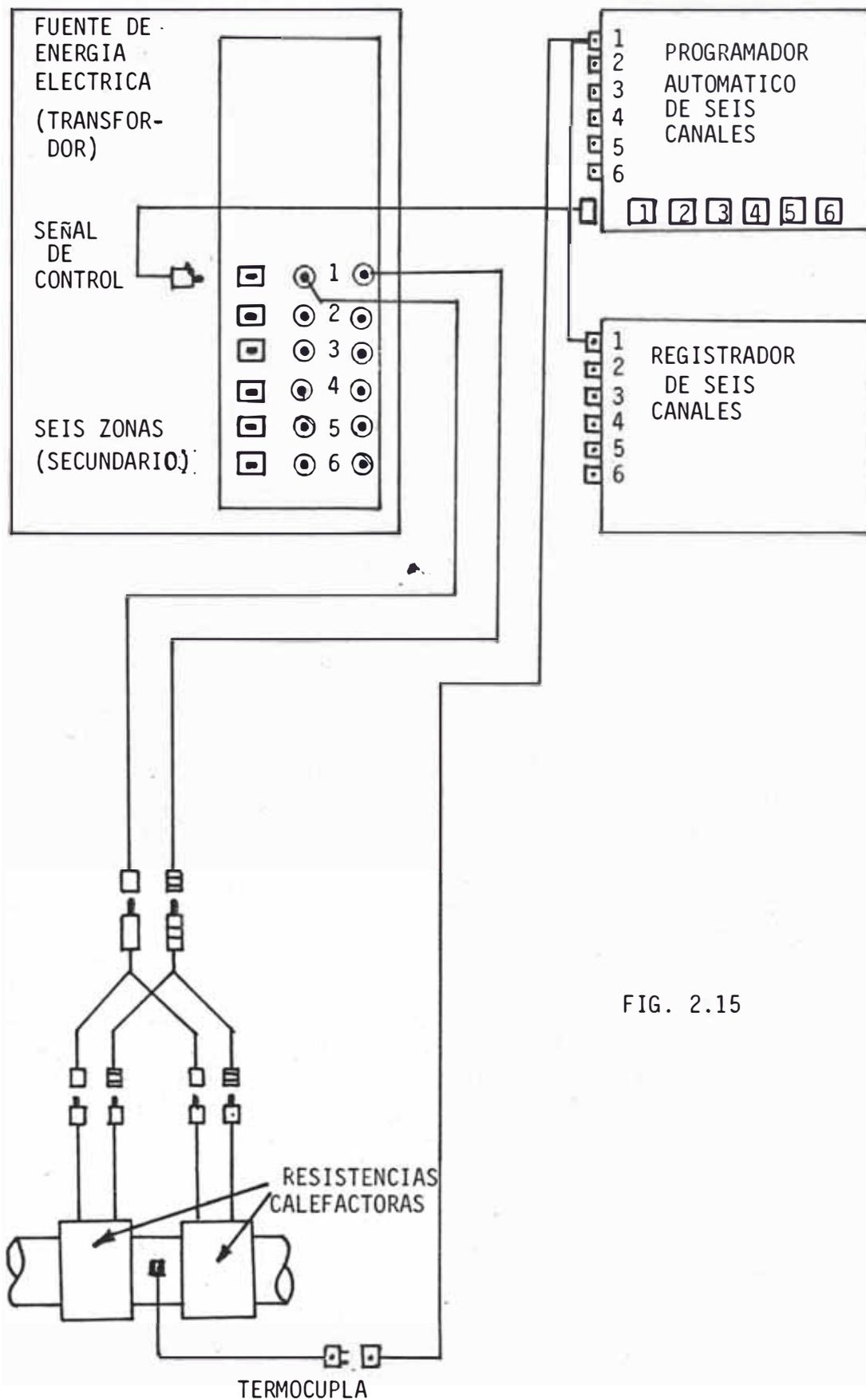


FIG. 2.15

para oleoductos y gasoductos cuyas características se ajusten a las normas antes vista (ASME, AWS).

De los elementos que notamos en el esquema consideramos analíticamente que, el elemento de mayor trascendencia en el sistema, indudablemente es el programador o controlador de seis canales, pero esto no implica de que se deje de lado de resaltar el trabajo mas que complementario diríamos, de elementos cuyo trabajo o función también es imprescindible dentro del sistema; y de quienes nos ocuparemos uno a uno mas adelante. Estos elementos son: el elemento de medición (termocuplas), fuente de energía eléctrica (el transformador), las resistencias calefactoras, y el registrador.

2.2.1.3 Diagrama de Bloques de nuestro Servosistema

Se puede obtener un diagrama de bloques de nuestro sistema interconectando los elementos que participan en el control automático, como lo mostramos en la fig, 2.16,

En donde:

$R(s)$ = entrada de referencia variable

$E(s)$ = señal de error

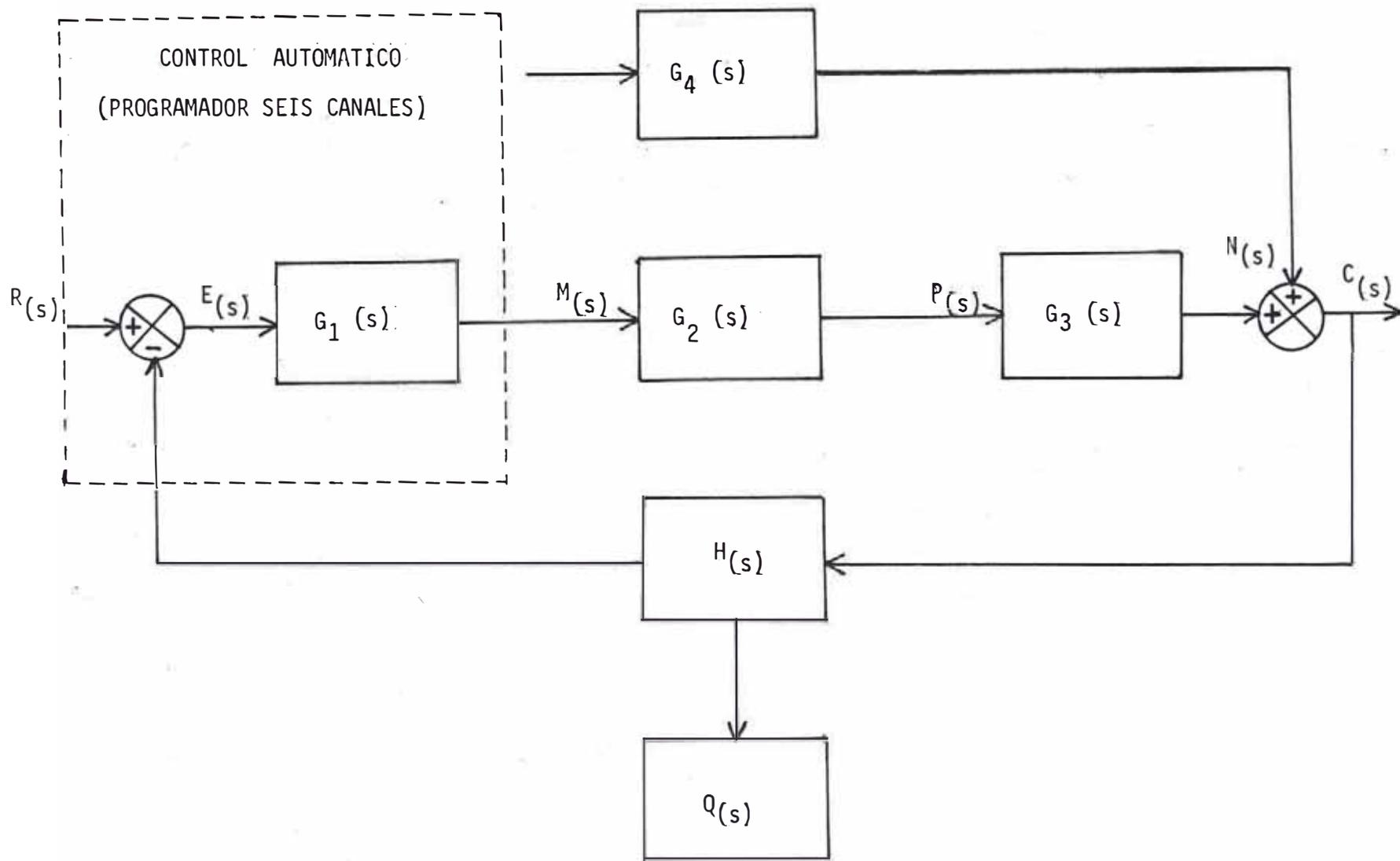


FIG. 2.16

$G_1(s)$ = emisor de la señal de control múltiple para seis zonas.

$M(s)$ = señal de control múltiple para seis zonas.

$G_2(s)$ = bloque receptor de la señal de control, fuente de energía eléctrica.

$G_3(s)$ = receptor de energía eléctrica y convertidor en energía calorífica.

$H(s)$ = elemento de medición

$G_4(s)$ = bloque emisor de perturbación de carga

$Q(s)$ = elemento de registro

$C(s)$ = variable de salida

La ecuación que relaciona la variable de salida $C(s)$, con la entrada de referencia $R(s)$ y la variable de perturbación $N(s)$ está dada por:

$$C(s) = \frac{G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s)}{1 + G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s) H(s)} \cdot R(s) + \frac{G_4(s)}{1 + G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s) H(s)} \cdot N(s)$$

En el sistema de control de procesos, generalmente la respuesta a la perturbación de carga $N(s)$, (que para nuestro proceso específicamente son, las variables que se podrían

considerar despreciables) ejercen influencias mínimas, cuando se toman las precauciones debidas.

En nuestros tratamientos electro térmicos, estas precauciones que debemos de tomar; fundamentalmente radican, en el evitar que el medio ambiente, interfiera sobre el calor que se le esta aplicando a la estructura; para esto, si se efectúa una eficiente protección termoaislante, de la parte que se esta calentando; la respuesta al control del sistema no resultará afectada por la variable de perturbación $N(s)$. Sin embargo, el comportamiento general del sistema, es lo de primera importancia, y viene reflejado en ciertas características; como respuesta a las variables de entrada $R(s)$. Estas las enfocamos en las líneas prosiguientes.

2.2.2 Características de Nuestro Servosistema

En muchos casos prácticos, se especifican las características deseadas de los sistemas de control, en términos de cantidades del dominio del tiempo. Frecuentemente, las características del funcionamiento de un sistema de control, son especificadas en términos de la respuesta transitoria a una entrada escalón unitario, ya que es fácil generarla y suficientemente drástica. (Si se conoce la respuesta a una entrada escalón matemáticamente es posible calcular la respuesta en cualquier entrada).

En nuestro servosistema las características serían:

- Tiempo de retardo, t_d : 0,45 seg,
- Tiempo de crecimiento, t_r : 0,60 seg,
- Tiempo de pico, t_p : 0,84 seg
- Sobreimpulso máximo (por ciento), M_p : 12%
- Tiempo de establecimiento, t_s : 1,23 seg.

En la fig. 2,17 mostramos la gráfica de las respuestas en el tiempo para una entrada tipo escalón unitario.

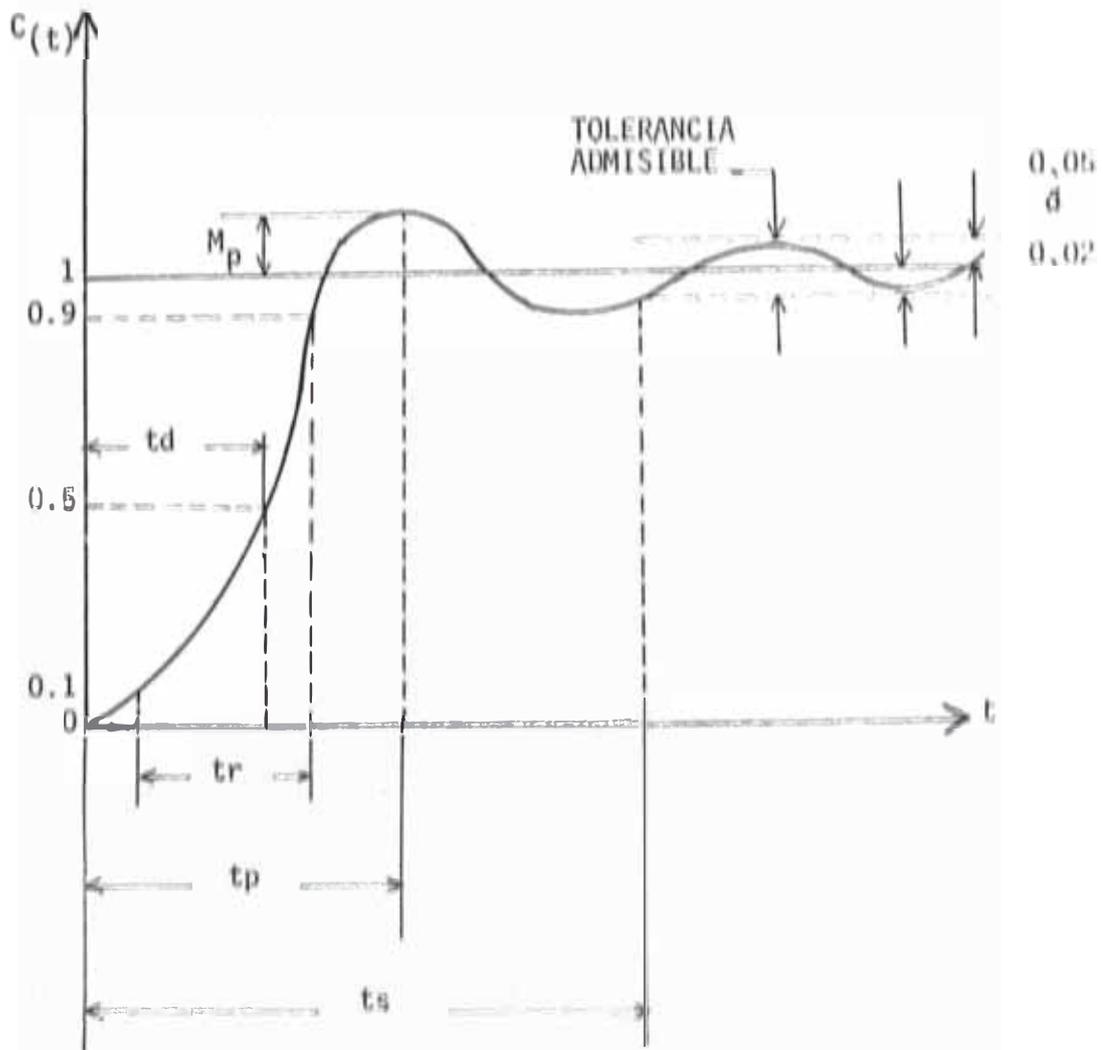


FIG. 2.17

2.3 Sistema de Medición; Termocuplas

2.3.1 Que es una Termocupla;

Es la unión por una extremidad de dos alambres metálicos de diferente composición. Entre los dos extremos libres y por acción de la temperatura, aparece una tensión o f.e.m. cuya magnitud depende de los metales y de la temperatura a la que se expone el punto de unión.

La f.e.m. generada puede medirse en un milivoltmetro conectado en los extremos de la termocupla, que calibrado en grados centígrados o fahrenheit dan un sistema de medición de temperatura de gran practicidad. Se puede aplicar también a este sistema, aparatos registradores y controladores, donde la señal generada y amplificada o no; serán procesadas o transmitidas a comandos o máquinas industriales cuyo funcionamiento está sujeto a variaciones de temperatura.

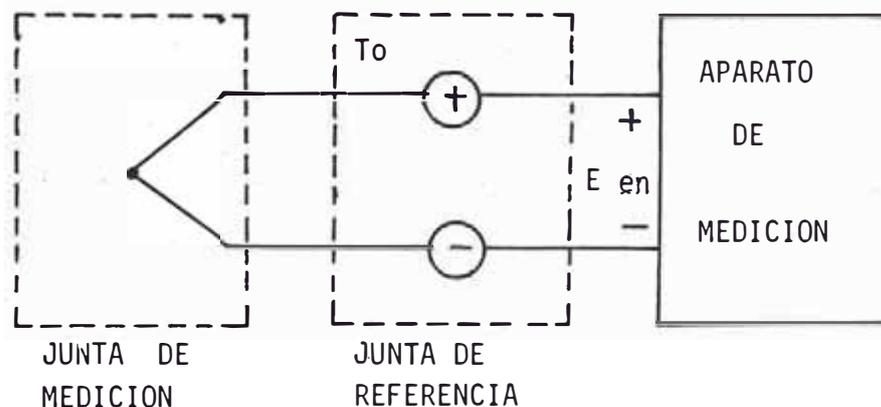
Al punto de unión de los dos metales se denomina "Junta Caliente"; cada rama de la termocupla se designa como positiva y negativa respectivamente. El punto del sistema al cual se conecta el instrumento de medición recibe el nombre de "Junta Fría", y su ubicación puede desplazarse por razones prácticas prolongando cada rama de la termocupla mediante conductores de semejantes características termoeléctricas, convenientemente ais-

lados y reunidos en un cable llamado compensado. Al par de metales cuya soldadura genera la f.e.m. se le da el nombre de termoelemento.

Con el instrumento de medición se determina la diferencia de temperatura entre la junta caliente y la junta fría, lo que exige mantener a esta última lo más constante posible. De aquí la necesidad de disponer la junta fría a distancia tal, que no sea afectada por las variaciones de temperaturas a que se expone la junta caliente.

Para obtener la temperatura absoluta se debe de adicionar a la leída, la temperatura de la junta fría o del ambiente; también se debe corregir directamente en el aparato esta diferencia.

En la fig. 2.18 podemos apreciar un sistema clásico de termocupla.



FIG, 2.18

La termocupla debe de estar aislada por medio de diferentes elementos que depende del rango de temperatura de trabajo.

Para temperaturas bajo los 300°C se usa normalmente aislamientos de plásticos. En el rango de 300°C a 1100°C se usan materiales como asbesto, fibra de vidrio, fibra de cuarzo, etc. En el rango de temperatura de 1100°C a 2200°C se usan aisladores de cerámica.

2.3.2 El Seleccionar nuestra Termocupla

La selección de una termocupla es un compromiso entre muchos factores: costo, disponibilidad, resistencia a la corrosión, salida de f.e.m. de nivel adecuado, y velocidad de respuesta.

Debe asumirse que la f.e.m. de la termocupla debe aumentar continuamente si aumentamos la temperatura sobre el rango de uso, y la temperatura de trabajo.

La selección del tamaño de la termocupla siempre es un compromiso entre la velocidad de respuesta, resistencia mecánica, y resistencia a la corrosión o a la contaminación. El cobre empieza a oxidarse a los 400°C, el hierro sobre los 600°C, el Niquel es débil a los gases con contenido de azufre, etc.

Los alambres de diámetro pequeño dan alta velocidad de respuestas pero se rompen fácilmente, se corroen y desarrollan rápidamente inhomogeneidades debido al trabajo mecánico o la contaminación proveniente de los materiales que ellos contactan.

A continuación en la fig. 2.19 y en las tablas I y II mostramos los datos más útiles e importantes para la selección de una termocupla para alguna aplicación especial y específicamente para la elección de la idónea, para usarla en el servosistema que estamos implementando.

TABLA I: RANGOS UTILES DE TERMOCUPLAS

| MATERIALES DE BASE | °F | FEM (mV) |
|---------------------------|-------------|-----------------|
| Cobre-Constantan | -300 á 750 | -5.284 á 20.805 |
| Fierro-Constantan | -300 á 1600 | -7.52 á 50.05 |
| Chromel-Alumel | -300 á 2300 | -5.51 á 51.05 |
| Chromel-Constantan | 32 á 1800 | 0.0 á 75.12 |
| Platino 10%-Rodio-Platino | 32 á 1800 | 0.0 á 15.979 |
| Platino 13%-Rodio-Platino | 32 á 2900 | 0.0 á 18,636 |
| Platino 30%-Rodio-Platino | 100 á 3270 | 0,007 á 13,499 |

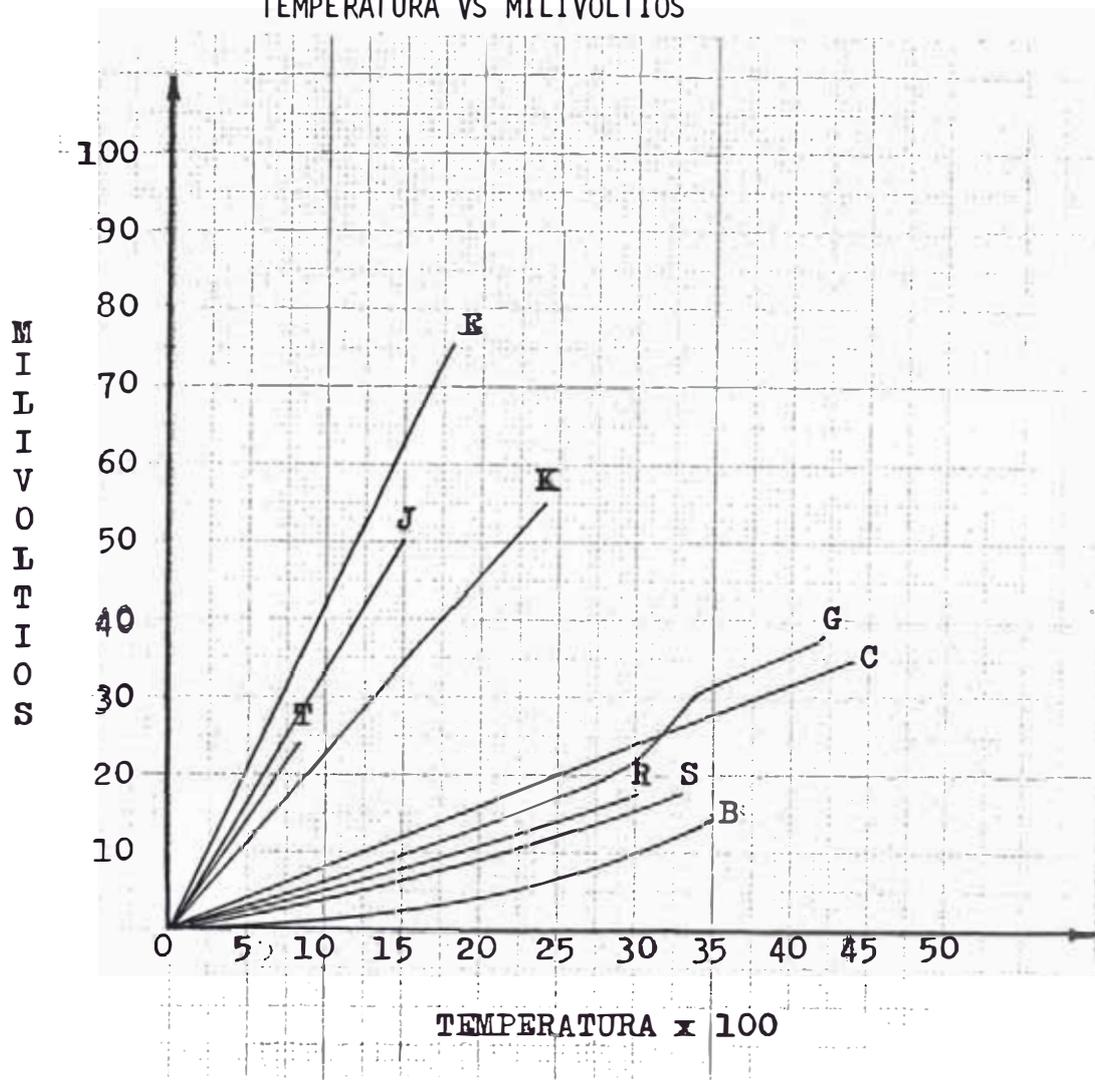
TABLA .II; LÍMITES DE ERROR DE TERMOCUPLAS (ANSI)

| TIPO | RANGO DE TEMPERATURA °F | LÍMITE DE ERROR | |
|------|----------------------------|-----------------|----------|
| | | STANDARD | ESPECIAL |
| J | 32 á 530 | -4°F | -2°F |
| | 530 á 1400 | -0.75% | -0.38% |
| K | 32 á 530 | -4°F | -2°F |
| | 530 á 2300 | -0.75% | -0.38% |
| T | -300 á -75 | --- | -1% |
| | -150 á -75 | -2% | -1% |
| | -75 á 200 | -1.5°F | -0.75°F |
| | 200 á 700 | -0.75% | -0.38% |
| E | 32 á 600 | -3°F | --- |
| | 600 á 1600 | -0.5% | --- |
| S.R. | 32 á 1000 | -5°F | -2.5°F |
| | 1000 á 2700 | -0.5% | -0.25% |

Además de las características fundamentales que hemos podido observar en las tablas y el gráfico es importante mencionar que el tipo de termocupla que se selecciona debe fundamentalmente guardar compatibilidad en cuanto a la f.e.m. (mV) que producirá con los cambios de temperatura y el rango de voltaje para los cuales hallamos calibrado nuestros registradores y controladores del cual dispongamos. Específicamente para nuestro caso debemos de usar la termocupla tipo "K", por cuanto a sus límites de error que posee, el rango de temperatura en el cual vamos a trabajar, y la F.E.M. (mV) que produce, son las características que básica -

GRAFICO PARA TERMOCUPLAS

TEMPERATURA VS MILIVOLTIOS



- T COBRE-CONSTANTAN
- E CHROME-CONSTANTAN
- J FIERRO-CONSTANTAN
- K CHROMEL-ALUMEL
- G TUNGSTENO-TUNGSTENO 26% RENIO
- C TUNGSTENO 5% RENIO-TUNGSTENO 26% RENIO
- R PLATINO-PLATINO 13% RODIO
- S PLATINO-PLATINO 10% RODIO
- B PLATINO 6% RODIO-PLATINO 30% RODIO

FIG. 2.19: TIPOS DE TERMOCUPLAS

mente responden positivamente a las exigencias de nuestro servosistema y se complementan con las características de nuestro registrador y programador de seis canales de quienes nos ocuparemos más adelante.

2.4 Resistencias Calefactoras

Habíamos determinado que el método de calentamiento por resistencias eléctricas es el más idóneo y apropiado para aplicar un tratamiento térmico post-soldadura en las tuberías que son sometidas a soldaduras, para llegar a formar los oleoductos y Gasoductos.

Dentro de nuestro servosistema, es el elemento que se encargará de transformar la energía eléctrica en energía calorífica.

Las temperaturas y las variaciones de temperaturas que necesitamos conseguir en estos tratamientos van a estar estrictamente ligadas con la cantidad de energía eléctrica que logremos transformar en energía calorífica a través de estas resistencias, y de las características intrínsecas de los materiales de los cuales están constituidas éstas.

Para el cálculo de la energía requerida en kW para conseguir un ΔT en nuestros tratamientos electrotérmicos de tuberías, explicaremos la teoría básica en la cual nos apoyaremos.

Los pasos que debemos de seguir son los siguientes:

1. Determinar el volumen del material que se va a calentar.
2. Convertir el volumen en peso

3. Aplicar la siguiente fórmula para conseguir la cantidad de kW-hr que se va a necesitar para alcanzar un T° .

$$Q = \frac{W \cdot C_a \cdot \Delta T^\circ \cdot f_p}{3,412} \quad (1)$$

donde:

Q = cantidad de calor necesitado en kW-hr

W = peso del material que esta siendo calentado en lbs

C_e = calor específico del material BTU/(kW-hr.lbs.°F)

ΔT° = temperatura final que se desea alcanzar menos la temperatura inicial del tratamiento, en °F

f_p = factor de pérdida de calor para piezas que se están calentando con sus respectivos aislamientos, cte.

4. Reducir los kW-hr a kW dividiendo el valor de calor encontrado entre el tiempo en que se desee alcanzar la temperatura máxima.

Estos son los cuatro pasos a seguir para conocer la energía necesaria que tenemos que aplicar o conseguir para alcanzar una temperatura deseada en un determinado período de tiempo. Un ejemplo, nos ilustra la aplicación de esta teoría básica:

Una tubería de 12" de diámetro externo y 8" de diámetro interno, con una longitud a ser calentada de 12", acero de baja aleación (0.29 lbs/in^3 de densidad) será calentado hasta los $1,350^\circ\text{F}$ en 2 horas. Fig. 2.20

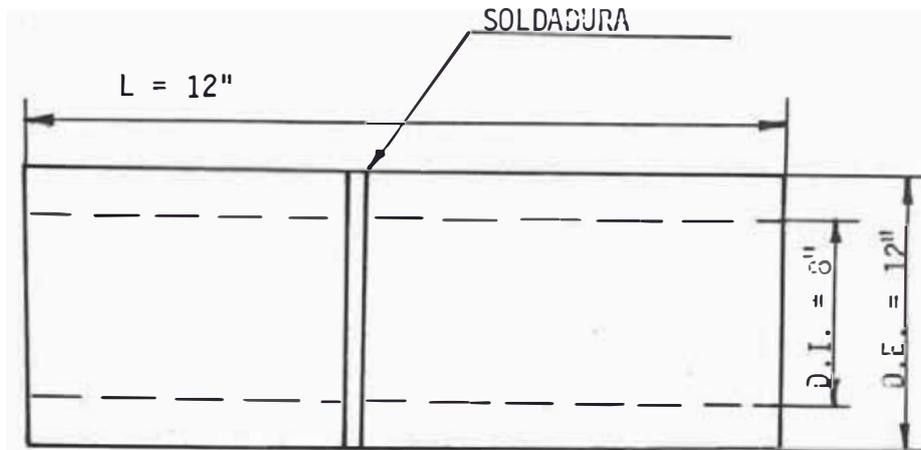


FIG. 2.20

$$\text{Peso (lbs)} = \text{Volumen (pulg}^3) \times \text{Densidad (lbs/pulg}^3)$$

Tenemos que:

$$W = \frac{\pi \times L \times d}{4} (D.E. - D.I.) (D.E. + D.I.)$$

L = longitud de la pieza calentándose 12"

D.E. = diámetro externo 12"

D.I. = diámetro interno 8"

d = densidad del metal en libras por pulgadas cúbicas 0.29

Reemplazando:

$$W = \frac{3.14 \times 12 \times 0.29}{4} (12-8) (12+8)$$

$$W = 219 \text{ lbs}$$

Lo próximo a determinar son los kW-hr aplicando la fórmula (1), pero debemos de tener en cuenta el valor del factor de

pérdida de calor que es 2.4, éste es un valor constante estandarizado dado para metales como aceros al carbono o aceros al cromo molibdeno que se están sometiendo a calor.

$$Q = \frac{219 \text{ lbs} \times 0.12 \text{ BTU/kW-hr.lbs.}^\circ\text{F} \times (1350^\circ\text{F} - 70^\circ\text{F}) \times 2.4}{3412 \text{ BTU/kW-hr}}$$

$$Q = 23.7 \text{ kW-hr} = 24 \text{ kW-hr}$$

Puesto que el programa está previsto para adquirir 1350°F (habiendo partido de una temperatura ambiente de 70°F) en dos horas, tenemos que la energía necesaria será:

$$p = \frac{Q}{T \text{ (horas)}} = \frac{24 \text{ kW-hr}}{2 \text{ hr}} = 12 \text{ kW}$$

De esta forma podemos efectuar el cálculo de la energía necesaria que deberá recibir nuestra resistencia, para generar la suficiente energía calorífica que nos permita alcanzar la temperatura que deseamos en el tiempo preestablecido con anterioridad dentro de nuestro proceso que controla el servosistema que estamos implementando. La energía calorífica que puedan entregar nuestras resistencias calefactoras, de acuerdo a una energía eléctrica recibida depende del material con el cual la confeccionemos, e inclusive de la forma o configuración que le demos. En la tabla I mostramos los materiales más usados para la confección de estas resistencias y sus características relevantes que se deben de tomar en cuenta.

TABLA N°3

TABLE I
ELECTRICAL HEATING ELEMENT MATERIALS

| ELEMENT MATERIAL | NORMAL ANALYSIS | RESISTIVITY | TMP. COEFF. OF | APPROX. MELTING POINT °C | RECOMMENDED OPER. TEMP. | |
|------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------|
| | | at 20°C ohm-cm | RESISTIVITY 0-100°C %/°C | | AIR | INERT |
| NICHROME | 80 Ni-20 Cr | 108×10^{-6} | .0001 | 1400 | 1150 | 1150 |
| KANTHAL® | 74 Fe-22 Cr-5.5Al-1.5Co | 145×10^{-6} | .00013 | 1510 | 1475 | 1375 |
| BAICO® | 70 Ni-30 Fe | 19.9×10^{-6} | .0045 | 1100 | 515 | 800 |
| COPPER | - | 1.73×10^{-6} | .0039 | 1083 | 515 | 800 |
| PLATINUM | - | 10.6×10^{-6} | .001 | 1773 | 1200 | 1500 |
| MOLYBDENUM | - | 5.7×10^{-6} | .0033 | 2625 | 200 | 2200 |
| TUNGSTEN | - | 5.48×10^{-6} | .0045 | 3410 | 150 | 3000 |
| SILICON CARBIDE | - | 0.1* | NEG. & POS. | 1680* | 14* | 1480 |

*AT 1070°C *RAPID OXIDATION TAKES PLACE

Podemos notar de la tabla que los materiales mencionados con servan características propias y valores que los identifican a cada uno de ellos, para ser usados en las condiciones que se le requieran. Para nuestro servosistema, la que reúne las condiciones más apropiadas son las de NICROMIO que son de una aleación de Niquel y Cromo, los porcentajes de Niquel y Cromo pueden variar pero el porcentaje más común para ser usado en nuestro caso es de 70% Niquel - 30% Cromo. La ventaja de esta aleación es justamente su operatividad a altas temperaturas; alta resistividad, y presenta características de resistencia constante con los cambios de temperatura, lo cual habilita a diseñarla para salida de vateaje constante. Existen otros materiales también como el Cobre, Platino, Molibdeno, Tungsteno, y otras aleaciones como las de hierro-cromo-aluminio, y las de Niquel-Hierro, que conservan también ciertas características que son ventajosas en otro tipo de uso. El

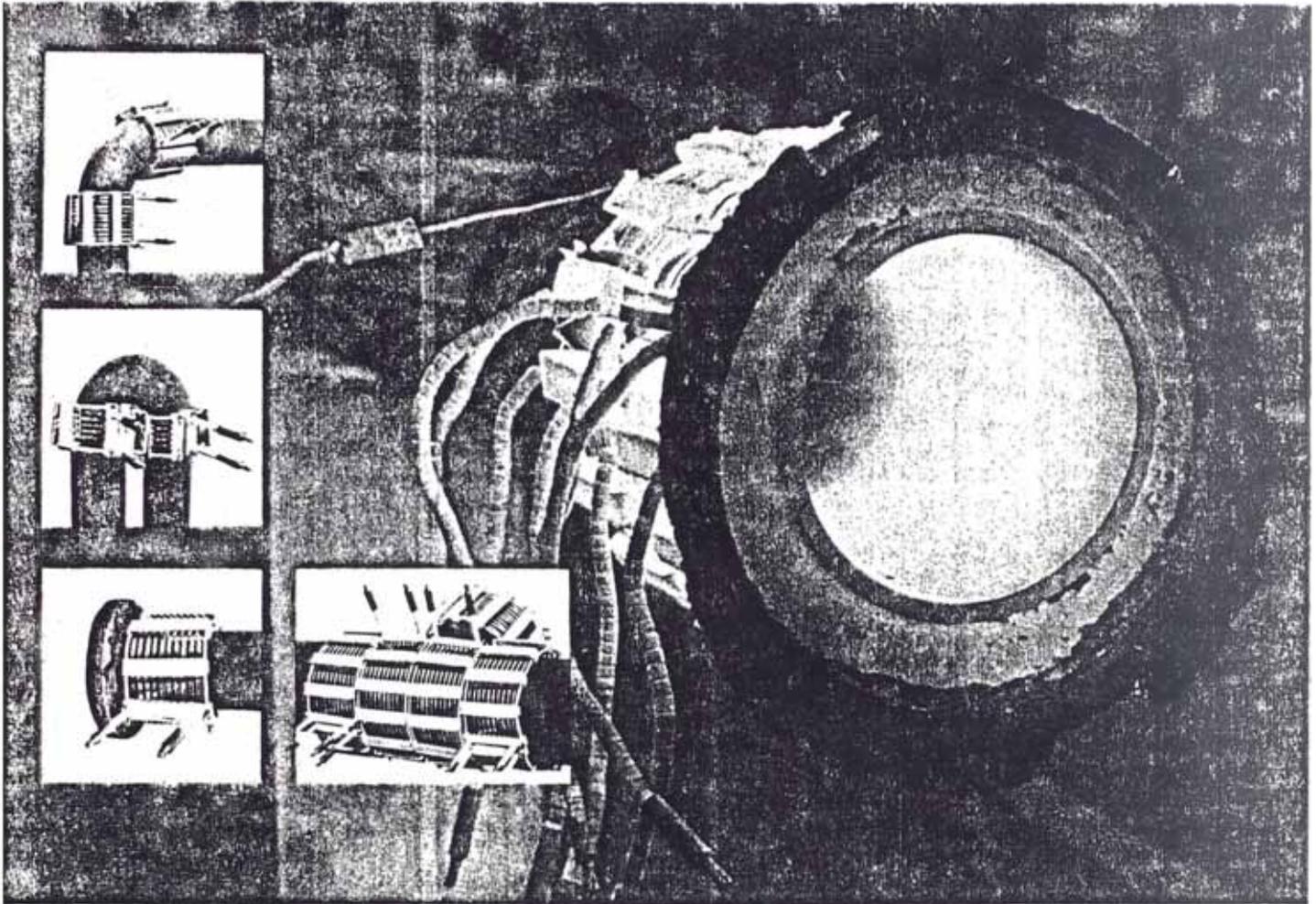
recubrimiento que llevan estas resistencias de Nicromio son generalmente cerámicos por las altas temperaturas que hay que generar ya sea por convección o por radiación.

Adjuntamos informaciones gráficas en las páginas siguientes para complementar nuestra información, de tal forma que podemos tener una idea más formal de como se manufacturan y de las formas más comunes, como circulan en el mercado para ser usadas en el proceso del cual estamos tratando. Se adjuntan también tablas que contienen longitudes, anchos, amperaje, voltaje y kilovataje de las resistencias en sus formas más prácticas en las que han sido diseñadas.

AN
EXOLEC[®]
PRODUCT

RIBBON[®] HEATER

For preheating, stress relieving, normalizing and solution annealing welds at temperatures up to 2250°F (1232°C)



EXOMET[®] INC.

APPLICATION

Ideal for solution annealing stainless steel and high alloy tubes at 2250°F (1232°C). Recommended for use on vessels, heavy wall piping, and temporary furnaces.

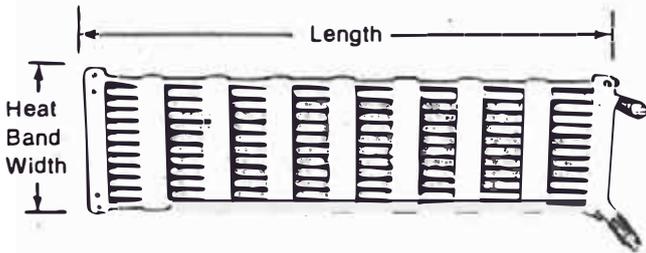
FEATURES

- Heats by radiation-eliminates need for intimate surface contact
- Can be operated off all power supplies between 60 and 480 volts — usable with range of sources
- Can be repaired — long service life
- Self-supporting — no bands required

**AN
EXO-LEC[®]
PRODUCT**

RIBBON[®] HEATER

For preheating, stress relieving, normalizing and solution annealing welds at temperatures up to 2250°F (1232°C)



DESCRIPTION

Ribbon Heaters are made with nickel-chrome ribbon elements held together with ceramic spacers. Available in four standard lengths, and widths of 3" or 6". All pipe sizes from 3" up can be accommodated. Twist-lock connectors provide ease of power connection. Metal fasteners on ends permit multiple heaters to be placed around welds without banding.

| Catalog No. | Type* | Dimensions | | Ratings † | | | | | |
|-------------|-------|-----------------|-------------|-----------|-----|----------|-----|----------|-----|
| | | Heat Band Width | Length | 60 Volts | | 70 Volts | | 80 Volts | |
| | | | | amps | kw | amps | kw | amps | kw |
| 9-14-106 | 3A | 3" (76mm) | 19" (483mm) | 17 | 1.0 | 20 | 1.4 | 23 | 1.8 |
| 9-14-114 | 3D | 3" (76mm) | 23" (584mm) | 20 | 1.2 | 24 | 1.6 | 27 | 2.1 |
| 9-14-107 | 3B | 3" (76mm) | 26" (660mm) | 23 | 1.4 | 27 | 1.9 | 31 | 2.5 |
| 9-14-108 | 3C | 3" (76mm) | 32" (812mm) | 31 | 1.8 | 36 | 2.5 | 41 | 3.3 |
| 9-14-109 | 6A | 6" (152mm) | 19" (483mm) | 37 | 2.2 | 43 | 3.0 | 49 | 3.9 |
| 9-14-115 | 6D | 6" (152mm) | 23" (584mm) | 42 | 2.5 | 49 | 3.4 | 57 | 4.5 |
| 9-14-110 | 6B | 6" (152mm) | 26" (660mm) | 48 | 2.9 | 56 | 3.9 | 65 | 5.1 |
| 9-14-111 | 6C | 6" (152mm) | 32" (812mm) | 62 | 3.7 | 72 | 5.0 | 83 | 6.6 |

† For other voltages KW ratings equals $\frac{.99 \times \text{volts} \times \text{amps}}{1000}$

Single Heater
*Heater Type Fits Pipe Diameter

| | |
|---|----|
| A | 4" |
| D | 5" |
| B | 6" |
| C | 8" |

Please contact EXOMET for a quotation on special sizes.

APPLICATION INSTRUCTIONS

Place heaters so that they are not stacked on top of each other and elements are not in contact with any electrically conductive material. Cover all heaters with blanket insulation. Keep connectors in open air, being careful not to cover them with insulation.

EXOMET INC.

P.O. BOX 647
CONNEAUT, OH 44030
(216) 593-1161

P.O. BOX 1498
MARSHALL, TX 75671
(214) 938-5166

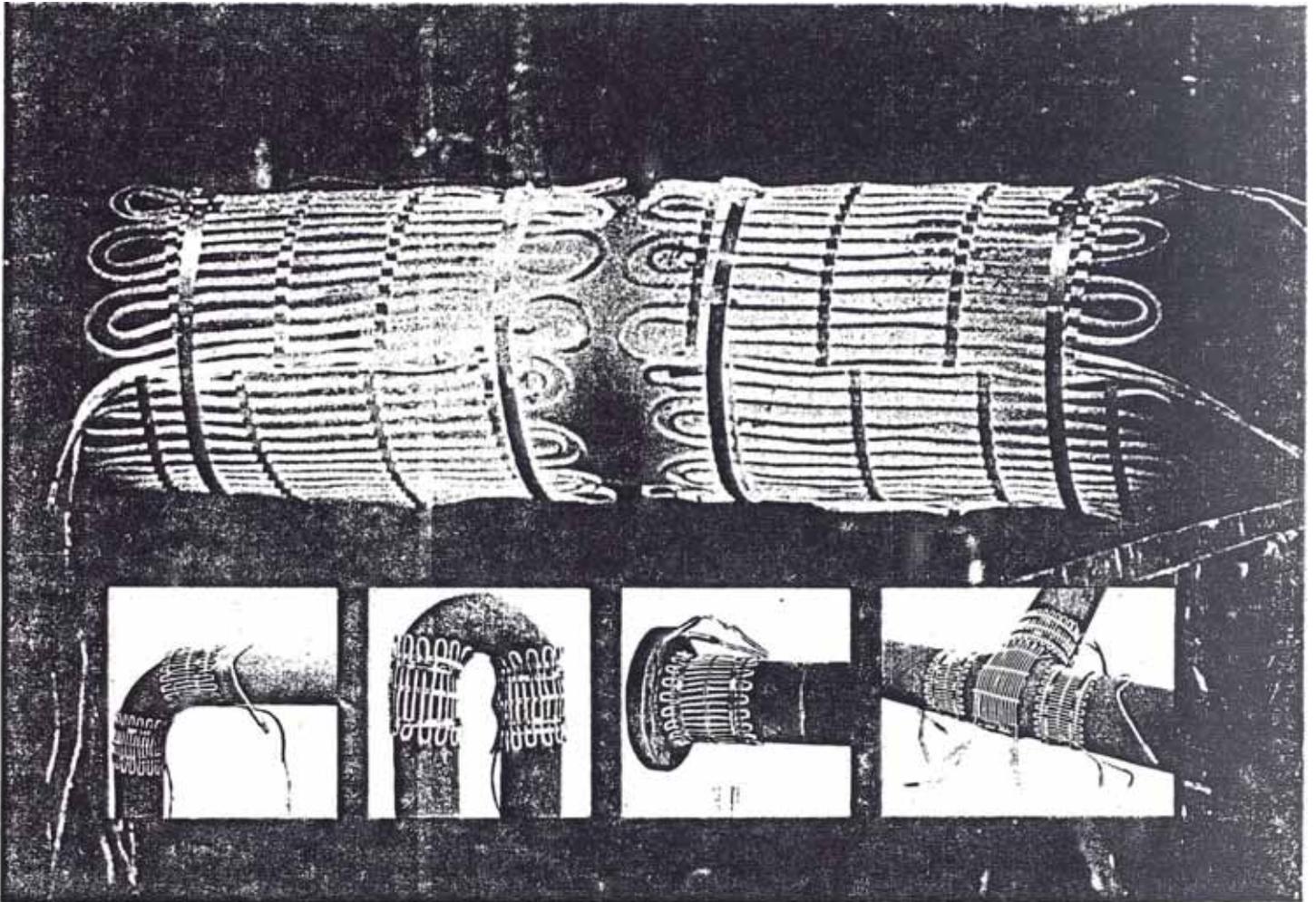
Telex-980-446

AN
EXO-LEC®
PRODUCT

Pretested

*GOLD-FLEX™ BRAIDED HEATER

For preheating and post heat treating welds
at temperatures up to 1925°F (1052°C)



EXOMET INC.

APPLICATION

For use in shop or field to heat weld areas up to 1925°F (1052°C) in sections up to 6" thick on: valves, vessels, headers, nozzles, plates, pipe joints, elbows, flanges, reducers, return bends, tees, as well as various types of structural shapes and weldments.

**You Know Its Pretested — Its Gold!*

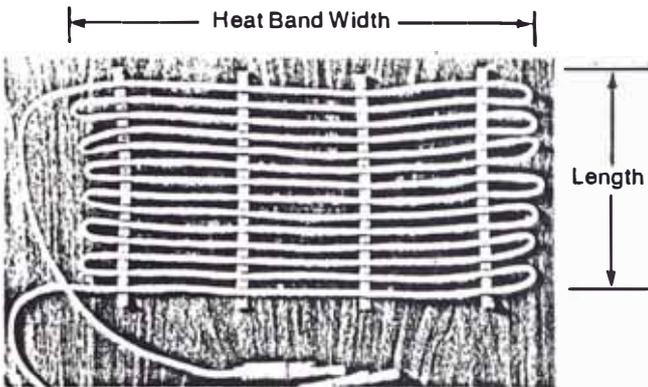
FEATURES

- *Pretested — assures quality and eliminates smoke
- Flexible and light weight — easiest of all heaters to apply
- Maximum cold tail temperature 175°F (80°C) — protects connectors
- Simple connecting device — connects heaters together easily
- Can be used with 60-80 volt AC or DC power source — versatile
- Braid and insulated sheath — prevents accidental contact with element wire

AN
EXO-LEC[®]
PRODUCT

Pretested
GOLD-FLEX^{T.M.} BRAIDED HEATER

For preheating and post heat treating welds
at temperatures up to 1925°F (1052°C)



DESCRIPTION

GOLD-FLEX Braided Heaters are made with non-hygroscopic ceramic fibre sandwiched between nickel-chrome inner element wire and a braided nickel-chrome outer sheath. The ceramic fibre also prevents spiking that causes burn out. The heater can be ordered in a number of different sizes and be formed into almost any desired shape. All heaters are pretested for quality assurance, during which test a gold color results from burning of lubricant oil. The nickel cold tails remain silver in color since the maximum temperature they reach is 175°F (80°C).

Dimensions

Ratings

| Catalog No. | Heat Band | | 70 Volts | | 80 Volts | |
|-------------|------------------|------------------|----------|------|----------|------|
| | Width | Length | AMPS. | K.W. | AMPS. | K.W. |
| 9-25-800 | 4" (101 mm) | 28 1/4" (717 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-25-801 | 5 5/8" (143 mm) | 20 7/8" (530 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-25-802 | 6 7/8" (174 mm) | 17 5/8" (448 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-25-803 | 8 3/8" (212 mm) | 14 5/8" (371 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-25-804 | 8 3/4" (222 mm) | 13 3/4" (349 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-25-805 | 9 3/4" (247 mm) | 12 1/2" (317 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-25-806 | 11 1/2" (292 mm) | 10 1/2" (266 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-25-807 | 12 3/4" (323 mm) | 9 1/2" (241 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-25-808 | 14 3/4" (374 mm) | 8 1/4" (209 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-25-809 | 19 1/2" (494 mm) | 6 1/8" (155 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-25-810 | 1" (25.4) | 120" (3048 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |

Single Heater Fits Pipe Diameter

| | |
|-----|------------|
| 800 | 8" Pipe |
| 801 | 6" Pipe |
| 802 | 5" Pipe |
| 803 | 4" Pipe |
| 804 | Standard |
| 805 | 3" Pipe |
| 806 | Standard |
| 807 | Heavy Wall |
| 808 | Heavy Wall |
| 809 | Heavy Wall |
| 810 | Strip |

APPLICATION INSTRUCTIONS

Place heaters so they do not overlap and are in good contact with the metal. They should be connected in parallel. Cover all heaters with blanket insulator but do not sandwich them between the insulation layers. Keep cold tails in open air uncovered by insulation, and supported so they do not carry the weight of power cables.

EXOMET INC.

P.O. BOX 647
CONNEAUT, OH 44010
(216) 593-1161

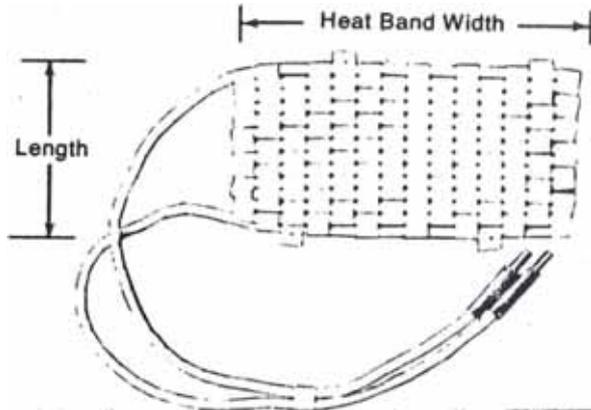
P.O. BOX 1498
MARSHALL, TX 75671
(214) 938-5166

Telex-980-446

AN
EXO-LEC[®]
PRODUCT

EXO-MAT^{T.M.} CERAMIC HEATER

For preheating and post heat treating welds
at temperatures up to 1925°F (1052°C)



DESCRIPTION

Nickel-chrome element wire woven through high quality ceramic beads form an economical, flexible EXO-MAT heater. Individual barrel beads are placed between main body beads to allow greater flexibility, and reduce the possibility of tie wire penetration that could cause failure. The heaters are available in a wide variety of sizes which can be connected together to extend the range of application. Quick connects are attached to the two cold tails. The heaters have a maximum temperature of 1925°F (1052°C), and operate from AC or DC power sources on 60-80 volts.

| Catalog No. | Dimensions | | Ratings | | | |
|-------------|------------------|----------------|----------|------|----------|------|
| | Heat Band Width | Length | 70 Volts | | 80 Volts | |
| | | | AMPS. | K.W. | AMPS. | K.W. |
| 9-15-800 | 4" (101 mm) | 28" (711 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-15-801 | 5 3/4" (146 mm) | 21" (533 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-15-802 | 6 1/2" (165 mm) | 18" (457 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-15-803 | 7 1/2" (190 mm) | 15" (381 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-15-804 | 8" (203 mm) | 14" (356 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-15-805 | 9 3/4" (247 mm) | 12" (305 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-15-806 | 10 1/2" (266 mm) | 11" (279 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-15-807 | 11 1/2" (292 mm) | 10" (262 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-15-808 | 15" (378 mm) | 8" (205 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-15-809 | 19 1/2" (494 mm) | 6" (152 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |
| 9-15-810 | 1" (25.4 mm) | 120" (3048 mm) | 40 | 2.8 | 45 | 3.6 |

Single Heater Fits Pipe Diameter

| | |
|-----|------------|
| 800 | 8" Pipe |
| 801 | 6" Pipe |
| 802 | 5" Pipe |
| 803 | 4" Pipe |
| 804 | Standard |
| 805 | 3" Pipe |
| 806 | Standard |
| 807 | Heavy Wall |
| 808 | Heavy Wall |
| 809 | Heavy Wall |
| 810 | Strip |

APPLICATION INSTRUCTIONS

Place heaters so they do not overlap, and are in good contact with the metal. They should be connected in parallel. Cover all heaters with blanket insulator but do not sandwich them between the insulation layers. Keep cold tails in open air uncovered by insulation and supported so they do not carry the weight of power cables. Banding or tie wires should not touch element wire.

EXOMET INC.

P.O. BOX 647
CONNEAUT, OH 44030
(216) 593-1161

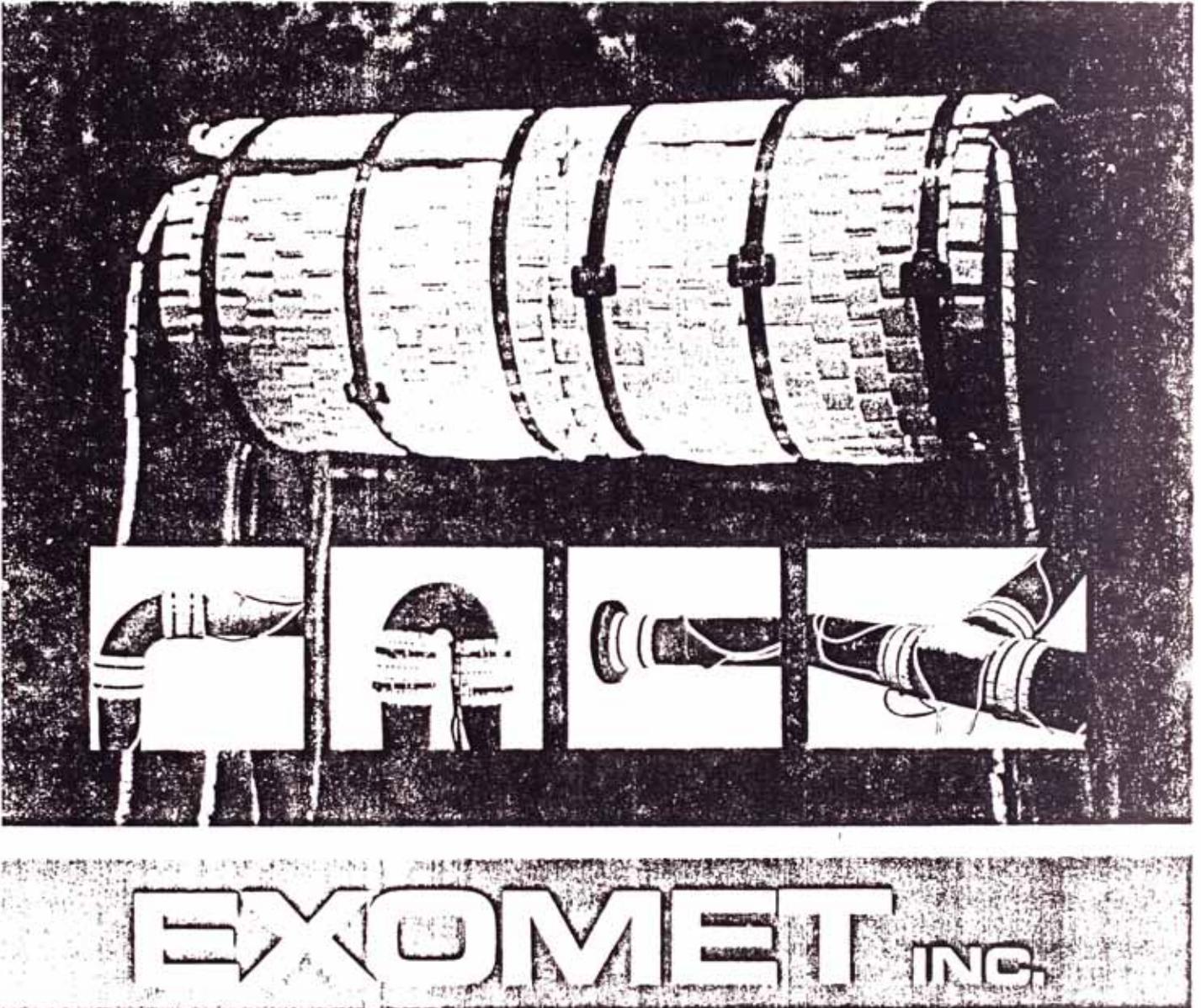
P.O. BOX 1498
MARSHALL, TX 75671
(214) 938-5166

Telex-980-446

AN
EXO-LEC[®]
PRODUCT

EXO-MAT[™] CERAMIC HEATER

For preheating and post heat treating welds
at temperatures up to 1925°F (1052°C)



APPLICATION

For use in shop or field to heat weld areas up to 1925°F (1052°C) in sections up to 6" thick on: valves, vessels, headers, nozzles, plates, pipe joints, elbows, flanges, reducers, return bends, tees, as well as various types of structural shapes and weldments.

FEATURES

- Flexible — can be used in a wide range of configurations
- Maximum cold tail temperature 175°F (80°C) — protects connectors
- Simple connecting device — connects heaters together easily
- Repairable — long service life
- Can be used with 60-80 volt AC or DC power sources — versatile

2.5 Fuente de Energía: El Transformador

Las características de la fuente de energía estarían básicamente fundamentadas en los requerimientos de energía calculados para la carga, que en este caso serán las resistencias calefactoras que utilizaremos, y por las características del elemento programador o controlador automático que vamos a utilizar.

De otra forma, la cantidad de energía o potencia a ser entregada por la fuente, podríamos decir que depende del volumen de material (diámetro, espesor y longitud del ancho de banda de la tubería que vamos a tratar), y del número de resistencias que emplazaríamos sobre ella para cubrir toda la superficie perimétrica de la soldadura y la zona lateral afectada.

Por otra parte, por las características de nuestro programador, nuestra fuente de energía deberá poseer seis zonas o tomas de salida por controlar, cada una con su protección contra cortocircuitos o sobre corrientes que puedan perjudicar la fuente.

Cada una de las seis salidas deberá poseer un contactor cuya bobina de accionamiento sea comandada por el programador en los momentos que de acuerdo a condiciones dadas dentro del programa, se necesite energizar o desenergizar la salida cuya carga resistiva conectada corresponda a la zona que en su debido momento está siendo controlada. Además es necesario que se tenga por cada salida un indicador luminiscente o de cualquier otro tipo, para verificar visualmente cual de las zonas está entregando energía eléctrica o no, de tal forma que podemos comparar con la señalización que le corresponderá en el pro-

gramador y tener evidencias prácticas de que el relay que monitorea la bobina del contactor de su zona respectiva, está energizada o no.

Consideramos que por las cantidades de energía con las cuales se trabajarían normalmente en estos tratamientos (según cálculos hechos en las resistencias calefactoras), podríamos afirmar que un elemento diseñable para cumplir con estos requerimientos sería un TRANSFORMADOR TRIFASICO como fuente de energía para nuestro servosistema.

Para cumplir con los requerimientos mínimos y máximos de carga los valores o características predominantes a tomar en cuenta en el transformador que usaríamos serán:

2.5.1 Pérdidas y Rendimiento

1. Pérdidas por efecto de JOULE en los cobres de los conductores de los devanados.
2. Pérdidas en el circuito magnético.

Teniendo en cuenta que estas pérdidas vienen determinadas muy aproximadamente por:

- a) Ensayo en cortocircuito (P_{cc})
- b) Ensayo en vacío (P_0)

El rendimiento en un transformador en carga vale:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{fe} + P_{cu}}$$

siendo:

P_1 : potencia absorbida en el primario

P_2 : potencia cedida en el secundario

P_{fe} : pérdidas en el hierro

P_{cu} : pérdidas por efecto de Joule

Se define el índice de carga, C , del transformador, en tanto por uno, como:

$$C = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{I_1}{I_{1n}}$$

siendo: I_1, I_2 = intensidades de corriente a un determinado régimen de carga, e I_{1n}, I_{2n} = intensidad nominales.

También recordaremos que:

P_{fe} : prácticamente es constante (independiente del régimen de carga) para una tensión de alimentación fija (U_{1n}), $P_{fe} = P_0$ (vacío)

P_{cu} : varían con el cuadrado de la carga.

$$P_{cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \approx R_{cc} I_2^2 \approx C^2 P_{cc}$$

Luego el Rendimiento a un régimen de carga C , es:

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + C^2 P_{cc}} = \frac{U_2 C I_{2n} \cos \phi_2}{U_2 C I_{2n} \cos \phi_2 + P_0 + C^2 P_{cc}}$$

Por consecuencia debemos de considerar que:

- a) Para un índice de carga determinado ($C = \text{cte}$), n_c empeorará con el factor de potencia de la carga.
- b) Para un factor de potencia fijo ($\cos \phi_2 = \text{cte.}$), n_c varía en función de C . En la fig. 2.24 graficamos estas relaciones.

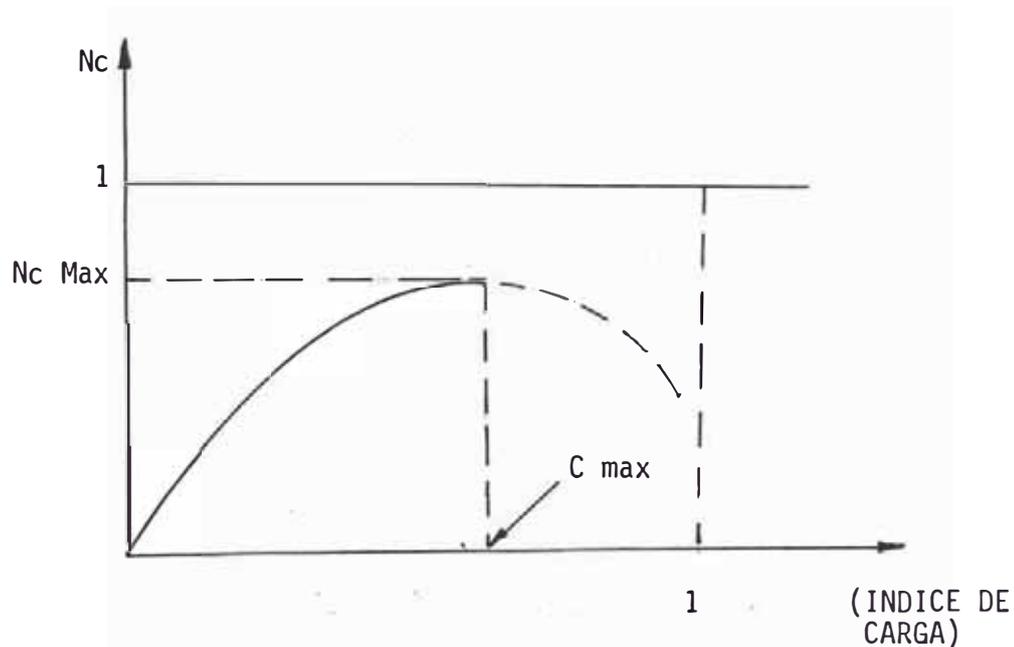


FIG. 2.24

Nos interesa saber el Rendimiento Máximo, $n_{c,m\acute{a}x}$ para un determinado valor de carga ($\cos \phi_2 = \text{cte.}$).

$$n_{c,m\acute{a}x} = \frac{U_2 I_{2n} \cos \phi_2}{U_2 I_{2n} \cos \phi_2 + \frac{P_o}{C} + CP_{cc}}$$

Cuando: $\frac{P_o}{C} + CP_{cc}$ es mínimo

y cuyo mínimo se consigue cuando:

$$P_o = C^2 P_{cc}, \text{ o sea } P_{fe} = P_{cu}$$

es decir:

Cuando las pérdidas en cobre igualan a las pérdidas en el hierro.

Podemos agregar las TOLERANCIAS admitidas por las diversas normas vigentes, por ejemplo CEI 76 y VDE 0532 que debemos de tener muy presentes para las características de nuestro transformador trifásico de nuestro servosistema:

- ◀ Para las pérdidas totales; $\pm 1/10$ de las pérdidas totales.
- ◀ Pérdidas parciales; $\pm 1/7$ de Cu, a condición de no sobrepasar la tolerancia sobre el total de las pérdidas.
- Relación de transformación en vacío, (nominal)
 $\pm 1/200$ del valor especificado, igual a $1/10$ de la tensión de cortocircuito real, a la intensidad nominal, expresada en tanto por ciento.
- Tensión de cortocircuito; $\pm 1/10$ de la tensión de cortocircuito especificada para tal toma.
- ◀ Corriente de vacío; $3/10$ de la corriente de vacío especificada.

Además de las características y tolerancias analizadas, las cuales debemos de tener siempre presente para nuestro transformador trifásico podíamos considerar respecto a todas las configuraciones de transformación que se conocen o usan generalmente, que la configuración

estrella-estrella en donde los valores en capacidad de potencia siempre tengan un valor por encima de la potencia necesaria calculada. Podemos afirmar referencialmente por ejemplo, que en nuestros trabajos de tratamientos electrotérmicos, un caso de los que podríamos llamar límite, sería calentar una tubería que fue sometida a soldadura (tubo a tubo), cuyo diámetro es de 48" y un espesor de 6", sobre la cual necesitaremos poner una temperatura de 1,350°F, en términos de 1 hora de tiempo. Para este ejemplo, podríamos decir en base a cálculos que hiciésemos con el procedimiento anteriormente explicado, necesitaríamos una energía de 268 kW. Esto explica que prudencialmente la capacidad nominal de nuestro transformador deberíamos de elegirla por lo menos por el orden de los 300 kW. Esto nos garantizaría por lo menos seguridad de trabajo. Desde luego que cuando se ejecuten tratamientos sobre soldaduras de tubo con tubo de diámetros menores la capacidad en potencia de nuestro transformador evidentemente podría ser menor.

Mostramos a continuación un diagrama de la fuente de energía que podemos usar en nuestro servosistema, por medio del cual podemos satisfacer los requerimientos principales establecidos para el trabajo sincronizado de los elementos de control que están conformando nuestro sistema, en la fig. 2.25.

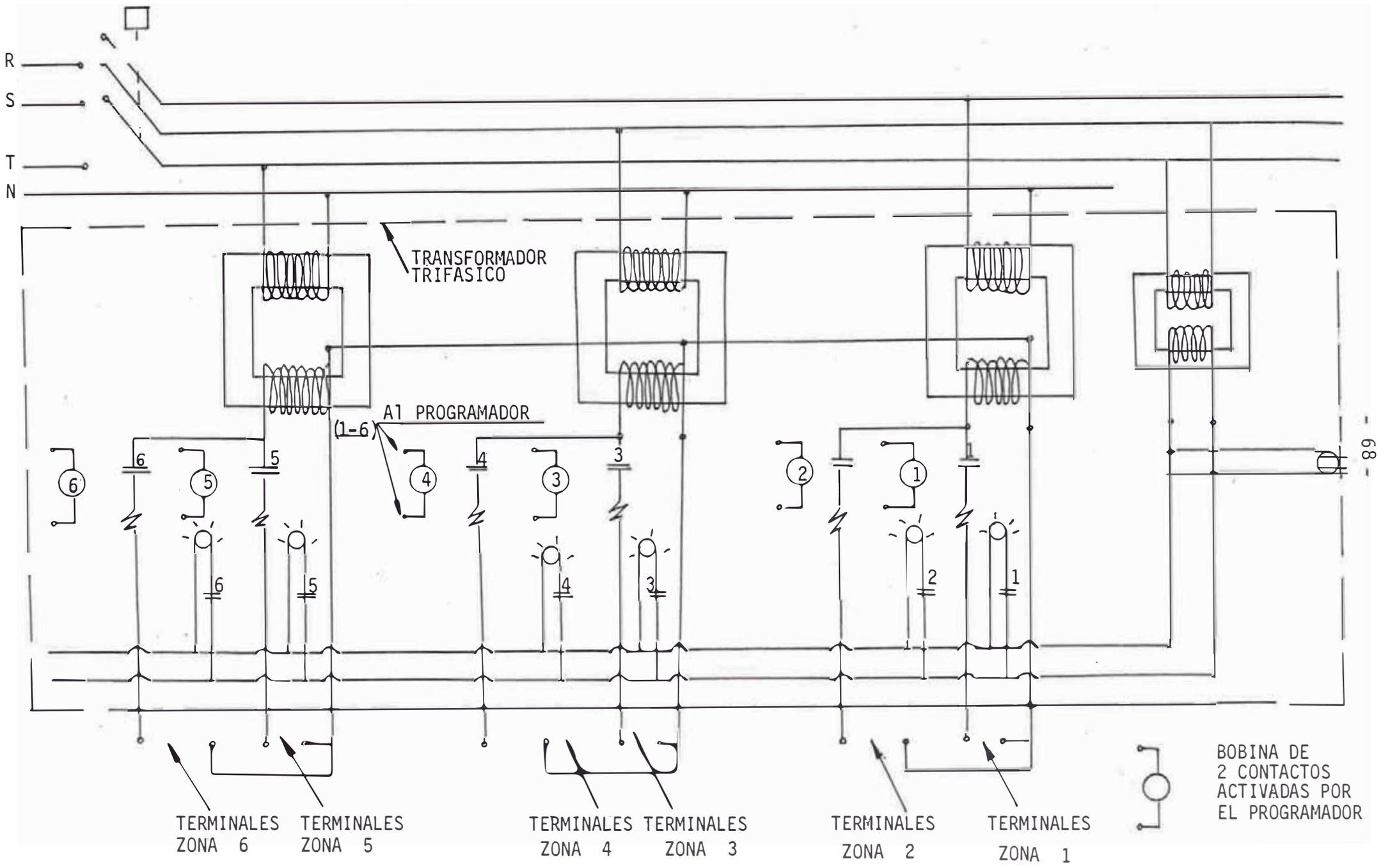


FIG. 2.25

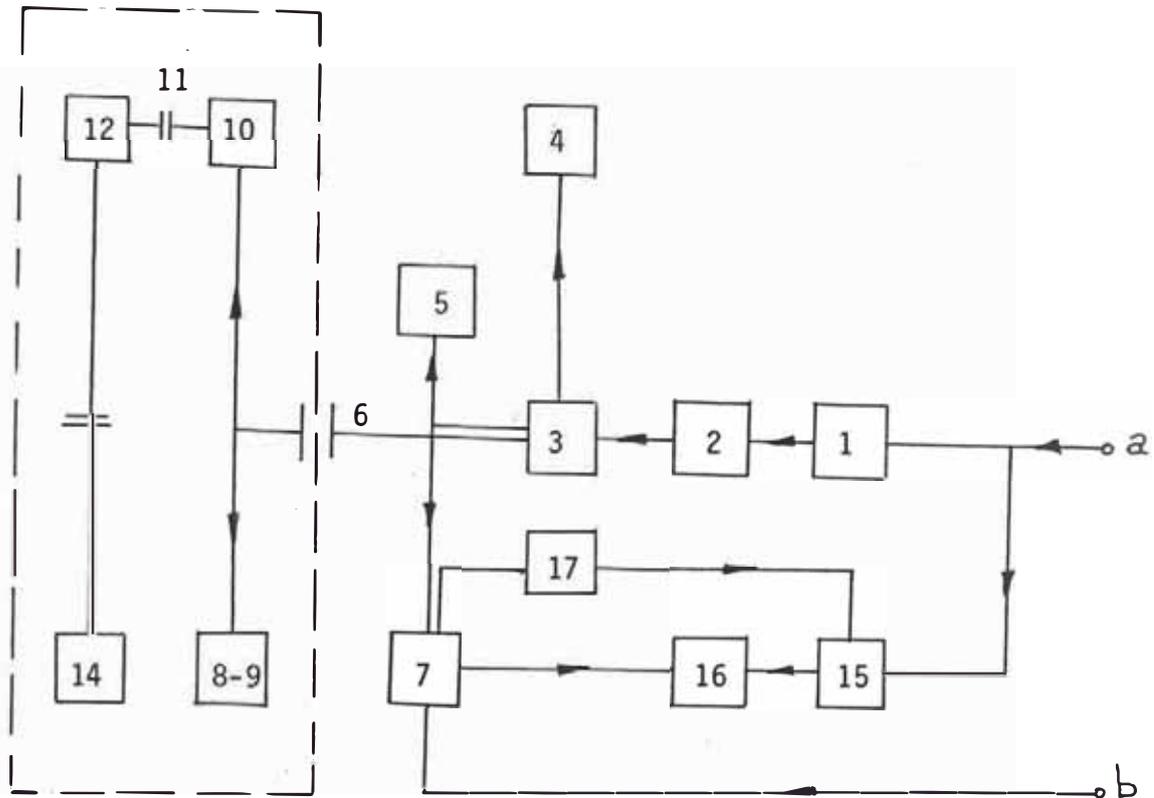
2.6 El Registrador

Es un elemento de mucha importancia dentro de nuestro proceso. Si bien es cierto que no ejecuta o ejerce una función activa dentro del proceso de control, realiza una función pasiva también imprescindible dentro del proceso, porque es el elemento que nos proporcionará la información evidente e instantánea de la variación de los parámetros dentro del proceso; de acuerdo al control que se está ejerciendo. Esta información nos la proporciona a través de un registro que hace sobre un papel tabulado, y que a la postre será el elemento que testificará si el control ejercido sobre el proceso ha sido positivo o no.

En el control de nuestro proceso precisamos registrar valores medidos de hasta seis puntos de medición, para esto necesitamos introducir dentro de nuestro servosistema un registrador que intrínsecamente esté implementado de elementos suficientes que nos conlleven a cumplir con este objetivo.

En la fig. 2.26 mostramos un diagrama de bloques de un modelo genérico, dotado de los elementos que conjuntamente listamos, y del cual hacemos un resumen analítico del modo o manera como trabaja,

El motor sincronizado de impulsión, alimentado de la red de energía eléctrica, hace operar, a través de una transmisión de engranaje, el disco excéntrico que acciona el dispositivo de golpe. De esta manera, el estribo de impresión realiza



- a) Terminales para la red de e.e. (A.C.)
- b) Terminales de medición (seis puntos)
 - 1. Motor sincronizado
 - 2. Dispositivo de transmisión
 - 3. Accionador del dispositivo de golpe
 - 4. Dispositivo de golpe
 - 5. Convertidor de movimiento
 - 6. Embrague
 - 7. Conmutador de los puntos de medición
 - 8. Indicador de los puntos de medición
 - 9. Dispositivos cambiador del cilindro de color
 - 10. Conmutador de la velocidad de papel
 - 11. Cilindro para el avance del papel
 - 12. Embrague de fricción
 - 13. Embrague de fricción
 - 14. Cilindro de arrollamiento
 - 15. Unidad de alimentación
 - 16. Sistema de medida
 - 17. Interruptor de la unidad de alimentación.

FIG. 2.26

una presión cada ciertos segundos en forma periódica (generalmente 10, 15, ó 20 seg.), es decir, imprime un punto sobre el papel de registro. De la unidad designada (3) se deriva la impulsión para un convertidor de movimiento (5) que transmite el desplazamiento intermitente necesario para los conmutadores de los puntos de medición y para el dispositivo de avance del cilindro de pintura, por cuya razón tanto los conmutadores mencionados como los cilindros de pintura estarán en reposo durante la medición y la presión en las particulares posiciones de medición. Entretanto durante la conmutación y el cambio de los cilindros de pintura, el par de contactos (17) corta la unidad de alimentación del sistema de medida, impidiendo una desviación rápida del instrumento indicador.

La propulsión del dispositivo de avance del papel se transmite por un embrague (6), lo que permite el quitado del dispositivo, lo que muchas veces es necesario para cuando se realice un cambio de papel, o para la comprobación de los conmutadores de los puntos de medición. El ajuste de la velocidad deseada del avance del papel se puede realizar intercalando las ruedas dentadas del dispositivo para el cambio de velocidades (10) de acuerdo con el diagrama que mostramos.

El embrague de fricción (12) nos facilita el avance del papel en forma manual, mientras que el bloque (11) efectúa el transporte del papel en forma electromecánica, y por un mecanismo adicional debe de procurar el transporte del papel sin ocasionar resbalamiento de éste; este mismo mecanismo deberá proporcionar la impulsión para el movimiento del cilindro de arrollamiento de papel (14), a través del embrague de fricción

(13). El embrague de fricción deberá también asegurar la tensión necesaria del papel.

El bloque (16) requiere para su establecimiento, de elementos de mucha sensibilidad y que requieren de mucha atención y de los cuales mencionamos los siguientes:

1. Termocupla; la F.E.M. producida por este elemento para cada variación de temperatura, determinará básicamente las características del circuito de medición que tendrá el registrador.
2. Conductor de compensación; para cada tipo de termocupla o termopar sólo el conductor de compensación del material asociado puede o debe de ser usado. Los conductores de compensación pertenecientes a los tipos más particulares de termocuplas son designados por un hilo a color en su aislamiento según lo siguiente:

| | |
|----------|--------|
| Fe-Const | Azul |
| NiCr-Ni | Verde |
| PtRh-Pt | Blanco |

El hilo positivo es designado, de modo estandarizado, por el color rojo.

3. El punto de comparación; Es el punto de conexión entre el conductor de compensación y el conductor de cobre que sale más adelante (alambre de medición). Este punto debe de estar en un espacio donde la temperatura sea aproximadamente constante ya que una demasiada variación de este punto provocará un error de medición del orden de magnitud igual

a la variación de la temperatura.

4. Conductor de medición: Es el conductor de cobre que interconecta el punto de comparación con el aparato de medición (registrador), de una sección transversal adecuada, (1.5 mm²).
5. La resistencia igualizadora: sirve para el ajuste de la resistencia del conductor, o sea del circuito de medición al valor especificado.

Las condiciones mencionadas arriba deben de ser cumplidas para cada circuito (punto) de medición por separado, pero será conveniente tener un punto de comparación (termostato) común. En vez del termostato, se puede emplear con éxito un compensador de junta fría del tipo TTK en la capacidad de punto de la medición.

El Registrador debe de usarse con el tipo adecuado de termocupla para el cual ha sido diseñado su circuito de medición. En la Tabla IV mostramos valores o cantidades que se toman en consideración para el diseño de los circuitos de medición en los registradores.

CUADROS PARA LOS TERMOPARES

| PtRh-Pt | MSZ 11294 | NiCr-Ni | MSZ 11293 | Fe-Konst | MSZ 11292 |
|---------|-----------|---------|-----------|----------|-----------|
| °C | mV | °C | mV | °C | mV |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 0.64 | 100 | 4.04 | 100 | 5.37 |
| 200 | 1.44 | 200 | 8.14 | 150 | 8.15 |
| 300 | 2.32 | 300 | 12.24 | 200 | 10.95 |
| 400 | 3.26 | 400 | 16.38 | 250 | 13.75 |
| 500 | 4.22 | 500 | 20.64 | 300 | 16.55 |
| 600 | 5.23 | 600 | 24.94 | 350 | 19.35 |
| 700 | 6.27 | 700 | 29.15 | 400 | 22.15 |
| 800 | 7.34 | 800 | 33.27 | 450 | 24.99 |
| 900 | 8.45 | 900 | 37.32 | 500 | 27.84 |
| 1000 | 9.60 | 1000 | 41.32 | 600 | 33.66 |
| 1100 | 10.77 | 1100 | 45.22 | 700 | 39.72 |
| 1200 | 11.97 | 1200 | 49.02 | 800 | 46.23 |
| 1300 | 13.17 | | | | |
| 1400 | 14.38 | | | | |
| 1500 | 15.58 | | | | |
| 1600 | 16.73 | | | | |

TABLA Nº IV

CAPITULO III

DISEÑO DEL PROGRAMADOR AUTOMATICO DE SEIS CANALES

3.1 Premisas del Diseño

El diseño de nuestro programador automático de seis canales, es la respuesta inmediata, a la necesidad de tener, un dispositivo de confiabilidad, sobre el cual giren, todas las acciones de con trol que se han de ejercer en nuestro servosistema ya analizado en el capítulo anterior.

Para los efectos de su diseño, es preciso que tengamos en cuenta, el específico conocimiento del alcance y dimensión de los parámetros que debemos de controlar; para poder determinar los elementos que tendremos que asociar o integrar, con el propósito de conseguir tal objetivo.

Nuestro programador o controlador automático, deberá controlar con precisión, el cumplimiento de un ciclo o programa pre establecido, de la variación de la temperatura respecto al tiem po, en los tratamientos electrotérmicos antes analizados. Las características de estos ciclos pre-establecidos comprenden los siguientes pasos o etapas de control:

- La velocidad con que se debe de incrementar la temperatura, para alcanzar un valor máximo prefijado. El valor de esta ve locidad, también debe de ser prefijado antes del inicio del proceso.

- La cantidad de tiempo que deberá permanecer en ese valor máximo de temperatura, la estructura que será calentada.
- La velocidad con que se deberá disminuir la temperatura para alcanzar un valor final prefijado.

Diseñaremos nuestro programador para que tenga la capacidad de controlar temperaturas hasta el orden de los 2000°F como máximo. Las velocidades de incremento y decremento de temperatura a pre fijar, las limitaremos en un valor de 800°F/hr.; y la temperatura final que podamos pre-establecer, podemos prefijarla entre los 800°F y la temperatura ambiente.

El tiempo en que se deberá mantener la temperatura máxima pre fijada podemos programarlo de 1 a 1000 minutos.

Todo esto significa, que debemos de disponer de la propiedad de prefijar estos parámetros a controlar, y que se den cumplimiento a ello, sin que tengamos que participar hasta el final del proceso de control.

Por las características antes mencionadas, podemos decir, que los ciclos que tiene que controlar el programador, presentan la forma gráfica que mostramos en la fig. 3.1 .

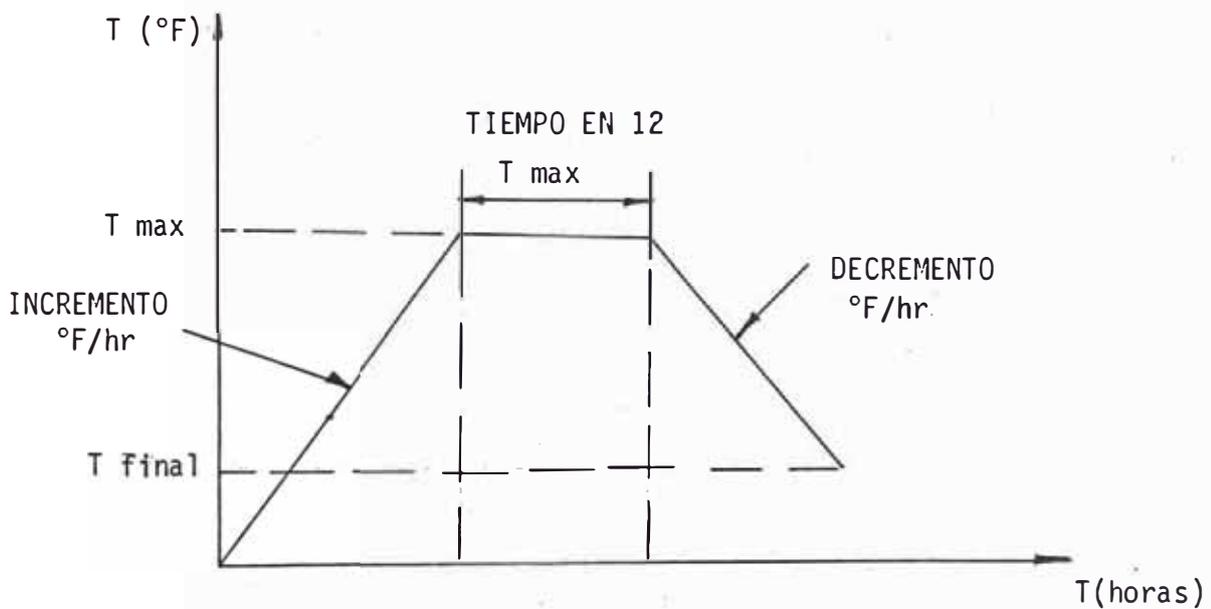


FIG. 3.1

Los valores específicos de los parámetros que tengamos que pre-fijar antes del inicio del ciclo, son programables de acuerdo a normas técnicas que se tengan que cumplir por razones ya estudiadas en capítulos anteriores.

Diseñaremos nuestro programador-controlador, con la capacidad de controlar seis procesos a la misma vez, en las cuales se tenga que dar cumplimiento a un solo programa pre-establecido. Todo esto para darle versatilidad de uso, e incrementar su eficiencia como elemento de control automático. Esto quiere decir que nuestro programador lo dotaremos de una etapa de entradas múltiple(6), y otra de salida de la señal de control, también múltiple(6). De allí que proviene el nombre adicional de seis canales.

Agregaremos a esto, la capacidad de señalar a través de led's, los estados de energización, mantenimiento, o desenergización de cada una de las seis zonas que se estan controlando, durante la realización del programa.

Tomando como premisa, las características que deban de constituir nuestro programador-controlador, efectuaremos una división estructural de él, en partes que tenemos que diseñar, y que al integrarlas como un solo elemento, consigamos como resultado, el dispositivo que nos permitirá, ejecutar el control en forma óptima de los parámetros antes mencionados. Para esto definimos que las partes que deberán constituir nuestro elemento serán:

- Una sección generatriz del programador
- Una sección de control
- Una sección de entrada y otra de salida.

El diagrama mostrado en la fig.3.2 resume la interrelación física que tendrán estas secciones.

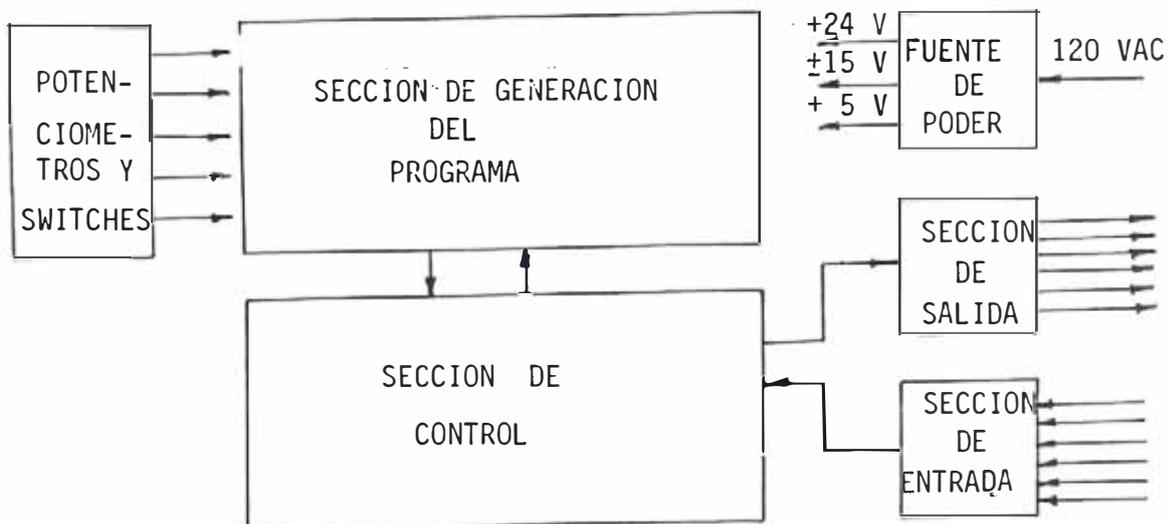


FIG. 3.2

3.2 Sección Generatriz de los Programas

El diseño de ésta parte de la circuitería consistirá de una fuente de corriente, un generador rampa up-down, y un generador de secuencia del programa, que conjuntamente con otros potenciómetros y suiches, generarán el voltaje de control V_C para enviarlo a la sección de control.

El voltaje de control V_C , se generará en forma secuencial a partir de estos elementos, para dar cumplimiento a los valores de velocidad de incremento de temperatura ($V_{Cinc.}$), máxima temperatura a alcanzar ($V_{Ctmax.}$), tiempo de permanencia en la máxima temperatura ($V_{tmx.}$), velocidad de decremento de temperatura ($V_{Cdec.}$), y temperatura final a alcanzar ($V_{Cf.}$). Estos valores pre-establecidos, y que serán convertidos en voltajes, a través de potenciómetros y un voltaje de referencia ($V_{ref.}$), aparecerán secuencialmente en una parte de la sección de control, para ser comparados con los valores amplificados de la señal de termocupla de cada zona, para que así pueda ser emitida la respectiva señal de control hacia las correspondientes zonas que se estén monitoreando.

3.2.1 Fuente de Corriente

Con este nombre denominaremos a la parte de esta sección, en la cual debemos de generar los voltajes y corrientes necesarias, que utilizaremos en el circuito generador de la secuencia de programa, para poder dar cumplimiento a la entrega en la sección de control, de los voltajes de control V_C , de la forma secuencial que lo determine el pro-

grama que deseamos cumplir.

Estos voltajes y corrientes mencionados representaran gradualmente la equivalencia de los valores en $^{\circ}\text{F}/\text{h. r.}$, $^{\circ}\text{F}$, y minutos, de los parámetros que prefijemos para nuestro ciclo o programa que controlará el dispositivo que estamos diseñando.

Consideramos que estos valores en términos de voltaje, los podemos generar a partir de, unos potenciómetros de precisión, una fuente de voltaje de referencia, y complementandos por unos seguidores de voltaje en su salida.

Lo primero que debemos de diseñar es la fuente de voltaje de referencia, que necesitaremos, para que a través de la cual obtengamos los voltajes mencionados, efectuando la conexión de los potenciómetros de precisión en su salida. Esta fuente de voltaje de referencia la podemos diseñar a partir del amplificador operacional integrado LM108A, cuyas características eléctricas las podemos encontrar en los anexos de la parte final del trabajo.

Por lo tanto, configuramos el siguiente diseño de la fig. 3.3

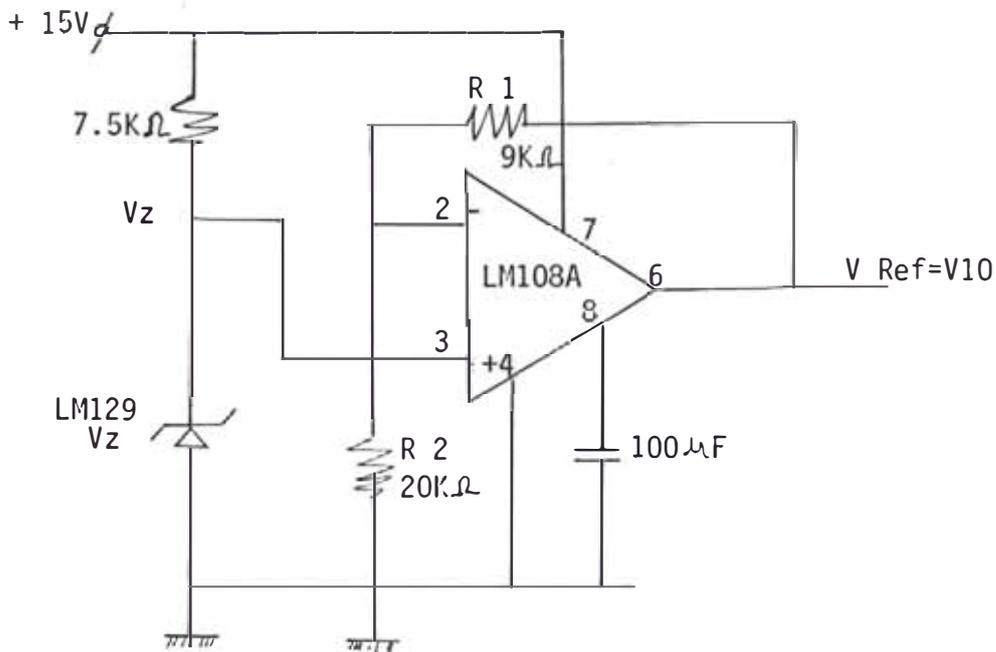


FIG. 3.3

Considerando los límites de los valores de voltaje en la salida que tendría este LM108A, al ser alimentado con +15V. diseñamos el circuito para obtener una $V_{Ref.} = 10V$.

La fórmula que nos relacionaría V_{ref} , con los valores de los otros componentes del circuito sería:

$$\frac{V_{ref} - V_z}{R_1} = \frac{V_z}{R_2}$$

Si usamos un Zener LM129 de 6.9V en este circuito, la relación R_1/R_2 sería igual a $3.1/6.9$ y eligiendo un $R_2=20K$ el valor que obtendríamos de R_1 sería de 9K aproximadamente.

Conocemos que son cinco los parámetros a controlar, dentro de un ciclo o programa a ejecutar:

- Velocidad de calentamiento,
- temperatura máxima,
- tiempo en temperatura máxima,
- velocidad de enfriamiento, y
- temperatura final de control.

Por lo tanto, debemos de disponer de cinco potenciómetros de precisión, de tal forma que podamos extraer de esta V_{ref} , un valor independiente de voltaje para cada parámetro, que deseamos controlar dentro del programa prefijado.

Para fijar un valor en los potenciómetros, de la velocidad de calentamiento ($^{\circ}F/hr.$) y de la velocidad de enfriamiento ($^{\circ}F/hr.$), debemos de considerar de que será $800^{\circ}F/hr.$ el valor máximo que podamos establecer (anteriormente expuesto), y que el rango de voltaje de salida de los potenciómetros podremos variarlo entre $0V$ y $10V$. (V_{ref}). Esto implica de que una ubicación del potenciómetro, en la octava parte de su valor, nos estaría indicando la velocidad de $100^{\circ}F/hr.$ y que debemos de tener $1.25V$ en su salida. Por lo tanto, deberá de existir una impedancia o valor en resistencia de $1.25K$ en el potenciómetro.

Considerando esta variación proporcional, que se deberá de mantener a lo largo de todo el rango lineal del potenciómetro.

ciómetro; el valor de los potenciómetros que debemos de usar serían de 0-10K , que por lo tanto, al desplazar el cursor a lo largo de su gama de valores, nos darían las relaciones equivalentes para cada 100°F/hr. que mostramos en la tabla III.1 .

| | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| °F/hr | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| VDC | 0,00 | 1,25 | 2,50 | 3,15 | 5,00 | 6,25 | 7,50 | 8,15 | 10,00 |

TABLA III.1

De igual forma para fijar un valor en los potenciómetros de temperatura máxima a alcanzar, y en el de temperatura final del control; debemos de considerar que será 2000°F el valor máximo que podamos establecer (anteriormente ex puesto), y el rango de voltaje de salida de los potenciómetros variará entre 0V. y 10V. (V_{ref}). Esto implica de que si también disponemos un potenciómetro de precisión, con rango lineal de 0-10K conseguiremos la relación proporcional de 50 mV/°F en la salida del potenciómetro. Considerando esta variación proporcional que debieramos de conseguir al desplazar el cursor a lo largo de toda su gama de valores, nos darían las relaciones equivalentes que mostramos en la tabla III 2.

| | | | | | | | | | | | |
|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| °F | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1,000 |
| VDC | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 |

| | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| °F | 1,100 | 1,200 | 1,300 | 1,400 | 1,500 | 1,600 | 1,700 | 1,800 | 1,900 | 2,000 |
| VDC | 5,5 | 6,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 | 8,5 | 9,0 | 9,5 | 1,00 |

TABLA III.2

Estas relaciones equivalentes que mostramos, son de mucha importancia, por que son las señales de voltaje que tendremos que conseguir en la salida del amplificador de señal de termocupla y que serán comparadas con la señal que estará entregando el generador de secuencia del programa.

Y por último para fijar un valor en el potenciómetro de "tiempo en la temperatura máxima", debemos de considerar de que será de 100 minutos el máximo valor de tiempo que podamos establecer (anteriormente expuesto), y el rango de voltaje de salida en el potenciómetro variará de 0V. a 10V. (V_{ref}). Esto implica de que si usamos un potenciómetro de precisión, con rango lineal conseguiremos la relación proporcional de 10 minutos por cada 100 mV. en la salida del potenciómetro. Considerando esta variación proporcional que debieramos de conseguir al desplazar el curso a lo largo de toda su gama de valores,

nos darían las relaciones equivalentes que mostramos en la tabla III.3.

| MIN. | VDC | MIN. | VDC | MIN. | VDC |
|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 0,01 | 10 | 0,10 | 100 | 1,00 |
| 2 | 0,02 | 20 | 0,20 | 200 | 2,00 |
| 3 | 0,03 | 30 | 0,30 | 300 | 3,00 |
| 4 | 0,04 | 40 | 0,40 | 400 | 4,00 |
| 5 | 0,05 | 50 | 0,50 | 500 | 5,00 |
| 6 | 0,06 | 60 | 0,60 | 600 | 6,00 |
| 7 | 0,07 | 70 | 0,70 | 700 | 7,00 |
| 8 | 0,08 | 80 | 0,80 | 800 | 8,00 |
| 9 | 0,09 | 90 | 0,90 | 900 | 9,00 |

TABLA III.3 ✓

Conociendo ahora el trabajo que ejecutarían cada uno de los potenciómetros, añadiríamos un seguidor de voltaje por cada uno de ellos, de tal forma que podamos conseguir entregar al generador rampa, como al circuito generador de secuencia de programa, los voltajes de los potenciómetros pero con pequeñas corrientes de consumo, que nos generaría el seguidor de voltaje, debido a su alta impedancia de entrada.

El seguidor de voltaje que usaremos en nuestro diseño es el LM110, cuyas características eléctricas están en los anexos añadidos al final del trabajo. La configuración final de nuestra fuente de corriente la mostramos en la fig. 3.4

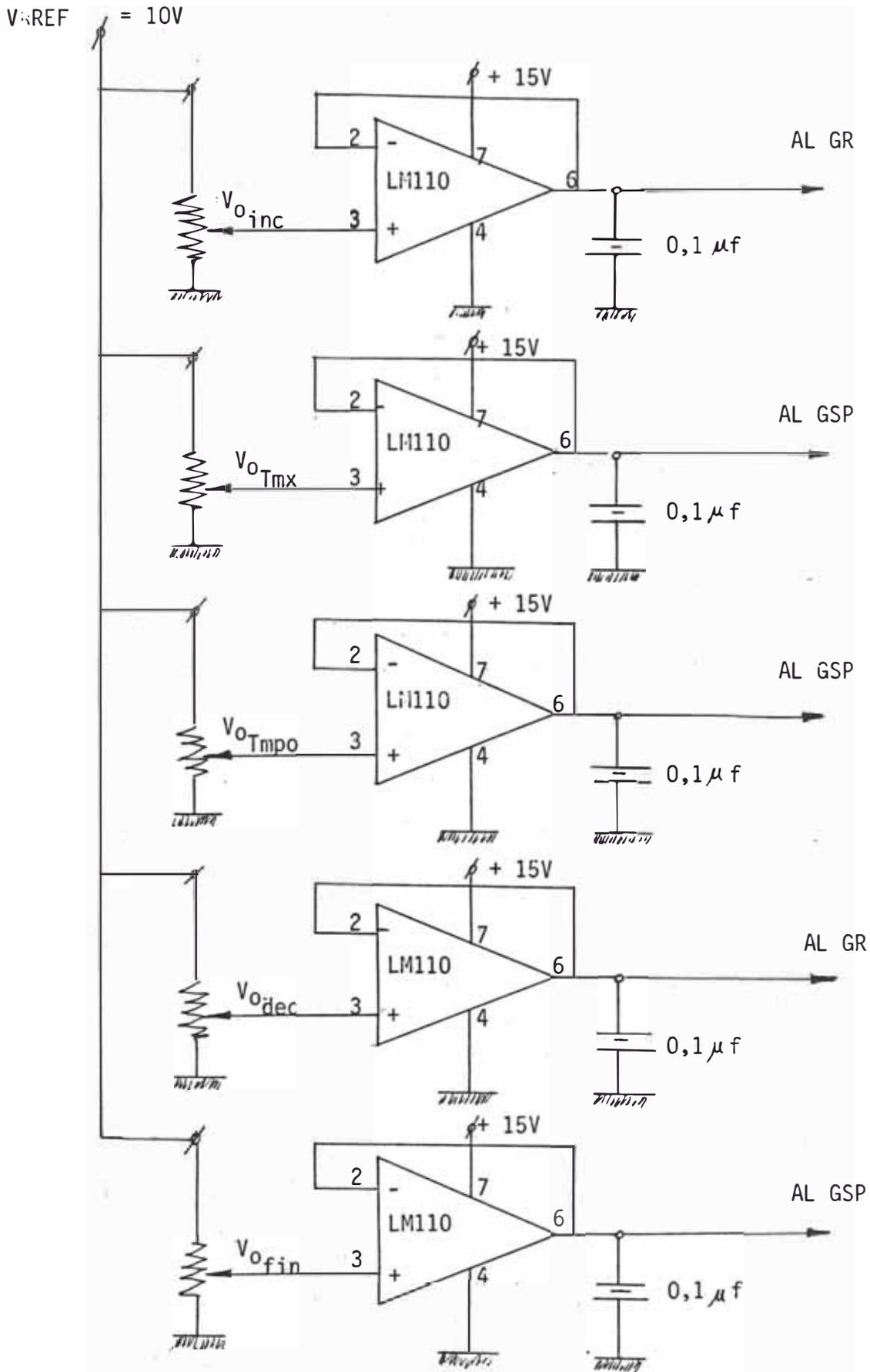


FIG 3,4

3.2.2 Generador Rampa

Específicamente, este elemento generará los respectivos voltajes de control V_c , para cada valor de la velocidad de calentamiento y de enfriamiento que hayamos establecido en el programa. Estos valores del voltajes de V_c serán llevados por el generador de secuencia de programa hacia el acondicionador de señal de termocupla para su comparación respectiva.

Para esto debemos de tener en cuenta, de que para cualquiera de los valores de la velocidad de calentamiento o enfriamiento que pre-establezcamos según la tabla III.1; tendremos que generar de control V_c , que varien con respecto al tiempo, y que tomen los valores de la tabla III.2. Todo esto nos dice que la salida de voltaje del elemento que tenemos que diseñar, tendrá la característica de una función rampa ascendente-descendente. Esta salida de voltaje en forma de rampa ascendente, será para valores de las velocidades de calentamiento; y será en forma de rampa descendente para valores de velocidad de enfriamiento.

Para generar este tipo de salida de voltaje que varíe con el tiempo, es preciso que diseñemos un circuito que ejecute una conversión análoga a digital, y por consecuencia una digital a análoga, de tal forma que haciendo los ajustes necesarios en la parte digital, podamos conseguir la salida analógica que necesitamos; en función de una entra

da de voltaje pre-establecido para el programa.

En la parte de conversión A/D que necesitamos, tendremos que usar un elemento cuya salida varíe directamente proporcional a los voltajes de entrada. En este caso estos voltajes de entrada que suministraremos a este elemento, serían los valores provenientes de la fuente de corriente, y que son consecuencia directa de las velocidades de calentamiento y enfriamiento que hemos pre-establecido en los correspondientes potenciómetros.

El diseño de un Convertidor de voltaje a frecuencia (CVF), nos proporcionará las características que deseamos conseguir.

Podemos utilizar el LM331 Precisión voltage to frequency converter; configurado en el diseño que mostramos en la fig. 3.5

Las características eléctricas y diagramas esquemático del LM331 los mostramos en los anexos de la parte final de este trabajo.

En este circuito la frecuencia de salida esta dada por la ecuación:

$$F_o = \frac{V_{in}}{2.09} \cdot \frac{R_s}{R_L} \cdot \frac{1}{R_t C_t}$$

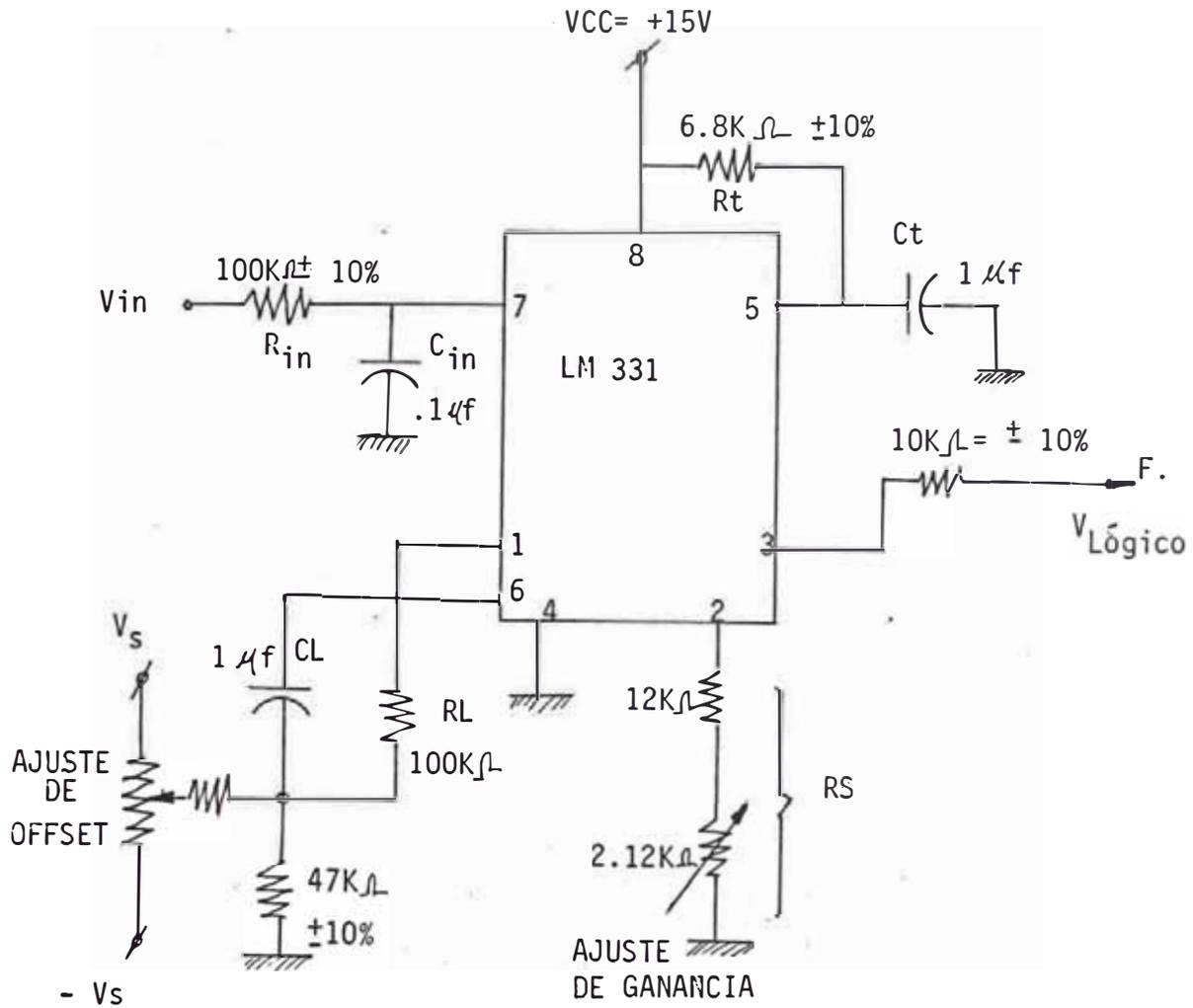


FIG. 3.5

Por lo anteriormente estudiado en la parte referente a la fuente de corriente y voltaje de referencia, conocemos que el rango de voltaje dentro del cual variará V_{in} será de 0v. hasta 10v. ($V_{ref.}$).

Elegimos valores para R_s , R_L , y C_t de tal forma que prudentemente sean acequibles a los bajos consumos de corriente de estos elementos integrados y que podamos tener una relación más simplificada de la ecuación que rige en

el circuito. Los valores que hemos calculado son los siguientes:

$$R_s = 12 \text{ K en serie con un potenciómetro de } 0\text{K} - 10\text{K}$$

$$R_L = 100 \text{ K}$$

$$R_t = 6.8 \text{ K}$$

$$C_t = 1\mu\text{f.}$$

El potenciómetro en serie con la resistencia de 12K , al ubicarlo en un valor de 2.12K ; conseguimos una relación frecuencia-voltaje que nos quedaría de la siguiente manera:

$$F_o = 10 \times V_{in}$$

Esto indica que para un rango de voltaje de entrada V_{in} entre 0v. y 10v. , tendremos variaciones en la frecuencia del tren de pulsos de la salida, que van a variar entre 0Hz. y 100Hz.

Para conseguir ahora, una variación análogica de voltaje de salida V_c , que sea proporcional al voltaje de entrada, precisamos convertir este tren de pulsos en una señal análógica; por lo tanto, es preciso que se disponga dentro del diseño, de un conversor digital analógico; pero antes de efectuar esta conversión debemos de acondicionar la frecuencia con que se están dando estos pulsos, a valores que pueden ser cuantificados, y de tal manera que antes de entrar al conversor D/A sepamos el valor en voltaje que se esté generando por cada pulso que esté entrando en

él, en cada unidad de tiempo.

Presentamos un conversor D/A de 8 bits, como el elemento que nos facilitará la consecución de los voltajes de control V_c ; dado a que en su salida se irán presentando valores en forma directamente proporcional al número de pulsos que esten ingresando en su entrada. La ecuación que relaciona el voltaje de salida del conversor por cada bit o pulso que ingrese en él, (todo esto respecto a un voltaje de referencia) es la siguiente:

$$V_o = V_{ref} \left(\frac{A1}{2} + \frac{A2}{4} + \dots \dots \dots \frac{A8}{256} \right)$$

Usaremos un voltaje de referencia de 10v. para el conversor D/A y ajustaremos a 250, el número máximo de pulsos que podrán ingresar a nuestro conversor D/A; de tal forma que esto implica que obtendremos $10v./250 = 40 \text{ mV.}$ de incremento en el voltaje de salida del conversor; por cada bit que ingrese en él. La mayor o menor frecuencia con que ingresen estos pulsos o bits, determinará la mayor o menor pendiente de la rampa que se generará en la salida.

Los dispositivos que proponemos para el arreglo de nuestro conversor D/A son: el LM1408 Converter D/A y el LF 351 OP-AMP; emplazados de la forma que mostramos en el diágrama de la fig.3.6 Las características eléctricas y sus diágramas de interconexión interna de estos dispositivos, los mostramos en los anexos que presentamos en la

parte final de este trabajo:

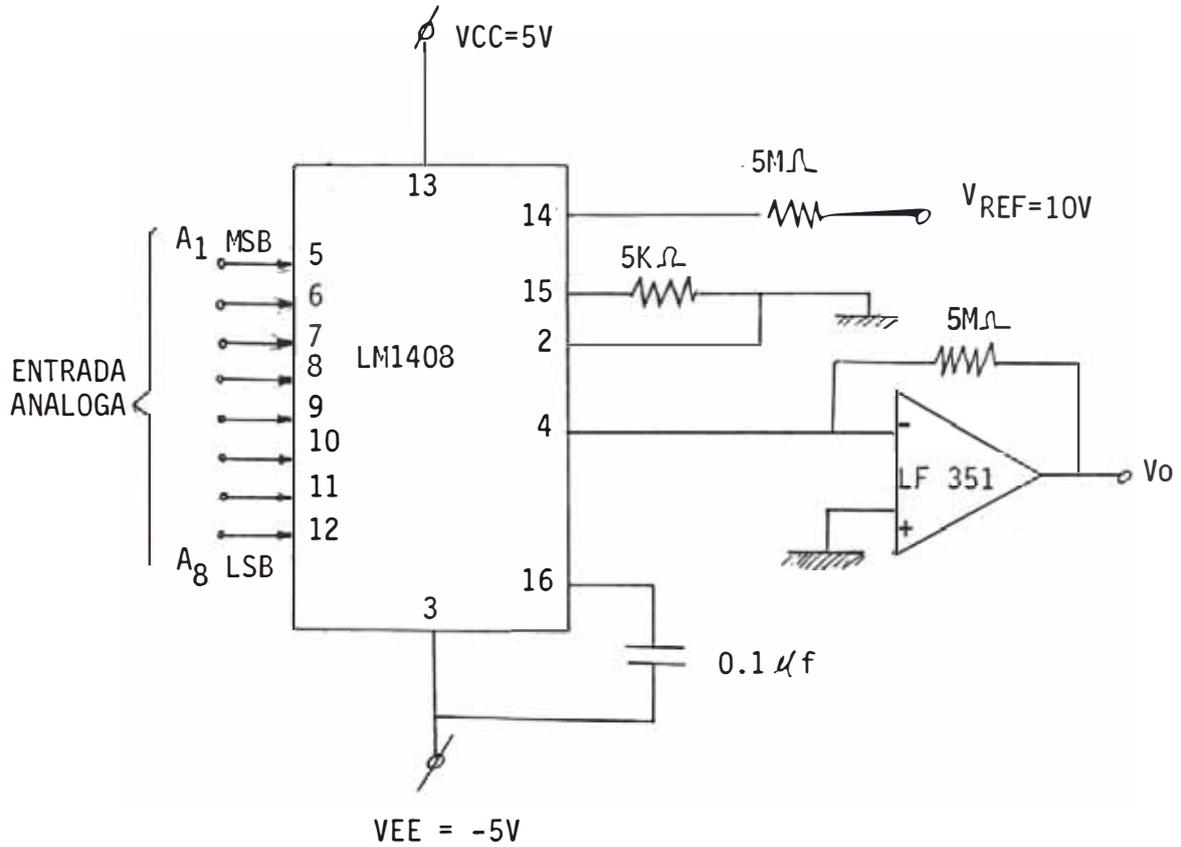


FIG. 3.6

La rampa de mayor pendiente que se generará en la salida de este circuito, será producto de haber pre-establecido un mayor valor de velocidad de calentamiento o enfriamiento para el programa; y las rampas de menor pendiente son para los casos inversos.

Los pulsos generados en nuestros CVF es necesario que sean cuantificados, de una forma tal que cuando se de pa

so a un voltaje correspondiente a una velocidad de calentamiento en el CVF, la cuenta sea ascendente; y cuando se de paso a un voltaje correspondiente a una velocidad de enfriamiento la cuenta de pulsos sea en forma descendente. Esto lo conseguiremos con un contador binario reversible, que deberá tener la capacidad para contar hasta $2^8 = 256$ pulsos o bits, para estar en compatibilidad con el elemento a quien tiene que proporcionarle la cuenta (convertor D/A).

Ahora bien, la frecuencia máxima a la cual debe de contar este contador binario reversible, estaría dada por los límites de nuestros parámetros de control antes fijados; llegar a alcanzar 2000°F (10v. según tabla III.2) a la máxima velocidad de calentamiento que es de 800°F/hr . (10v. según tabla III. 1). Los 10v. que corresponden a esta velocidad máxima generarían en la salida del CVF una frecuencia de 100 Hz.

Esto implica que para alcanzar los 2000°F , a una velocidad de 800°F/hr se emplearán 9000 segundos. De igual forma podríamos aplicar los mismos principios de cálculo cuando se quiere descender de una temperatura máxima a un valor mínimo, empleando la máxima velocidad de enfriamiento.

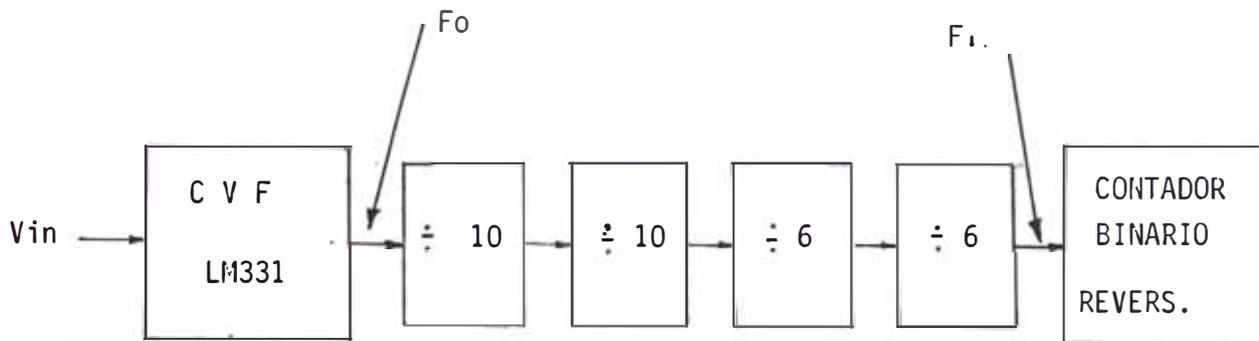
Por lo tanto, nuestro contador binario reversible; en su entrada tiene que tener la capacidad límite, de que sean

contabilizados 250 pulsos en 9000 segundos. Esto originaría que para estos valores máximos, la frecuencia con que deberían de aparecer los pulsos en la entrada del contador sería $250/9000 = 1/36$ pulsos o bits por segundo; para que consigamos aumentos de 40mV. cada segundo en la salida de nuestro conversor D/A, o lo que es lo mismo, por cada bit o pulso que cuente nuestro contador, también se conseguirá una disminución de 40mv/. por cada bit que cuente nuestro contador en forma descendente.

Conociendo que el valor máximo de frecuencia que obtenemos en la salida de nuestro CVF es de 100 Hz. ; y para que en la entrada del contador tengamos la frecuencia de $1/36$ Hz es necesario que utilicemos una etapa divisora de frecuencia del orden de $1/3600$; que lo podemos conseguir a partir de dos divisores por 10 y dos divisores por 6. Esta etapa divisora de frecuencia la usaremos entre la salida del CVF y la entrada del contador.

Para valores menores de velocidad de calentamiento o enfriamiento que establezcamos en el programa, esta etapa divisora no perjudicará en nada los valores de salida del conversor D/A, puesto que la relación voltaje de entrada y frecuencia de salida del CVF es directamente proporcional.

En la figura.3. 7 , esquematizamos la relación entre los elementos que anteriormente hemos descrito.



$$F_o = V_{in} \times 10 \text{ (Ht)}$$

$$F_i = \frac{F_o}{3,600}$$

FIG. 3. 7

La aplicación de un ejemplo nos demostrará y nos aclarará el panorama, de tal forma que podamos notar, que al usar los dispositivos antes mencionados nos proporcionarán los resultados esperados..

Supongamos que queremos establecer un programa, en el cual deseamos incrementar la temperatura de un proceso a razón de 600°F/hr., para alcanzar una temperatura de 9000°F.

Si establecemos en el potenciómetro de velocidad de calentamiento el valor de 600°F/hr.; automáticamente estamos ubicando un voltaje de 7.50V. (tabla III.1) en la en

trada del CVF en cuya salida tendríamos un tren de pulsos con la frecuencia de:

$$F_o = V_{in} \times 10 = 7.5V. \times 10 = 75 \text{ Hz.}$$

Después de nuestra etapa divisora de frecuencia y antes de la entrada de nuestro contador reversible; la frecuencia de nuestro tren de pulsos sería de : $75/3600$ Hz.; esto implica que tienen que transcurrir $3600/75$ segundos, para que sea contado cada pulso o bit en el contador binario reversible.

Sabemos que el V_o en la salida del conversor D/A se incrementa en 40mV por cada pulso que se cuenta en la entrada del contador binario reversible. Cuando hayan transcurrido 30 minutos (1800 segundos) se habrán contado $1800/48$ pulsos, por lo tanto, en la salida del conversor D/A tendremos $(1800/48) \times 40mV. = 1500mV. = 1.5V.$; lo cual según nuestra tabla III.2, es el voltaje que corresponde a una temperatura de 300°F.

Si hacemos un análisis lógico y matemático del valor que debemos de alcanzar con esa velocidad de incremento de temperatura al cabo de los 30 minutos, vemos que estamos en lo correcto.

De igual forma cuando hayan transcurrido 90 minutos (5400 segundos) se habrían contado $(75/3600) \times 5400$ pulsos; lo cual implica que en la salida de nuestro conversor D/A

tendremos $(75/3600) \times 5400 \times 40\text{mV.} = 4500\text{mV.} = 4.5\text{V.}$; lo cual según nuestra tabla III.2, es el voltaje que corresponde a una temperatura de 900°F . De igual forma se demuestra lo del ejemplo anterior.

Podemos concluir, que de las relaciones dadas, que rigen en nuestro generador rampa, la gráfica que mostramos en la fig.3.8 , representa la relación de transferencia que se generará para valores de velocidades de calentamiento que prefijemos en nuestro programa. Y en la gráfica que mostramos en la fig.3.9 , representa la relación de transferencia que se generará para valores de velocidades de enfriamiento que prefijamos también en nuestro programa.

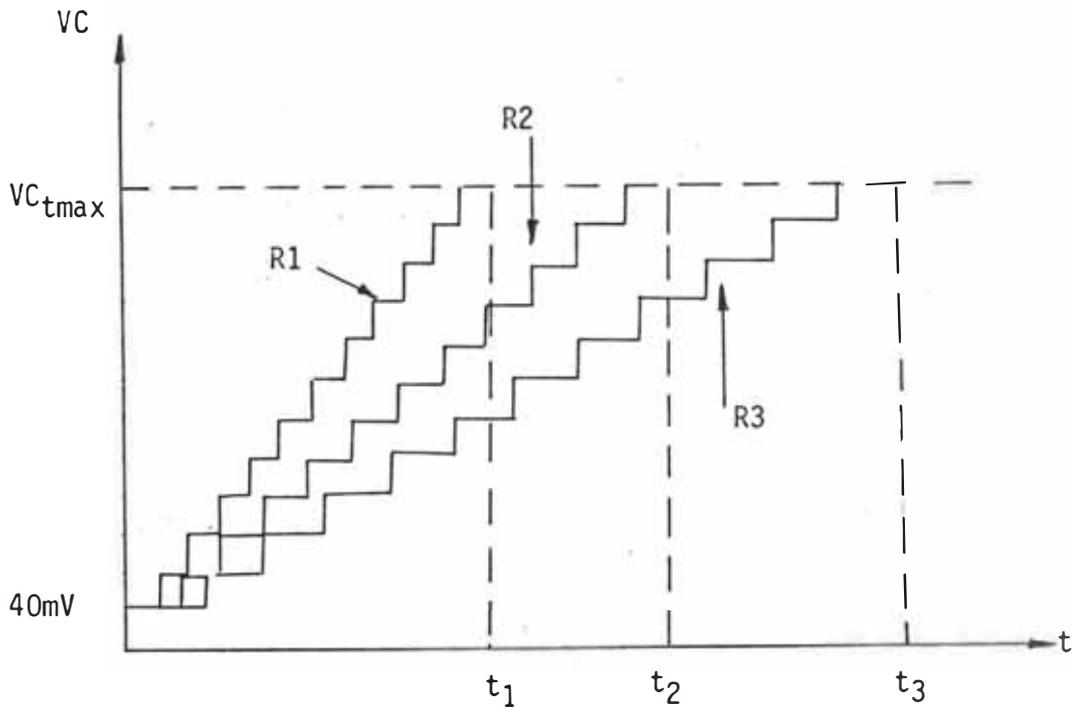


FIG. 3.8

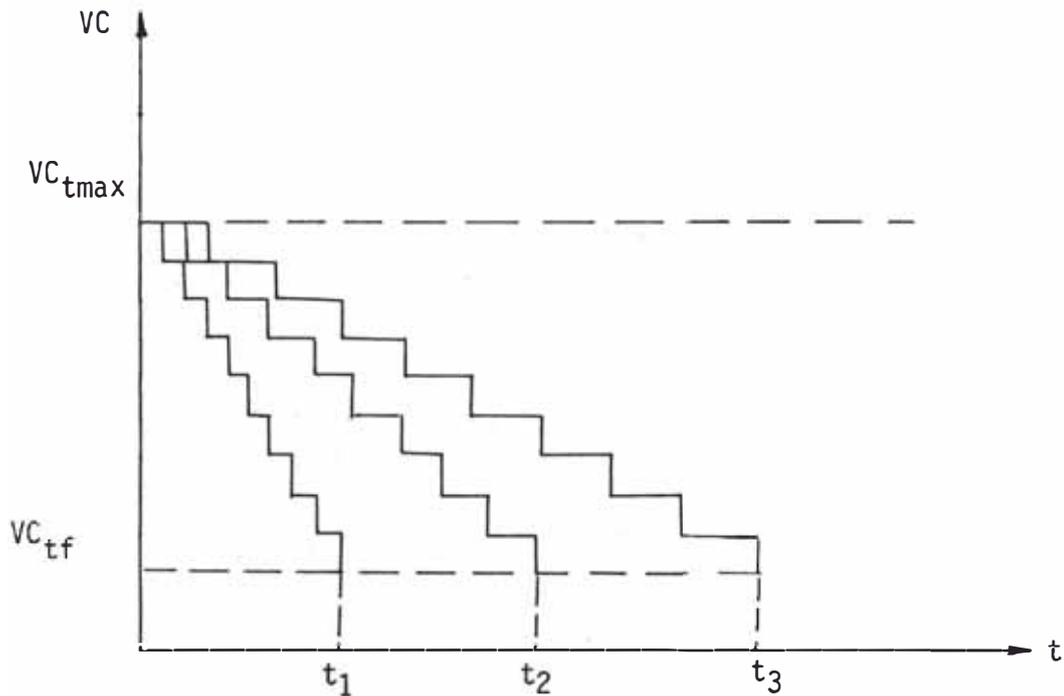


FIG.3.9

En la fig. 3.8 , podemos notar que las tres rampas, han alcanzado la misma temperatura final, pero en tiempos diferentes, o mejor dicho en los tres casos, fueron programados valores de velocidades de calentamiento diferentes.

En la rampa R_1 , se pre-estableció una velocidad de calentamiento mayor que en R_2 y R_3 , para alcanzar la misma temperatura máxima. Podemos ver que se ejecutó la misma cantidad de incrementos de los 40mV.; es decir la misma cantidad de bits o pulso fueron contados, pero a frecuencias diferentes o en unidades de tiempos diferentes, lo que implica tácticamente el haber programado velocidades de calentamiento diferentes que originarán variaciones de

Las características eléctricas del SN7490 las indicamos en los anexos que adjuntamos en la parte final de este trabajo.

Los divisores por 6 los obtenemos a partir del SN7492A dándole la configuración que mostramos en la fig.3.11, las características eléctricas de este dispositivo estan en los anexos de la parte final de este trabajo.

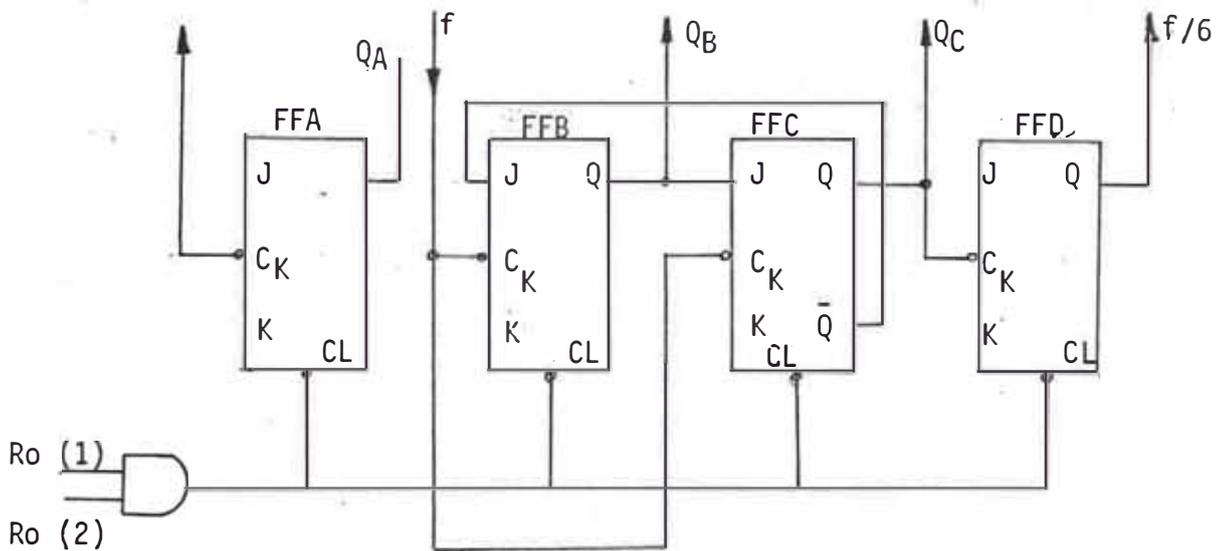


FIG.3. 11

Como contador binario reversible de 8bits, podemos emplear cuatro integrados SN74106 Dual J-K Master-Slave flip-flops with clears and presets; y adicionalmente al contador debemos de usar un 8-bit Bistable Latches SN74100 con el propósito de retener la cuenta del contador binario, durante todo el tiempo que se tenga que mantener la temperatura en su máximo valor preestablecido, hasta ser habilitado por el timer 555 de la sección de generación de secuencia de programa. Inmediatamente después de ser habi-

litado estos latches, empezará la cuenta regresiva o descendente del contador binario, según sea la velocidad de enfriamiento pre-establecida para el programa.

El diagrama final de nuestro circuito generador rampa lo mostramos en la fig.3.12

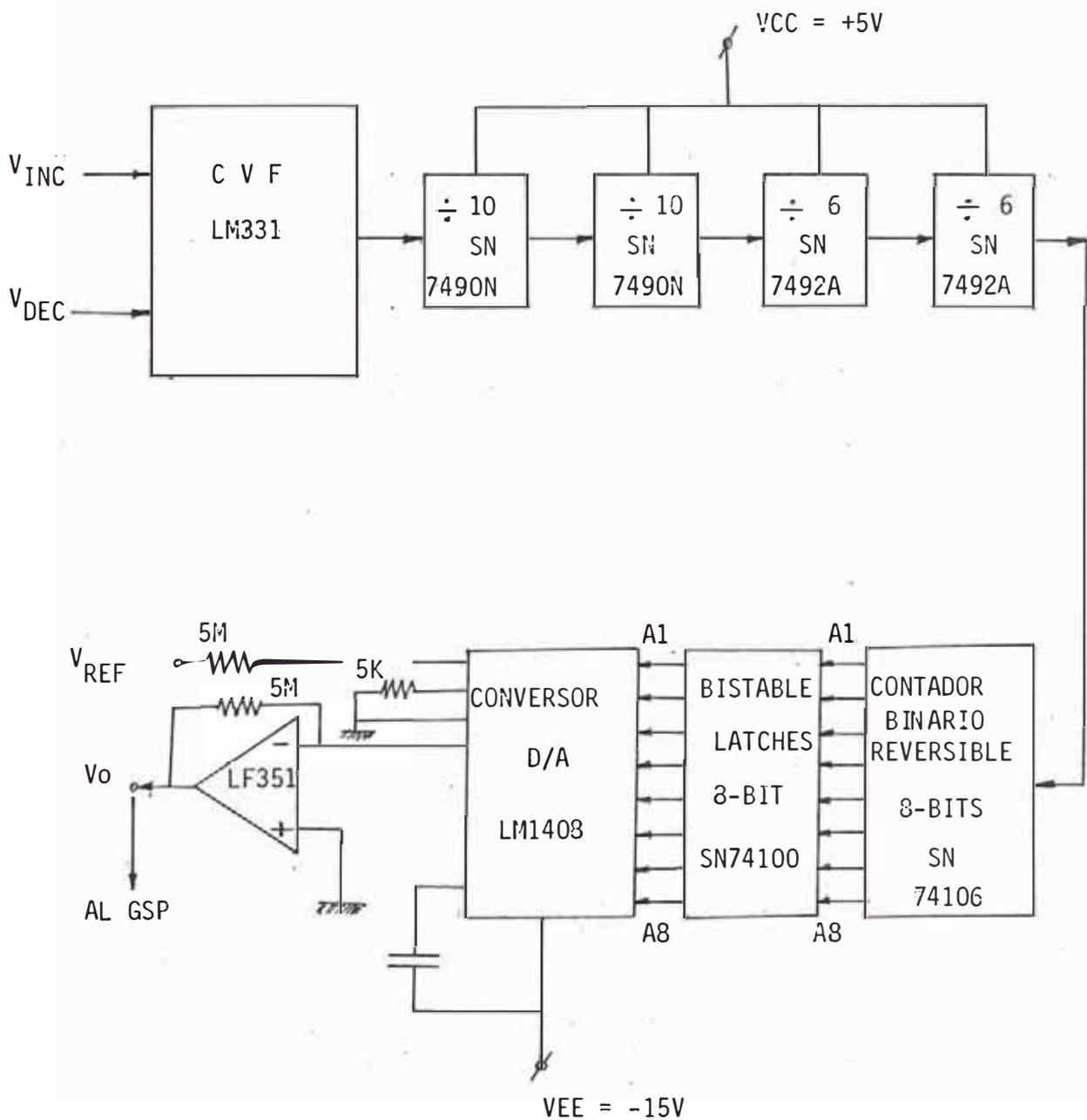


FIG 3.12

3.2.3 Generador de Secuencia del Programa

Según lo que hemos analizado en el capítulo 3.1; resumimos concluyentemente, que en el proceso sobre el cual tengamos que ejercer las acciones de control, existirá una secuencia en que se deben de dar los fenómenos integrantes del proceso. Primeramente de dará un calentamiento, seguidamente un mantenimiento, y por último un enfriamiento.

Esto implica claramente, que los voltajes de control que se den a la salida de ésta sección generatriz del programa, deben de ir apareciendo, en un orden análogo basado en la secuencia mencionada.

Para ser más explícitos; primero tendrán que ir apareciendo, los valores de V_c , que correspondan a una velocidad de calentamiento prefijado (V_{cinc}); Osea que tendremos que dar paso a los valores que irá generando en forma ascendente nuestro generador rampa, hasta que se logre alcanzar el valor del voltaje preestablecido que corresponde a la temperatura máxima a conseguir (V_{cmax}). Inmediatamente después de haber efectuado esta comparación y haber alcanzado este valor máximo; un elemento temporizador nos deberá permitir, mantener este valor de voltaje, por un espacio de tiempo, cuyo valor se haya prefijado en términos de voltaje; de acuerdo a la tabla III. 3.

Una vez que se haya cumplido el tiempo de permanencia prefijado del voltaje V_{cmax} ; se habilitará al generador rampa a que empiece a generar los valores de voltaje descendentes que corresponden al valor de la velocidad de enfriamiento prefijada; este valor descendiente del voltaje (V_{cdesc}), será comparado con un valor de temperatura final (V_{cf}), para cuando sea igualado se le de finalización al proceso.

Sabemos que los valores de estos cinco parámetros a controlar, provienen tanto de la fuente de corriente como del generador rampa ascendente-descendente; y que por lo tanto, debemos de diseñar el circuito, que al disponer de estos voltajes en su entrada, los entregue secuencialmente a la parte de control, con el orden anteriormente referido.

Para esto consideramos de que nuestro diseño deberá constar de un grupo de suiches analógicos con control digital, dos comparadores y un elemento temporizador controlado por voltaje. La estructura circuital del diseño de nuestro generador de la secuencia del programa la presentamos en la fig.3.13.

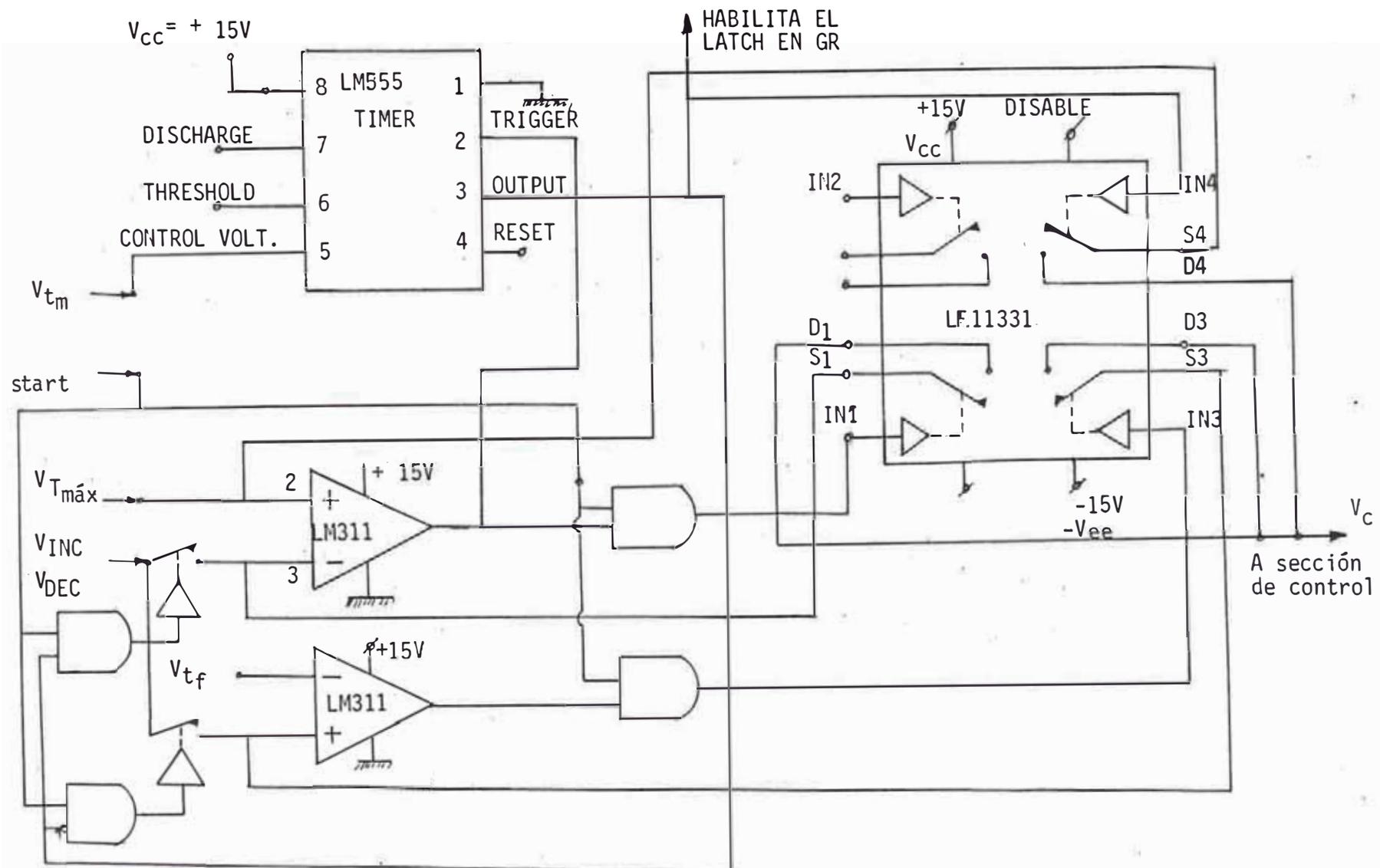


FIG. 3.13

Para los suiches analógicos de nuestro circuito podemos usar el Quad Analog Switches LF11331 ; para los comparadores el LM311, y el elemento temporizador controlado por voltaje el timer LM555 o en su caso el Precision timer LM122. Las características eléctricas de estos dispositivos las podemos ver en los anexos que mostramos en la parte final del trabajo.

3.3 Sección de Control

En ésta parte, denominaremos "Circuito Rastreador", al grupo de elementos que conforman una etapa de esta sección, que se encargará de dar paso a la señal de entrada, emitida por la termocupla y que pasará hacia el acondicionador y amplificador de ésta.

También usaremos, tres elementos de registro momentáneo, que serán monitoreados en forma síncrona por el circuito rastreador, para que ejecuten la función de comandar la energización, mantenimiento de estado, e indicación de "fuera de trabajo", de cada una de las seis zonas que se están controlando. A estos elementos los denominaremos "Latches".

Y por último es necesario introducir en el diseño de esta parte, un amplificador de señal de termocupla con un compensador de junta fría, y tres amplificadores operacionales comparadores que se encargaran de emitir las señales lógicas de control hacia los latches; según se requiera a cada instante durante la ejecución del programa de control que se desea cumplir. Al conjunto integral de esta última parte de esta sección la denominaremos "Acondicionador de señal".

3.3.1 Circuito Rastreador

La función especial para la cual diseñaremos este circuito, es para que nos permita leer la información proveniente de las termocuplas en forma alternada y secuencial; solamente una de ellas por cada unidad de

tiempo; de tal forma, que de esta manera tengamos información de la variación de la temperatura en cada zona; cada seis segundos. Este periodo de tiempo está sujeto a que lo podamos aumentar o disminuir, según nuestro criterio; variando la programación del timer que incorporaremos en él.

En éste circuito creemos conveniente utilizar un multivibrador de carrera libre (reloj) cuyos pulsos de salida, los pasaremos por un arreglo de flip-flops tipo J-K, los cuáles nos proporcionaran una cuenta binaria de tres dígitos, que serán enviados simultáneamente a los latches. En este circuito, también incluiremos un decodificador binario a hexagesimal con salidas para drivers de corriente, que se encargaran de activar o desactivar las bobinas de los reles en el circuito de entrada de las señales de las termocuplas. Al activarse cada bobina ($K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$) se encenderán cada uno de los led's correspondientes ($D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$). El diseño de nuestro circuito rastreador puede ser implementado a partir de los siguientes componentes: El arreglo de flip-flops se puede implementar con dos integrados SN74L73 con clear.

Para el decodificador binario-hexagesimal podemos utilizar el integrado SN74LS138 decoder. En los drivers de corrientes usamos el LM195 cuyas capacidades de corrien

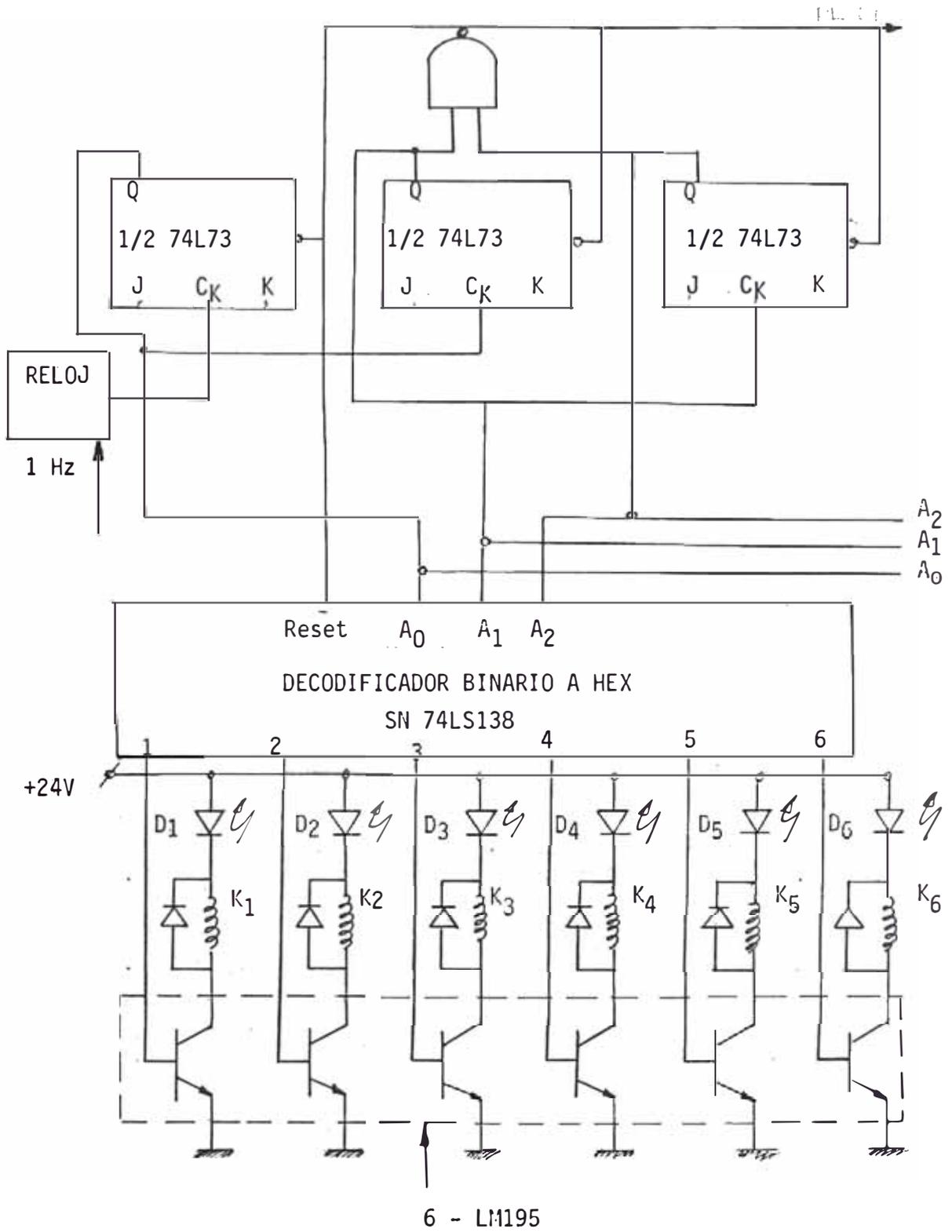


FIG. 3.14

te mayores de 1.0A. son suficientes para gobernar cada bobina y cada led's de nuestro circuito. También podemos sugerir un arreglo Darlington con transistores discretos para ser usados como drivers de corriente. El reloj para 1 Hz se puede conseguir a partir de un timer 555. La fig. 3.14 nos muestra el diagrama esquemático del circuito rastreador diseñado, y las características eléctricas de los componentes a usar son mostrados en los anexos en el final del trabajo.

3.3.2 LATCHES

Dentro de esta parte de la sección de control, lo que pretendremos es desarrollar, tres de las funciones, que tienen mucha importancia dentro del trabajo global que ejecutará nuestro programador-controlador; las cuales serían:

3.3.2.1 LATCH.#1

Indicar o señalizar cuando el voltaje de control V_C , proveniente del generador de secuencia del programa, ha sido superado por el valor del voltaje amplificado de la señal de termocupla.

Diseñamos un circuito con seis flip-flops tipo "D" codificados, realizando cada uno el trabajo de retener momentaneamente la información, cada vez que llegue el pulso rastreador de cada zona; cada elemento de estos recibe el nom-

bre de latch en la industria electrónica. Además usaremos un decodificador binario a hexadecimal, y una puerta and de dos entradas por cada flip-flops.

Es necesario también que utilicemos un driver de corriente, por cada salida en cada latch, para poder proporcionar la corriente necesaria para cada lámpara de señalización.

La Fig. 3.15 muestra el diseño

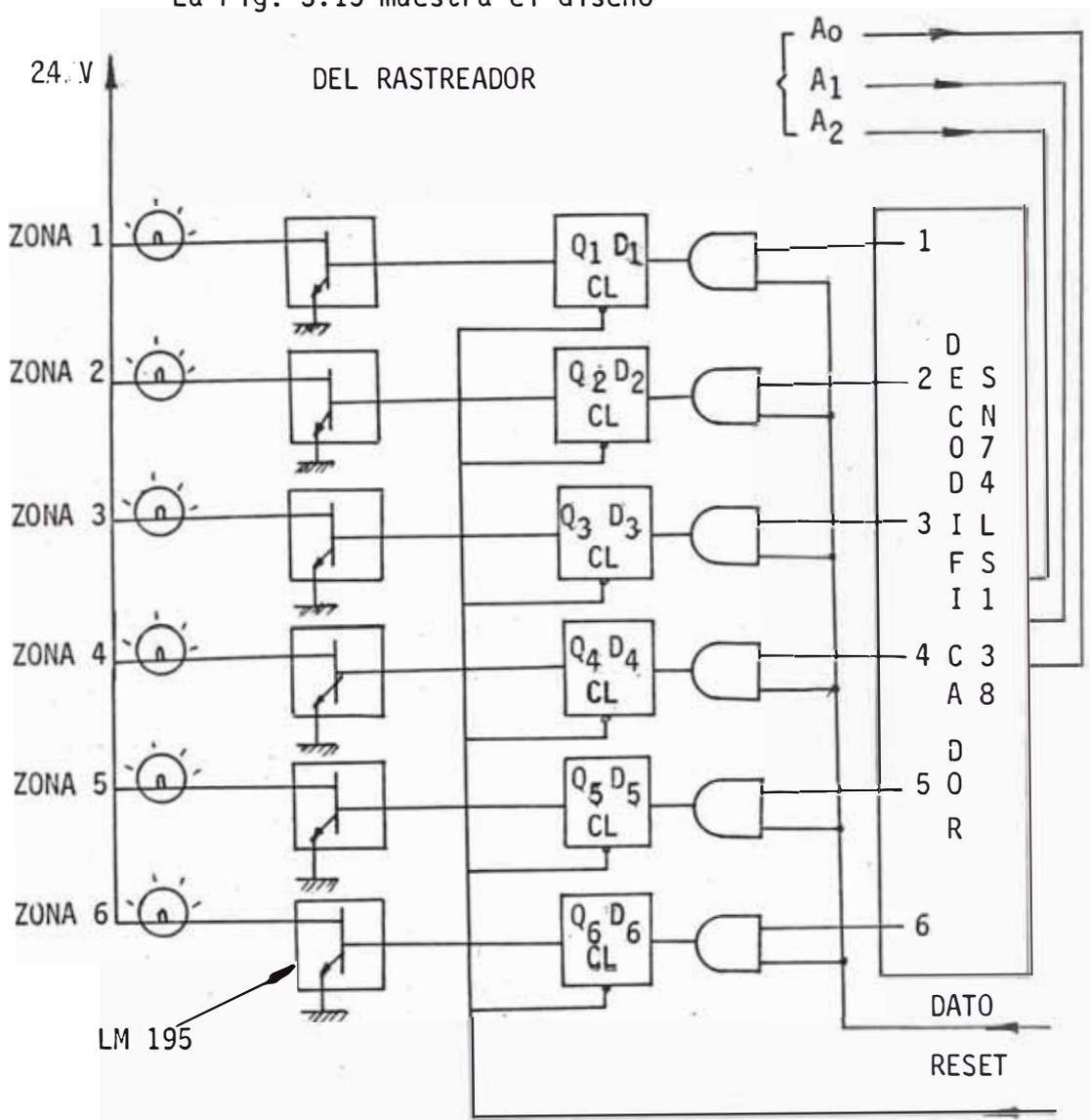


FIG. 3.15

La señal proviene del circuito rastreador, en sincronismo con los pulsos del reloj de ese circuito. El pulso reset que llega a este circuito, es el mismo que resetea al circuito rastreador.

Por la línea de datos de entrada, llega el pulso proveniente del circuito amplificador de la señal de termocupla; y se presentará toda vez que la señal amplificada de la termocupla sea mayor que la señal de control V_C enviada desde el generador de secuencia del programa. Este pulso por lo tanto, nos indica, que la temperatura que se está alcanzando en la zona de calentamiento, es mayor que la temperatura programada que se debería tener en ese instante; y por lo tanto, es preciso desenergizar esta zona en este instante, e indicar o señalar un estado de "mantenimiento" para ese momento.

Esta información quedará atrapada en el latch correspondiente a esa zona, hasta la llegada de otro pulso, después de haber transcurrido seis segundos de haber monitoreado cada una de las otras zonas restantes, debido a que se está sensando la información que proporcionan las termocuplas, a la frecuencia de una por segundo. Ese estado permanecerá señalado hasta que la señal proveniente de la termocupla, después de ser amplifi

cada, sea inferior o igual a la del voltaje de control V_c , del generador de secuencia del programa.

En este diseño usamos el SN74LS138 para efectuar el trabajo como decodificador binario a hexadecimal. Un cuádruple 2-input positive and gates SN7408, más media unidad de este para poder completar las seis puertas and que necesitamos.

El grupo de seis latches o flip-flops tipo "D" que utilizaremos están en un sólo integrado que es el 8-BIT BISTABLE LATCHES SN74100.

Para los drivers de salida utilizamos seis integrados LM195 Ultra Reliable Power Transistors. Las características eléctricas de todos estos integrados que usamos en este diseño los mostramos en los anexos de la parte final del trabajo.

3.3.2.2 LATCH #2

Diseñamos un segundo circuito que contiene exactamente los mismos elementos que integran el circuito anterior, con la diferencia de que entre los +24V y los colectores de los drivers de salida, ubicaremos las bobinas de los relés que energizaran o desenergizaran las bobinas de los contactores, de las seis zonas de salida en el

secundario del transformador que alimenta las resistencias calefactoras.

Por la línea de datos, en este caso ingresará un pulso, que es enviado desde el circuito acondicionador y amplificador de la señal de termocupla, cuando sea detectada la condición en la que el voltaje amplificado de la señal de termocupla, no alcanza a igualar el valor del voltaje de control V_C que viene del circuito generador de la secuencia de programa. El pulso reset es el mismo que utilizamos para resetear todo el sistema.

En este circuito los señalizadores luminiscentes, estarán encendidos toda vez que se mantengan energizadas las bobinas de los relés ($K_7, K_8, K_9, K_{10}, K_{11}, K_{12}$), para los efectos de incrementar la temperatura en un momento dado, para tratar de igualar el voltaje de control V_C . Los componentes que debemos de usar los mismos, pero la configuración en la salida de cada driver será como lo mostramos en la fig. 3 .16

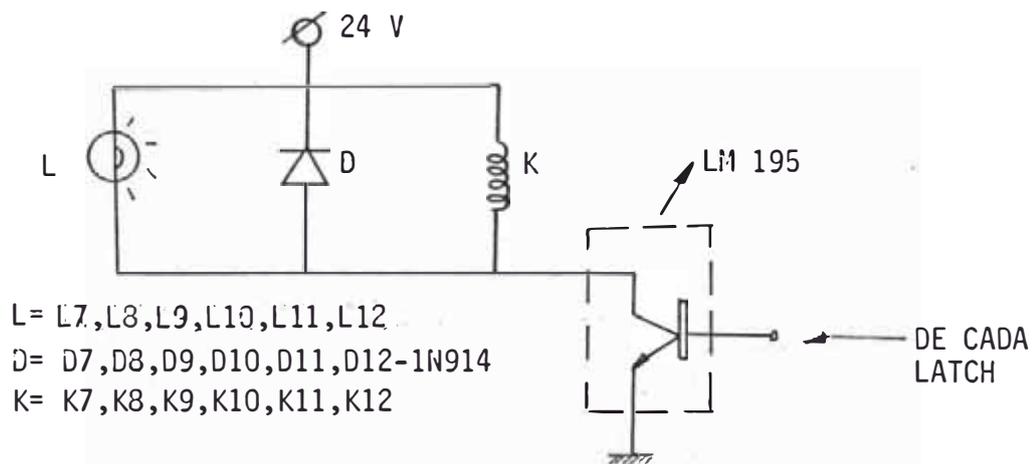


FIG. 3.16

3.3.2.3 LATCH #3

El tercer circuito integrante de esta parte que le hemos dado una denominación generalizada de "LATCHES", lo diseñaremos también a partir de los mismos componentes utilizados en el primer circuito de esta parte; por lo que pretendemos conseguir con este diseño, es solamente obtener información visual, de la zona que queda fuera de trabajo, cuando alguna anomalía se presenta en algún componente de la zona que se está señalizando como defectuosa en ese instante.

Esta señalización nos pondrá de sobreaviso para revisar, algún defecto que está presente,

ya sea en la termocupla, cables compensados, resistencias calefactoras, o en el secundario del transformador.

Cuando se detecta una señal nula, en la etapa de acondicionamiento y amplificación de la señal de termocupla, se enviará un pulso de salida desde esta parte que llegará a la línea de datos de este tercer circuito, para ser retenida en su respectivo latch, y por consiguiente activar el correspondiente driver que energizará su lámpara que nos indicará el estado de "Fuera de trabajo" de la zona; hasta que el error sea corregido.

Para una referencia de detalles, denominaremos, Latch #1, Latch#2, y Latch #3 en forma correlativa, a los tres circuitos diseñados en la parte 3.3.2.1, 3.3.2.2 y 3.3.2.3 que en su totalidad la hemos denominado "LATCHES". Todo esto con el propósito de identificarlos con mayor facilidad en el esquema general de la sección de control, el cual mostramos en la fig.3.23.

3.3.3 Acondicionador y Amplificador de la Señal de Termocupla

Según las propiedades físico-químicas de las termocuplas tipo "K" que usaremos (cromo-aluminio), siempre se determinará una diferencia de temperatura entre la junta caliente y la junta fría; lo que nos exige mantener a ésta última, lo más constante posible. De aquí la necesidad de disponer la junta fría a una distancia tal, que no sea afectada por las variaciones de temperatura a que se expone la junta caliente. Esto implica la necesidad de que tengamos que utilizar un elemento que se encargue de acondicionar ésta señal antes de proceder a amplificarla y después compararla con la señal de control V_C proveniente del circuito generador de la secuencia de programa.

3.3.3.1 Compensación de la "Junta Fría" o de Referencia

Es la técnica por la cual las variaciones de la temperatura de referencia (T_0) de una termocupla, son tomadas en cuenta ya sea manual o automáticamente, dentro de la determinación de la temperatura de la "junta fría" o de medición.

El voltaje que aparece en la entrada del amplificador que diseñaremos, es proporcional a la diferencia de temperatura entre la junta de referencia y la de medición.

fig. 2.18 del capítulo anterior.

$$E_{en} = f (T - T_0)$$

En la fig.3.17 el voltaje a través de la resistencia de níquel R_{amb} , es:

$$V_{Ramb} = I_c \cdot R_{T_0} (1 + (T_{amb} - T_0))$$

en donde:

R_{T_0} = Valor de la resistencia de níquel a la temperatura T_0 .

T_{amb} = Temperatura ambiente.

I_c = Una corriente constante determinada por los límites de temperatura ambiente, dentro de los cuales la resistencia de la junta de referencia debe compensar.

= Coeficiente de temperatura de la resistencia de níquel.

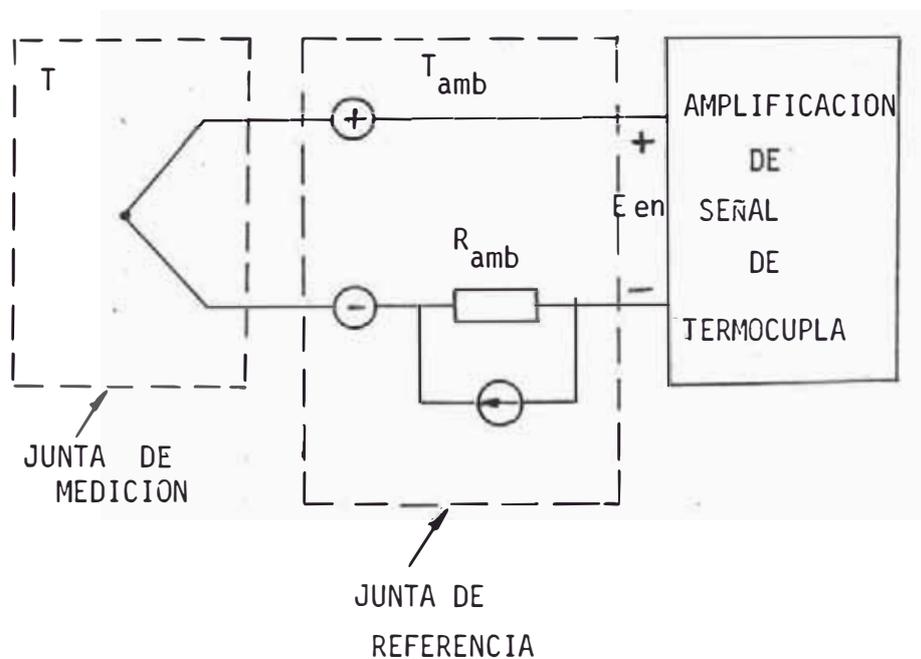


FIG. 3.17

Para una temperatura constante en la junta de medición, los cambios en la junta de referencia, producirán un voltaje erróneo en la entrada del amplificador. La influencia de un cambio en la temperatura de referencia de sobre la exactitud en la salida del amplificador es inversamente proporcional a la ganancia de este.

Varias técnicas pueden ser empleadas para compensar los corrimientos de temperatura de la junta de referencia.

Entre estas tenemos:

- Usando una tabla de temperaturas de corrección.
- Manteniendo la temperatura de la junta de referencia, dentro de un ambiente de temperatura fija. (Ejem. baño de hielo).
- Haciendo pasar una corriente dependiente de la temperatura a través de una resistencia constante dentro del circuito amplificador.
- Haciendo pasar una corriente constante a través de una resistencia dependiente de la temperatura dentro del circuito amplificador. Esta técnica es bastante usada.

Una resistencia hecha de alambre de níquel (o de cobre) cambiará su resistencia con la temperatura, de una manera apreciable (ver fig.3.17. De esta manera con una corriente constante fluyendo a través de ella, el voltaje a través de la resistencia cambiará también de una manera predecible.

La corriente constante puede ser obtenida por medio del circuito de la fig.3.18. En este circuito:

$$V_{cte} = I_c \cdot (R_{grande} - R_{ni})$$

En donde R_{grande} es una resistencia con bajo coeficiente de temperatura. Los cambios en el valor de R_{ni} , producirán cambios despreciables en el valor de la corriente I_c ; de tal forma que para nuestros propósitos prácticos diseñaremos un circuito compensador de junta fría, con una fuente de voltaje constante.

Además de un voltaje independiente de la temperatura. La expansión de la fórmula que relaciona voltaje y corriente nos muestra este hecho:

$$V_R = I_c \cdot R_{T_0} (1 + (T_{amb} - T_0))$$
$$R_{T_0} = R_{ni} \Big|_{T=T_0}$$
$$V_R = I_c \cdot R_{T_0} \text{ indep.} + I_c \cdot R_{T_0} \cdot (T_{amb} - T_0) \text{ depend.}$$

El voltaje independiente de la temperatura puede ser tomado en cuenta, si lo incluimos dentro del diseño del amplificador de la señal de termocupla. El circuito de la fig. 318 muestra un circuito de compensación de junta fría que nos representa esquemáticamente la teoría básica explicada en las líneas anteriores.

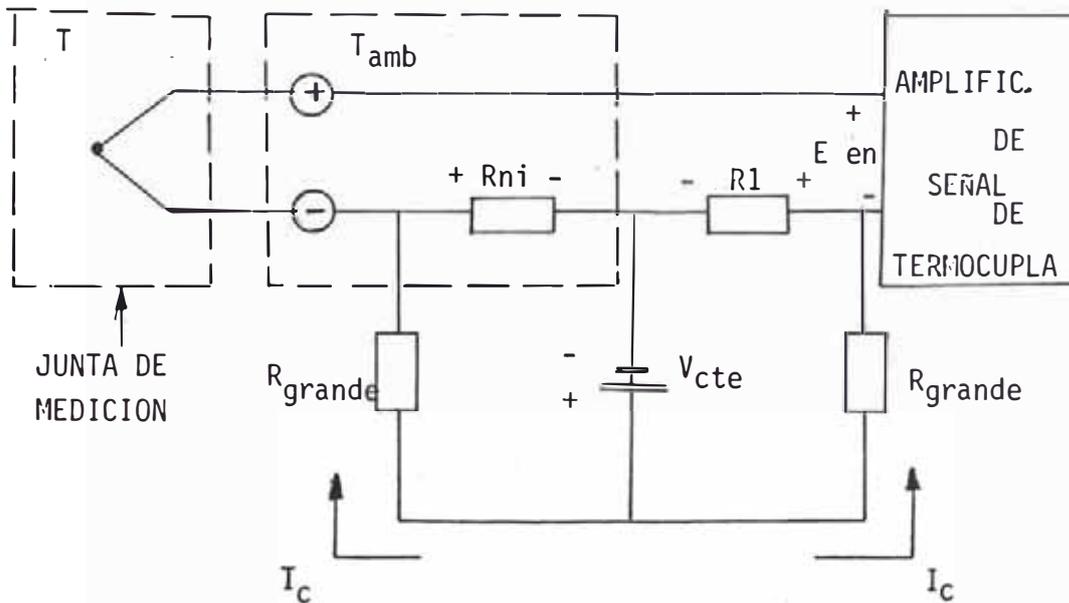


FIG. 3.18

Si R_1 y R_{grande} son especificados como resistencias de coeficiente de temperatura bajo, E_{en} está compensada adecuadamente ya que es independiente de las variaciones de la temperatura ambiente.

Para nuestro circuito compensador de junta fría usaremos como elemento principal el diodo de referencia LM113, que es un diodo de referencia de bajo voltaje compensado por temperatura cuyas características eléctricas específicas las mostramos en los anexos en la parte final de nuestro trabajo. A través de una resistencia de $10\text{K}\Omega$, tomadas de un voltaje de polarización de $+15\text{V}$, podemos conformar la fuente de corriente constante que necesitamos para nuestro circui

to compensador de junta fría. Y con una resistencia variable de $1K\Omega$, podemos conectarla a la resistencia de níquel $R_{ni} = 10K\Omega$, para realizar externamente un ajuste en la compensación cuando las condiciones lo requieran. Para mejor entendimiento de su funcionamiento y trabajo de nuestro circuito compensador, lo mostramos anexo al circuito amplificador de la señal de termocupla que emplearemos en nuestro diseño y lo mostramos en el esquema circuital de la figura 3.

3.3.3.2 Amplificador para Señal de Termocupla

Después de solucionar la Compensación de temperatura, viene la amplificación de la pequeña FEM generada por la termocupla, para ser llevada al nivel de algunos voltios. De esta manera, la señal obtenida puede estar en condiciones de ser comparada con el voltaje V_c generada en el circuito generador de la secuencia del programa.

Para el diseño de nuestra etapa de amplificación de la señal de termocupla usaremos el LM121A y el LM108A.

El LM121A es un preamplificador de precisión diseñamos para operar con amplificadores operacionales de propósito general, para reducir drásticamente los errores en DC: El drift, la

corriente de bias, el trabajo en modo común, y el rechazo a las variaciones del voltaje de fuente, son mejorados eficientemente por este preamplificador con respecto a otros amplificadores operacionales simples. Al trabajar con una etapa amplificadora adicional, con ganancia en DC, el LM121A reduce los errores que se presentan para la ganancia en lazo cerrado.

El LM121A tiene la capacidad de poder operar con voltajes de fuente desde $\pm 3\text{v.}$ a $\pm 20\text{v.}$; incluso hasta con fuente de voltajes no reguladas sin ser afectado en las características funcionales que posee. De las características más preminentes que posee el LM121A podemos señalar:

- Un garantizado drift de bajo valor $-0.2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Offset de voltaje menor que 0.4mV .
- Corriente de bias menores que 10nA en corrientes operantes de $10\mu\text{A}$
- CMRR mínimo de 126 db .
- Voltaje Offset son anulados facilmente.

Otras características del LM121A, que también son de mucha importancia las mostramos en los anexos de la parte final del trabajo.

El LM108A que en nuestro diseño adicionamos a nuestro preamplificador antes citado, es un am-

plificador operacional de precisión que tiene un factor de diez, mejor que los amplificadores FET sobre su rango en la temperatura de operación. Adicionalmente a su baja corriente de entrada, este elemento tiene bajísimo offset de voltaje, haciéndolo posible la eliminación de los ajustes de offset, y obtener performances aproximadas a los amplificadores estabilizados chopper.

Este elemento tiene la capacidad de poder trabajar con fuentes de voltaje desde $\pm 2V$. hasta $\pm 18V$. y lo usamos en nuestro diseño con un grupo de condensadores que le proporcionan la compensación necesaria para convertirlo en un elemento insensible a las tensiones espúreas que pueden darse en la fuente de alimentación.

De las características más preminentes del LM108A podemos señalar:

- Un garantizado offset de voltaje menor que $0.5mV$.
- Una máxima corriente de bias en la entrada de $3.0nA$.
- Suministros de corriente de solamente $300\mu A$. aún en estado de saturación.
- Un garantizado drift de bajo valor - $5 V./^{\circ}C$.

Otras características eléctricas de este elemento, que son de mucha importancia, los mostramos en los anexos de la parte final del trabajo.

En el esquema circuitual de la fig. 3.19, mostramos nuestro amplificador de señal de termocupa, diseñado a partir de los elementos, cuyas características hemos expuesto. En esta configuración podemos notar también nuestro circuito compensador de junta fría, cuyas características de diseño han sido expuestas anteriormente.

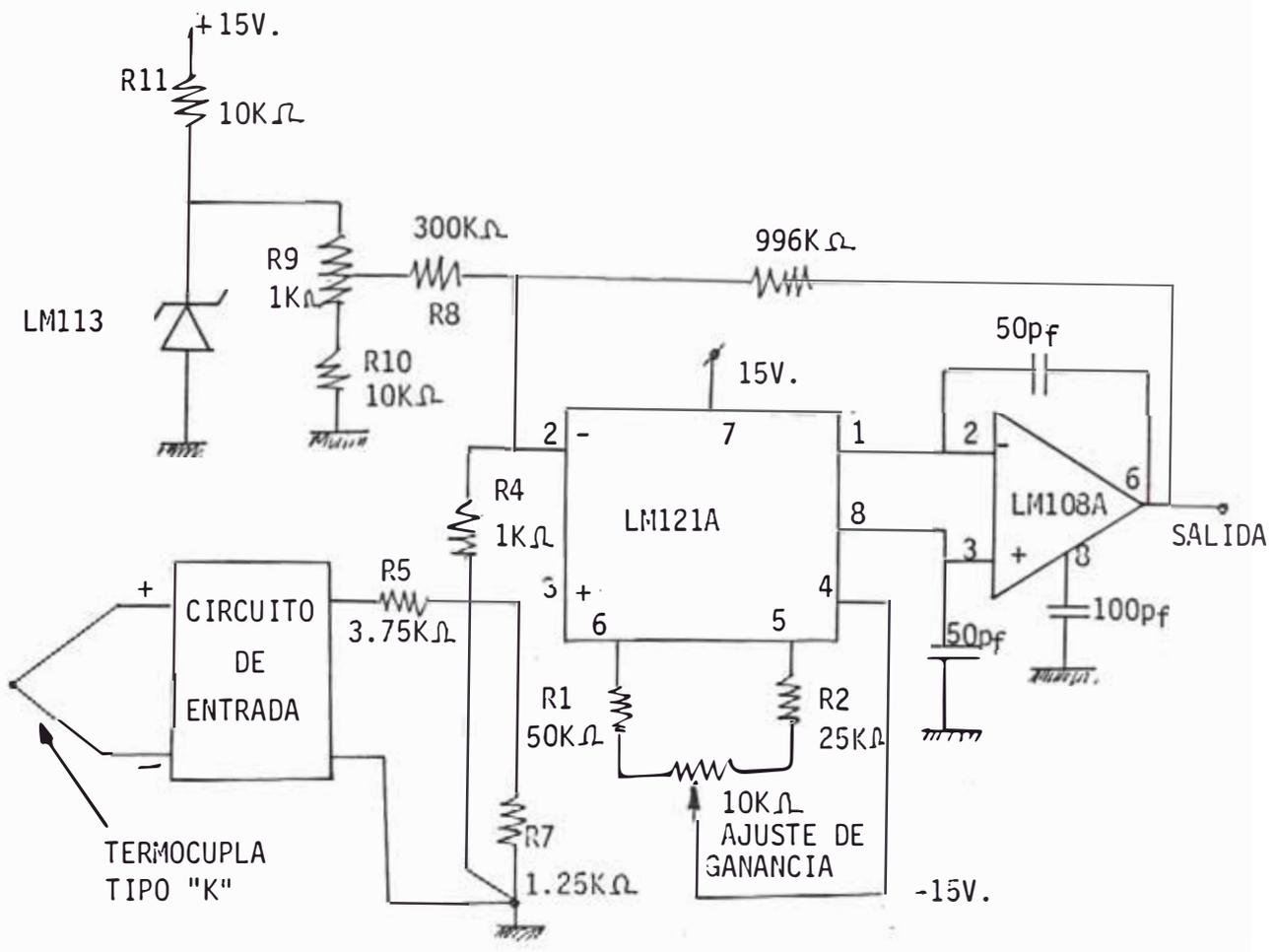


FIG. 3.19

En nuestro diseño mostrado en la figura anterior, las ecuaciones que rigen nuestra ganancia de voltaje (A_v), y la corriente de operación (I_{op}) son las siguientes:

$$A_v = \frac{1.2 \times 10^6}{R_{set}} \quad ; \quad I_{op} = \frac{2 \times 0.65V}{R_{set}}$$

Como lo habíamos manifestado en la parte correspondiente a la fuente de corriente; los valores en voltaje que debemos de obtener a la salida de nuestro amplificador de señal de termocupla, tienen que guardar equivalencia con los valores en voltaje que se muestran en la tabla III.2, para cada valor de la FEM emitida por la termocupla tipo "K", en el sensado de la temperatura durante el proceso de calentamiento.

Es de primordial importancia que tengamos muy presente, la relación $T(^{\circ}F)$ vs. $V(mv.)$ de la termocupla tipo "K", que mostramos en la tabla IV, en base a la cual podemos calcular la ganancia que debemos de conseguir con nuestro amplificador, para valores reales de temperatura; de tal forma que haciendo los ajustes de la R_{set} , podamos determinar el valor exacto de la ganancia necesaria que nos proporcionará, los valores de voltaje en la salida de nuestro amplificador que son equivalentes a los que tene-

mos como referencia en la tabla III.2 para cada valor dado de temperatura.

Según los valores en mV. vs. °F, para la termocupla tipo "K" observamos que entre 0 y 2300°F, existen señales de voltaje emitidas por la termocupla, de una forma lineal desde 0mV. hasta 50.5 mV.; esto implica que se estarán emitiendo $(50.5/2300)MV.$ por cada °F; lo cual significa, que para nosotros tener la equivalencia de 5mV. por cada °F, que es la relación que tenemos en la tabla III.2; necesitaríamos una ganancia en nuestro amplificador, de 230 muy aproximadamente. Aplicando la ecuación de la ganancia que rige en nuestro amplificador, tendremos que la R_{set} que tendríamos que establecer en este caso, de:

$$R_{set} = \frac{1.2 \times 10^6}{230} = 5.2 \text{ K}\Omega$$

Para nuestro circuito estableceremos un potenciómetro en lo cual podamos hacer variaciones de 0 a $10K\Omega$, de tal forma que podamos hacer ajustes de nuestra ganancia dentro de un rango que nos ofrezca la mayor seguridad en estos casos.

3.3.3.3 Circuito Comparador

Un instante o pasaje durante el proceso, cuya importancia se debe de destacar, es el momento en que la señal de voltaje de control V_c que viene del generador de secuencia del programa y la señal que obtengamos en la salida de nuestro am - plificador son puestas en comparación, con el propósito específico de conocerse el estado en que marcha nuestro proceso frente a un programa que debe de seguir este, pero anteriormente pre establecido. Como resultado de esta comparación debemos de generar la señal correspondiente que serán emitidas hacia los elementos ya designa - dos anteriormente (latches), y sean ejecutadas o dadas las ordenes de control respectivas, se - gún sean verificadas las necesidades de nuestro proceso a través de esta etapa de comparación entre los valores programados y los valores reales que se están dando.

Para ésto diseñamos un circuito que comprende tres amplificadores operacionales comparadores, configurados de la forma que se muestra en la fig. 3.20

Cuando el voltaje en la salida del amplificador de termocupla esta superando el valor de V_c de control, en la salida del comparador #1 tendre-

mos un nivel alto que será llevado por la línea de datos al LATCH #1, indicándose que debe haber un período de desenergización de la zona, o mejor dicho un período de mantenimiento. Este nivel pasará a nivel bajo, inmediatamente después que se supere este estado.

Cuando se manifiesta el caso en que la V_c de control esta por encima del valor de la señal a la salida del amplificador de la señal de termocupla. En este caso aparecerá un nivel alto en la salida del comparador #2, que será enviado a la línea de datos del LATCH #2, para que se realice la respectiva energización de la zona correspondiente. Este nivel será bajo, inmediatamente después que se supere este estado.

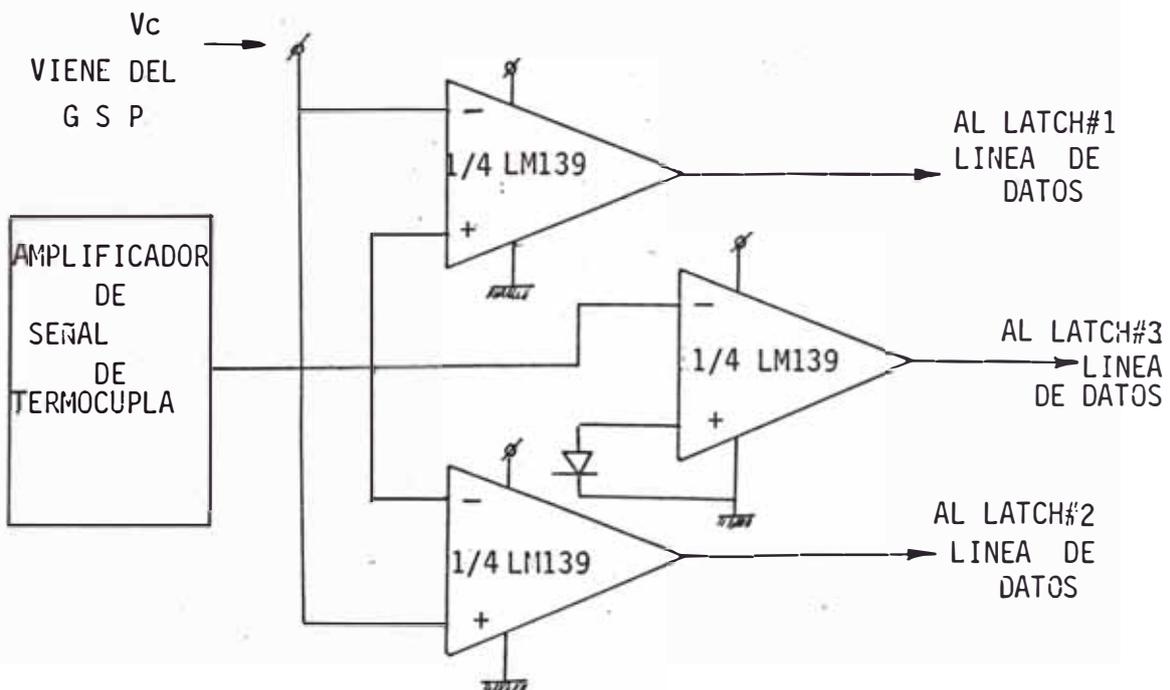


FIG. 3.20

Cuando no aparece señal alguna o una señal nula, el comparador #3 en su salida presentará un nivel alto, que será transmitido por la línea de datos correspondiente al LATCH #3, para que se realice la correspondiente señalización, como indicación del desperfecto que se está presentando en dicha zona. El nivel será bajo cuando se consiga superar esta situación:

En nuestro diseño podemos utilizar tres de los cuatro comparadores que tiene el LM139 Low Power Offset Voltage Quad Comparators, cuyas características eléctricas las mostramos en los anexos de la parte final de este trabajo.

Adicionalmente a todo lo expuesto referente a nuestro diseño de esta sección de control de nuestro programador-controlador esquematizaremos en las figuras 3.21 , y 3.22 ; lo que será dentro de nuestro diseño el circuito de entrada y el circuito de salida correspondientemente.

En los circuitos podemos notar la identificación que le asignamos con la letra K a los distintos contactos de los relés, cuyas bobinas son energizadas por los elementos y formas anteriormente explicadas.

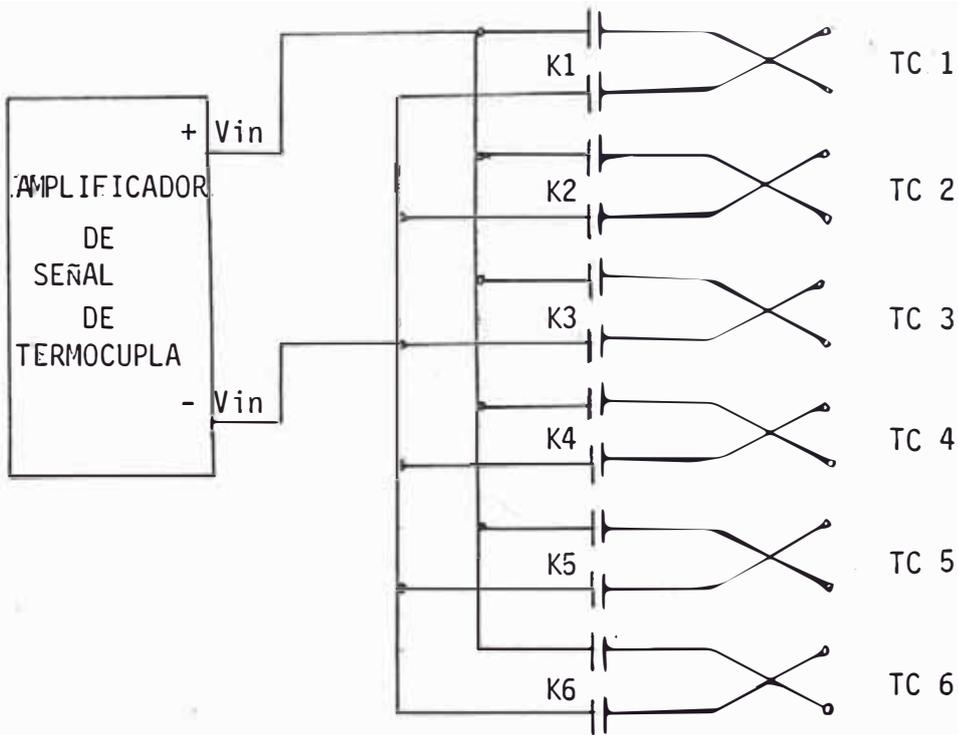


FIG. 3.21

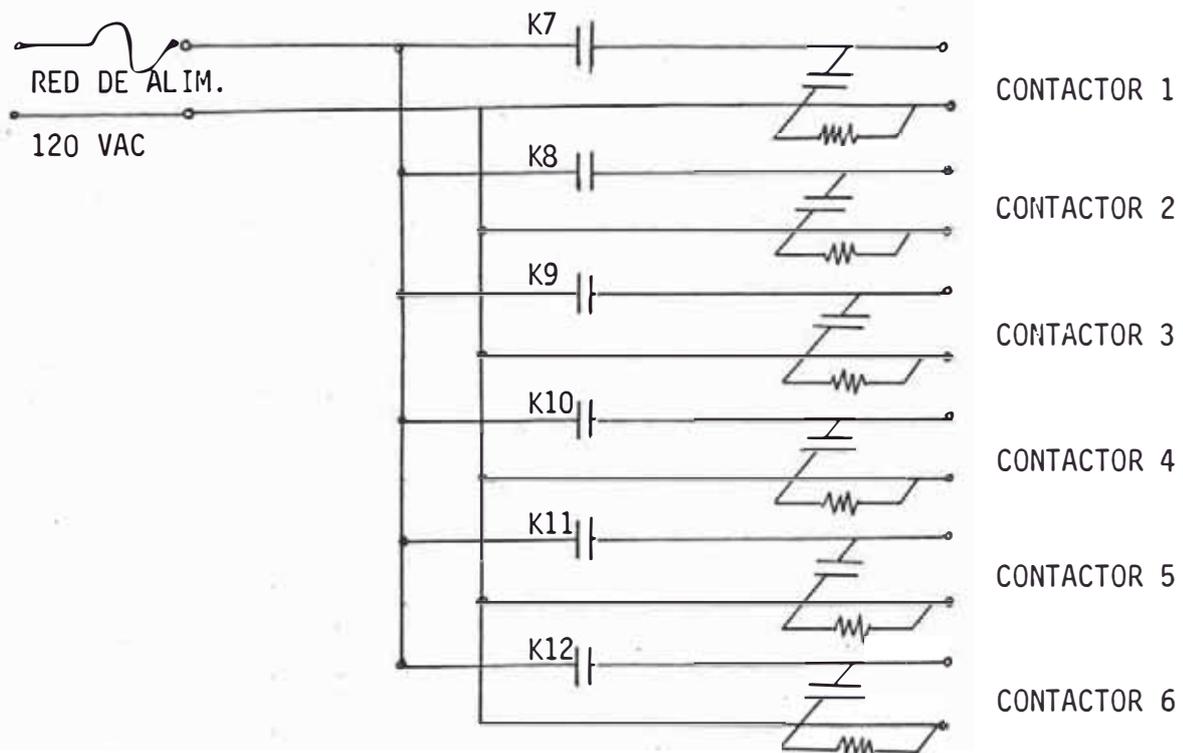


FIG. 3.22

La fuente de alimentación regulada que se deberá de usar para la alimentación de nuestro circuito deberá de tener tres salidas + 24V. , +15V., y + 5V; de tal forma que para el diseño de ella podemos añadir que simplemente podemos hacer uso de una fuente común y corriente con un transformador de salidas en su secundario, para proporcionarlos los valores mencionados que necesitamos. Los reguladores que podemos utilizar son los LM340 para las salidas de + 5V. y + 15V., que pueden conducir corrientes hasta de 1.5A. y que tiene un porcentaje de regulación de 0.02%. Para la salida de + 24V. podemos usar LM317 que es un regulador ajustable con valores en su salida entre 1.2 a 37V. y también puede ser capaz de conducir corrientes hasta de 1.5A. y con un porcentaje de regulación de 0.01%. Otras características eléctricas adicionales de estos elementos las podemos ver en los anexos de la parte final de nuestro trabajo.

3.4 Esquema Circuitual General del Programador

Como parte conclusiva de este capítulo, mostramos la configuración de nuestro diseño, que viene a ser la conjugación de todos los elementos anteriormente ya estudiados y explicados. Fig.3.23

CAPITULO IV

METODO DE AJUSTE DEL PROGRAMADOR AL PROCESO

4.1 Tecnicas para conseguir Resultados Optimos

Nominalmente la implementación de un servosistema como el que hemos analizado y estudiado, probablemente tenga o muestre cualidades que representen muchas ventajas dentro de la Ingeniería de Control Automático. El empleo de nuestro programador de seis canales requiere como complemento de sus características, el tener en cuenta, ciertos pasos, que tenemos que realizar, para seguir resultados óptimos. Estos pasos que tenemos que llevar a cabo, los enunciaremos en la aplicación de un ejemplo específico: Efectuarse el tratamiento electrotérmico post-soldadura para el alivio de tensiones, a una junta de soldadura de tubo a tubo de 30" de diámetro y 1 1/2" de espesor.

Por el código ASME anteriormente analizado, se deberá calentar gradualmente la tubería, sin superar los 400°F/hr; hasta llegar a conseguir 1200°F; mantener esta temperatura en este valor por espacio de 1h.30', y luego enfriarla moderadamente hasta los 500°F; sin superar los 400°F/hr. en la velocidad de enfriamiento.

Los pasos a seguir son los siguientes:

4.1.1 Termocuplas

Debemos de definir el tipo de termocuplas, cuyas características, respondan a las necesidades de nuestras condiciones; para ésto disponemos de las tablas anteriormente estudiadas, y concluimos que la termocupla tipo "K", posee o reúne lo que necesitamos en este aspecto. Además debemos considerar la longitud de la termocupla, que debe de ser aproximadamente 0.80 m., con el propósito de que podamos ubicarla, de tal forma que el calor que emiten las resistencias, no incidan directamente sobre éllas, y que podamos tomar la F.E.M. que éllas emiten, en una parte totalmente separada del calor irradiado. Esto nos lleva a decidir que la estructura de su forma física deba de ser; por un extremo, la parte que será adherida, técnica y eficientemente a la parte que está recibiendo calor, y en el otro extremo estarían los terminales de donde tomaríamos la señal. En la fig. 4.1 podemos ver una representación que pueda ayudar a complementar lo manifestado.

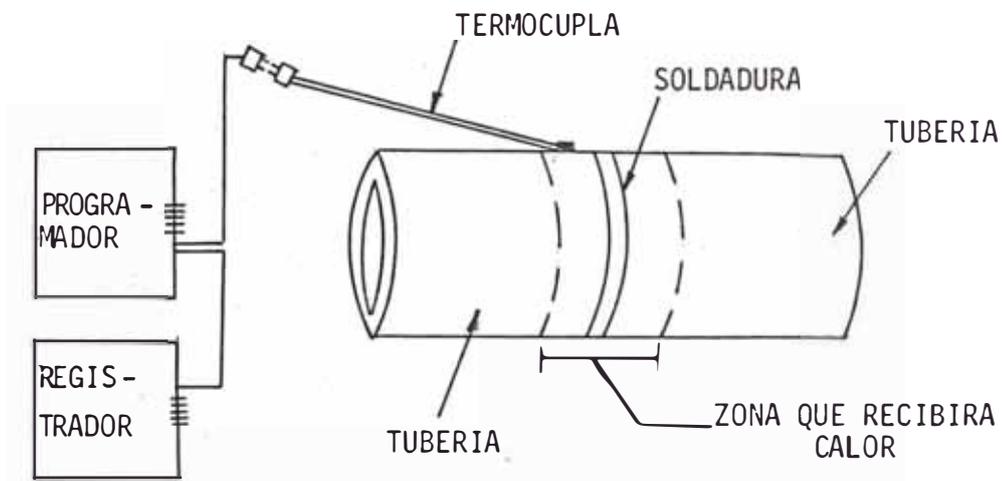


FIG. 4.1

El número de termocuplas que debemos distribuir a través de toda la superficie perimétrica, es de mucha importancia, porque tendremos la mayor información posible, acerca de la uniformidad de la distribución del calor, en el tratamiento. Esto también nos reportará la información sobre el posible defecto o deterioro que puede sufrir accidentalmente una resistencia calefactora integrante del conjunto, o de alguna anomalía en la etapa de salida, de donde proviene la energía para ésta. El número de termocuplas que usemos tiene que ser igual al número de zonas o salidas, que estemos usando en el secundario del transformador. Cada termocupla se encargará de emitir, la FEM correspondiente al calor que se está recibiendo en la parte en que está posicionada; esto implica que, debemos guardar precaución en el momento de la ubicación de las resistencias y de las termocuplas en el área que va a ser calentada.

4.1.2 Selección y Emplazamiento de las Resistencias.

Proseguimos con la estratégica distribución de las seis zonas o salidas, de las que disponemos en el secundario del transformador; en conformidad con el número de resistencias que calculemos utilizar.

En el caso ejemplar que estamos analizando, de la soldadura entre dos tuberías de 30" de diámetro y 1 1/2" de espesor; para calentar hasta los 1200°F con una veloci -

dad de 400°F/hr necesitamos la siguiente cantidad de calor Q (Kw - hr):

$$Q = \frac{W \times C_e \times \Delta T^\circ \times f_p}{3412 \text{ Btu/Kw-hr}} \text{-----(1)}$$

en donde:

W = Peso del volumen de material a calentarse = lbs

C_e = Calor específico del acero de baja aleación = 0.12
Btu/°F - lbs

ΔT = 1200°F - 70°ambiente = 1130°F

f_p = Factor de pérdida del material = 2.4

Pero:

$$W = \frac{\pi \times L \times d \cdot (D.E-D.I) (D.E+D.I)}{4} \text{-----(2)}$$

en donde:

L = Longitud de la parte lateral de la soldadura hasta donde emplazaremos las resistencias = 12"

d = densidad del metal = 0.29 lbs/plg³

D.E= Diámetro externo de la tubería = 30"

D.I= Diámetro interno de la tubería = 27"

Reemplazando en (2) tenemos:

$$W = \frac{3.14 \times 12 \times 0.29 \times 3 \times 57}{4} = 467.13 \text{ lbs.}$$

Reemplazando en (1) tenemos:

$$Q = \frac{467.13 \times 0.12 \times 1130 \times 2.4}{3412} = 44.55 \text{ Kw-hr} \approx 45 \text{ Kw-hr}$$

Por lo tanto, para conseguir los 1200°F a una velocidad de 400°F/hr necesitamos aproximadamente 3 horas, y la energía eléctrica necesaria sería:

$$\frac{Q}{T \text{ (horas)}} = \frac{45 \text{ Kw-hr}}{3 \text{ hr}} = 15 \text{ Kw}$$

Conociendo de la cantidad de energía que precisamos podemos definir que la capacidad de nuestro transformador podría ser de 30 Kw; como prevención de un margen de reserva para el supuesto caso, de que se requiera realizar, otro tratamiento al mismo tiempo, en otra tubería de iguales dimensiones, o de dimensiones menores.

De acuerdo a los tipos de resistencias que encontremos en el mercado, seleccionamos según su ancho, longitud, amperaje, voltaje, y energía de trabajo; las que se adecúen a los parámetros de nuestro tratamiento. Según las clases de resistencias que mostramos como referencias ejemplares en el capítulo II, hemos elegido las del catálogo N° 9-15-808; que tienen 378 mm. de ancho y 205mm. de largo; trabajan con 70 voltios AC o DC, 40 Amperios, y consumen 2.8 Kw de energía c/u. Para cubrir la superficie perimétrica de la soldadura en la tubería necesitaríamos seis de ellas, las cuales nos consumirían 16.8 Kw en total; lo cual es, más que suficiente para producir la cantidad de calor que necesitamos para alcanzar los 1200°F en tres horas, como habíamos calculado (15 Kw).

Para tener una mejor idea, de como las emplazaremos; en la fig. 4.2 representamos una extensión lineal de la superficie perimétrica que se va a calentar.

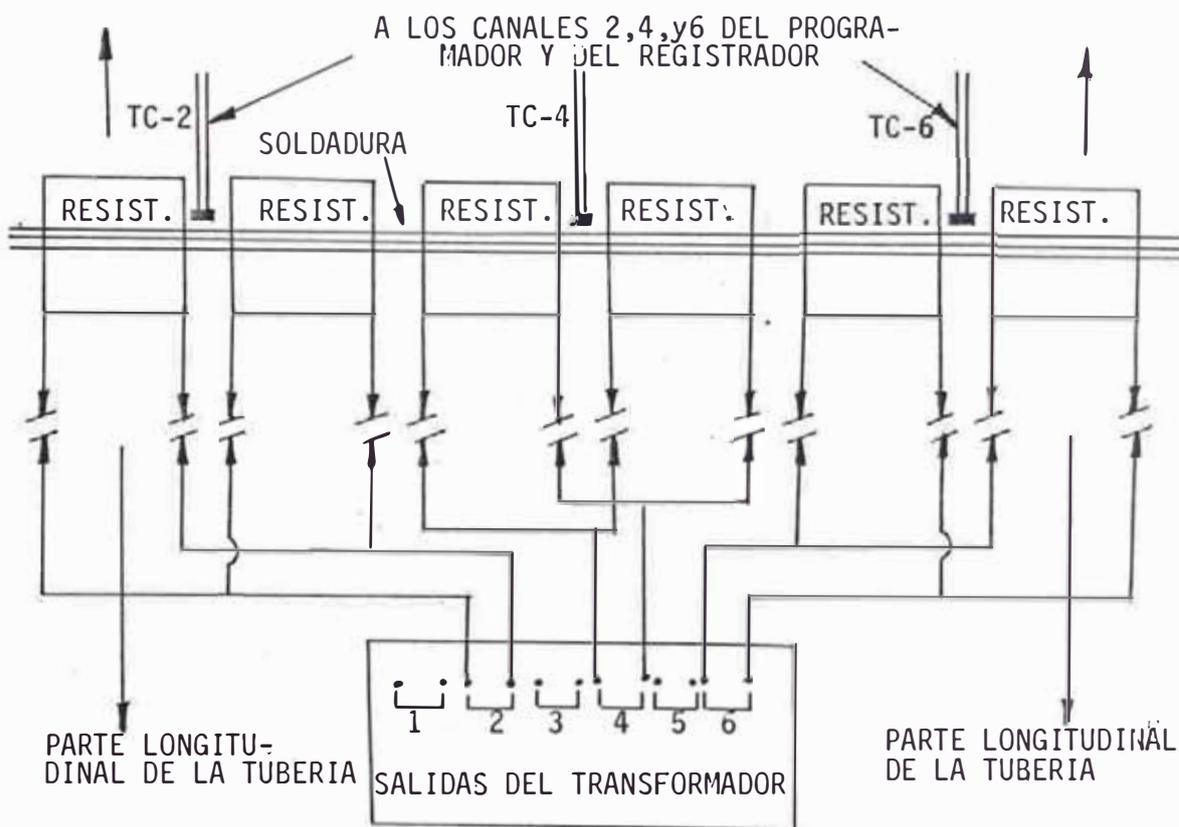


FIG. 4.2

Podemos notar en la distribución que hemos empleado, que de las seis zonas que disponemos, solamente hemos utilizado tres; de las cuales las restantes, pueden ser utilizadas en otra distribución similar, en otra junta de soldadura en tuberías de 30"; o también en tres juntas en tuberías de menor diámetro; o según las necesidades que se nos puedan presentar. en la que tengamos que hacer otros tratamientos electrotérmicos, en forma simultáneos; pero

todos bajo los mismos valores programados, o preestablecidos, para el ciclo del tratamiento.

Hemos ubicado tres termocuplas, distribuidas entre cada dos pares de resistencias. Esto quiere decir que tendremos, una termocupla tomando la lectura de temperatura, de la zona que está calentando, cada par de resistencias.

Es preciso enumerar las termocuplas, en concordancia con la zona que están monitoreando, y con las respectivas enumeraciones, de las entradas de las señales, en cada canal de nuestro programador. Así podemos conseguir un orden y una correspondencia, en los instantes de señalización luminiscente que tendremos, tanto en el transformador, como en el programador; cuando se estén dando estados de energización y desenergización, de cada zona, de acuerdo a las demandas de calor que se precisen, para cumplir con el control de los valores preestablecidos, que se deseen conseguir.

De igual forma, esta enumeración de las termocuplas, debe de servir de referencia, para en forma correspondiente, también, la llevemos a las entradas múltiples, de nuestro registrador; de tal forma que en el momento del registro sobre el papel, podamos identificar las mínimas diferencias de temperatura, que se puedan presentar, entre una parte y otra de la soldadura que se está calentando.

4.1.3 Recubrimiento Térmico

El siguiente paso es proteger, la superficie que será calentada; con elementos aislantes de alta temperatura, que tengan estructuras y formas adecuadas, de tal manera que nos permitan evitar, la mínima fuga de calor posible, que pueda interferir en el control del proceso. El ancho y espesor mínimo de estos recubrimientos aislantes son estandarizados en sus medidas, de acuerdo con el diámetro y espesor de las tuberías que van a ser calentadas. Mayormente se usan recubrimientos de un elemento compuesto de fibra de cerámica sílica y aluminio; envueltas en finísimos alambres de una alta aleación. En las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 mostramos las formas apropiadas, de emplazar las resistencias y de la aplicación de los recubrimientos térmicos.



FIG. 4.3



FIG. 4.4

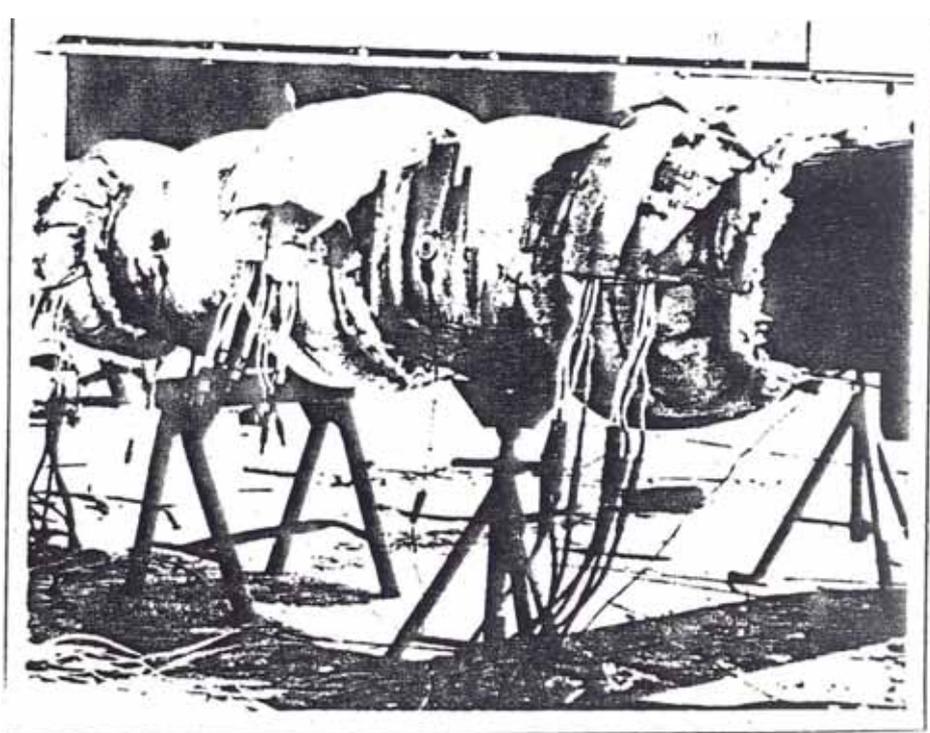


FIG. 4.5

4.1.4 Energización y Registro

Después de haber llevado a cabo estos tres pasos preliminares, estamos en condiciones de establecer en los potenciométros de nuestro programador; los valores correspondientes que determinarán el ciclo del tratamiento electrotérmico, que efectuaremos a la junta de soldadura:

Temperatura inicial = 70°F

Velocidad de calentamiento = 400°F/hr

Temperatura máxima = 1200°F

Tiempo de mantenimiento en la T. máxima = 1h. 30 min.

Velocidad de enfriamiento = 400°F/hr

Temperatura final = 500°F

Posteriormente a esto, procedemos a energizar el programador, el transformador y el registrador.

En la fig. 4.6 se muestra un modelo, del registro en papel cuando, el proceso ha sido óptimo. Y en la fig. 4.7 la gráfica de la característica de transferencia de control que le corresponde al proceso.

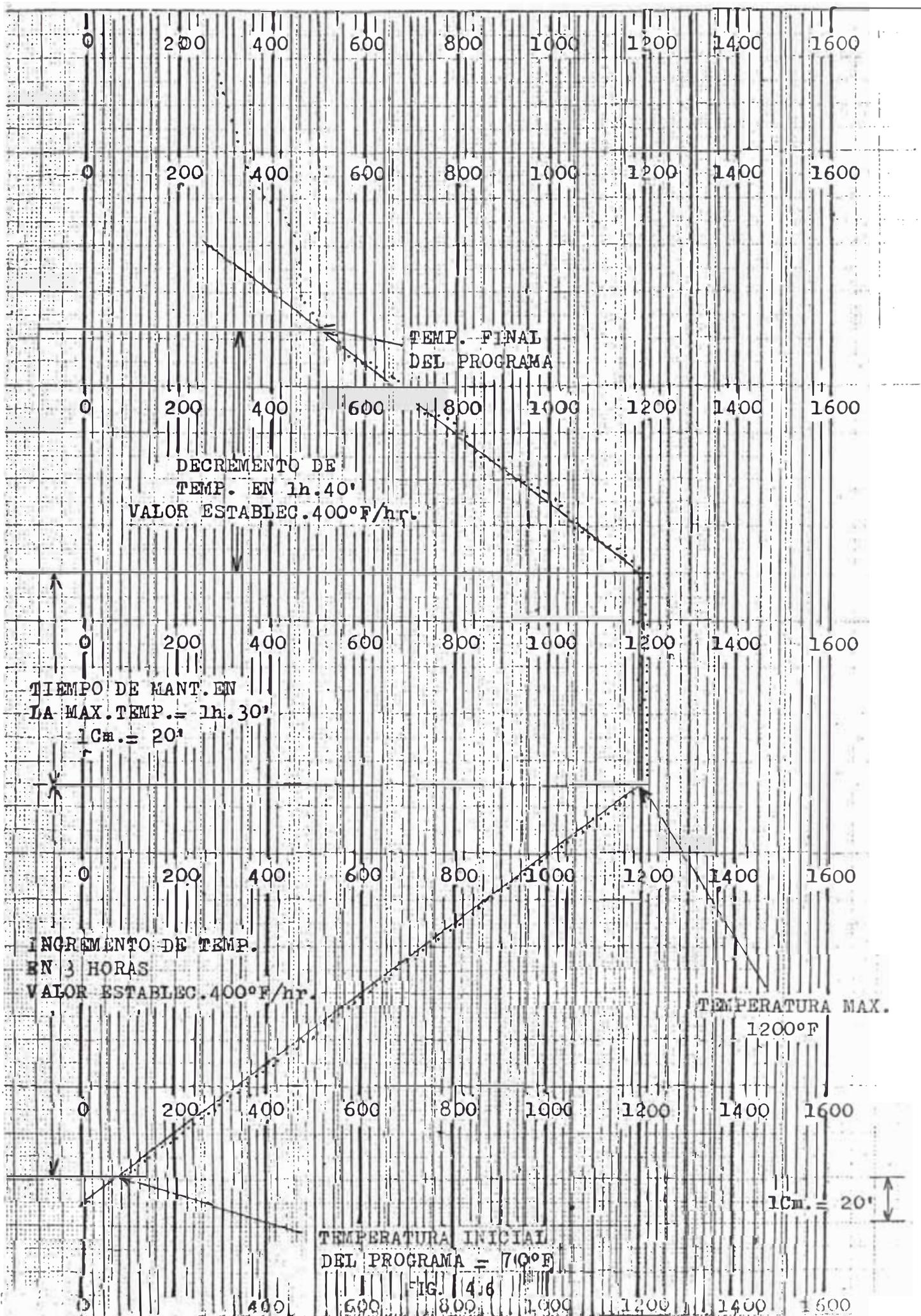


FIG 4.6

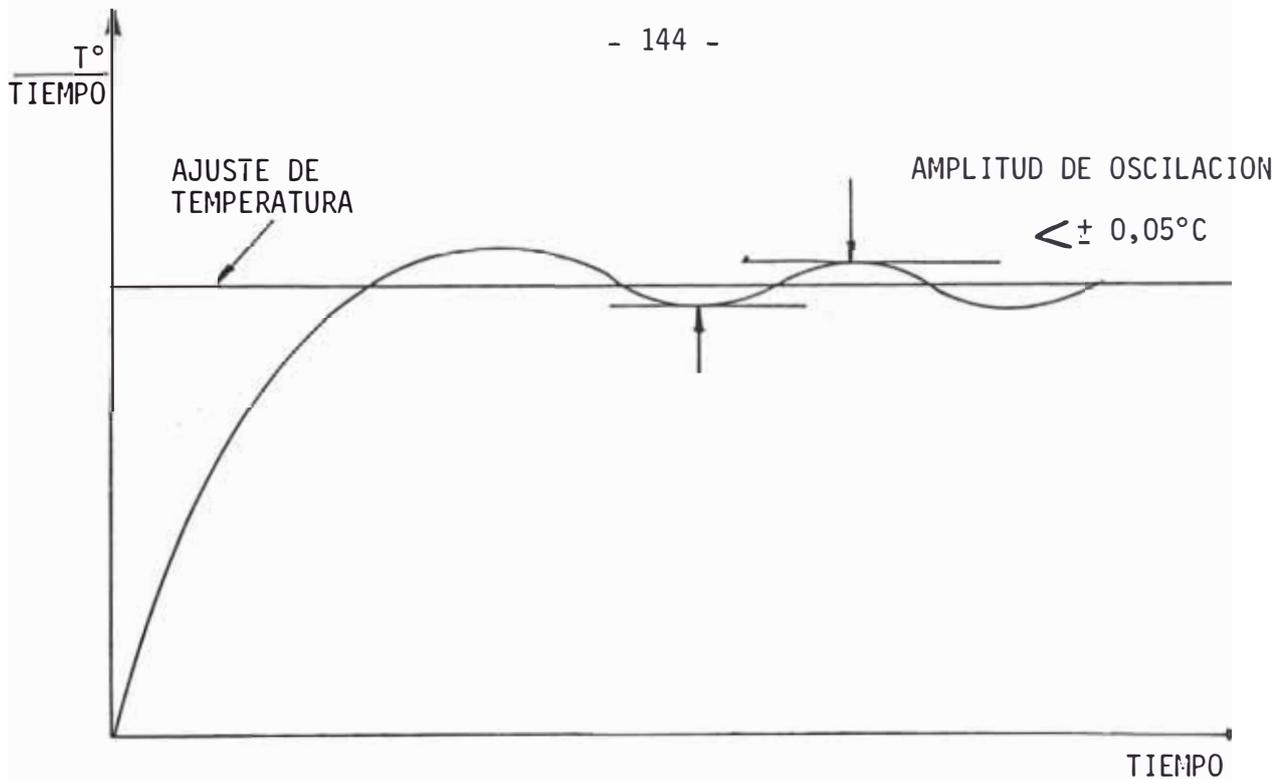


FIG. 4.7

4.2 Comparación con otro Metodo

Es necesario mencionar que la necesidad, de implementar, un servosistema con nuestro programador automático de seis canales, nace no solamente por el hecho, de querer cumplir, con normas o reglas internacionales, que exigen precisión en el control de estos parámetros, como hemos analizado anteriormente; sino que también, por la necesidad de superar métodos o técnicas anteriormente empleadas, que no nos proporcionaban, seguridad y exactitud en el manejo del proceso.

Una de las técnicas anteriores, a la cual nos referiremos en forma sucinta; es el método en el cual se utilizaba un generador de corriente continua (o máquina de soldar) como fuente de energía y elemento regulador de la temperatura.

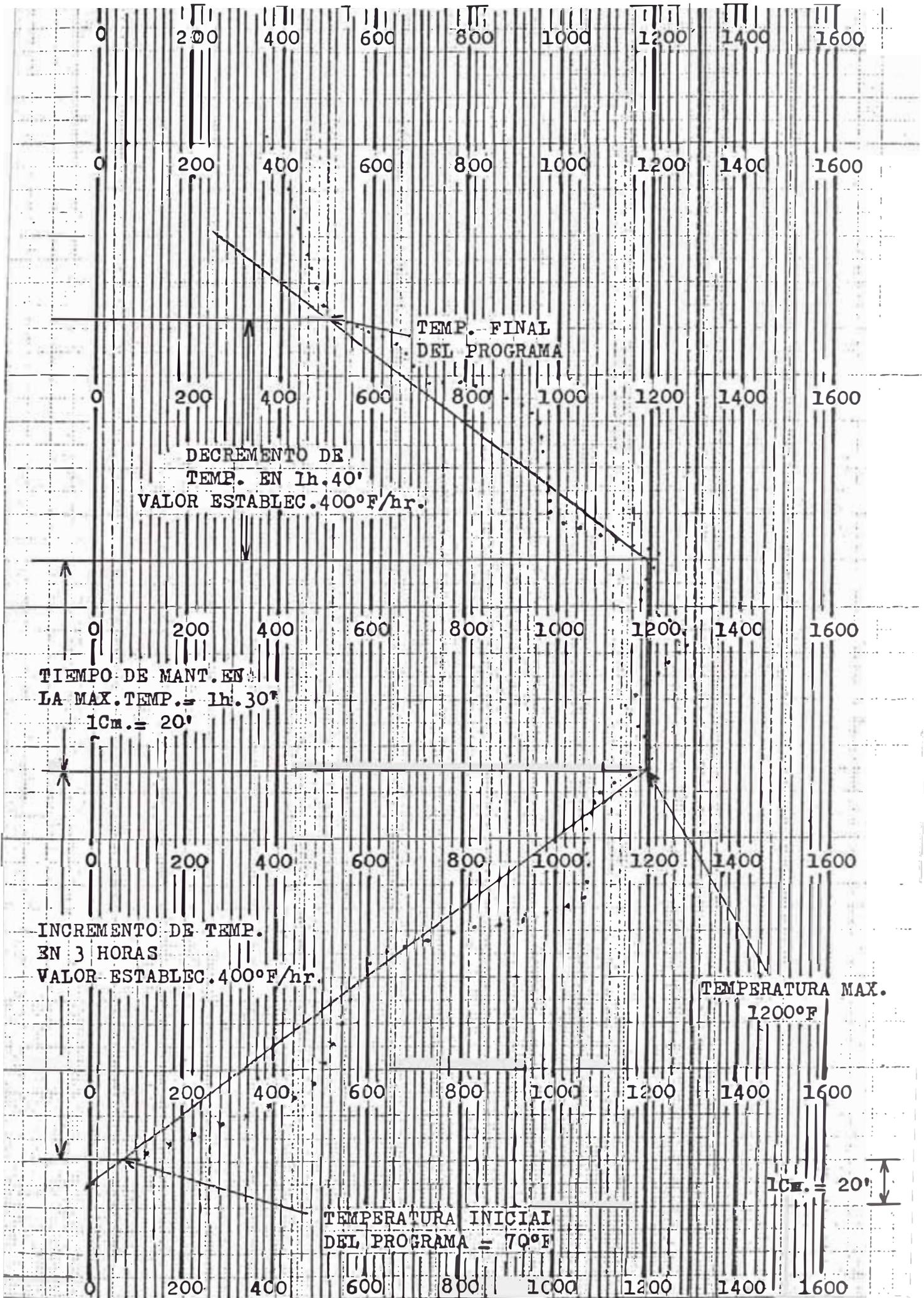
En éste método, el registrador que se utilice, sería el elemen-

to central del sistema de control; puesto que el registro de los valores que visualizáramos, en el papel tabulado; pasaría a ser la información de referencia; para nosotros poder manipular, el potenciómetro de control de corriente continua del generador; siendo así que los valores de temperatura que deseáramos conseguir, estarían directamente relacionado, con la permanente vigilancia visual del registrador, y el sentido común que tenga el operador, al manipular el potenciómetro. Cosas, desde ya desventajosas desde estos puntos de vista:

- 1.- Mayor desgaste de energía humana, para el ejercicio del control de los parámetros del proceso.
- 2.- Menor linealidad y precisión en la consecución de los valores que deseamos alcanzar.
- 3.- Lo limitado que sería, cuando se tratase de controlar 2 ó más procesos similares a la misma vez, cuando las necesidades lo exigen

Podríamos decir que el generador de C.C. utilizado aquí, nos estaría reemplazando a nuestro programador de seis canales y al transformador contactorizado, en el servosistema que hemos implementado; y evidentemente que nuestro diseño supera los inconvenientes mencionados.

En las figuras 4.8, y 4.9 mostramos el gráfico y las características de transferencia de control obtenidos con esta técnica, de tal manera que podamos establecer una comparación con nuestra técnica ya implementada.



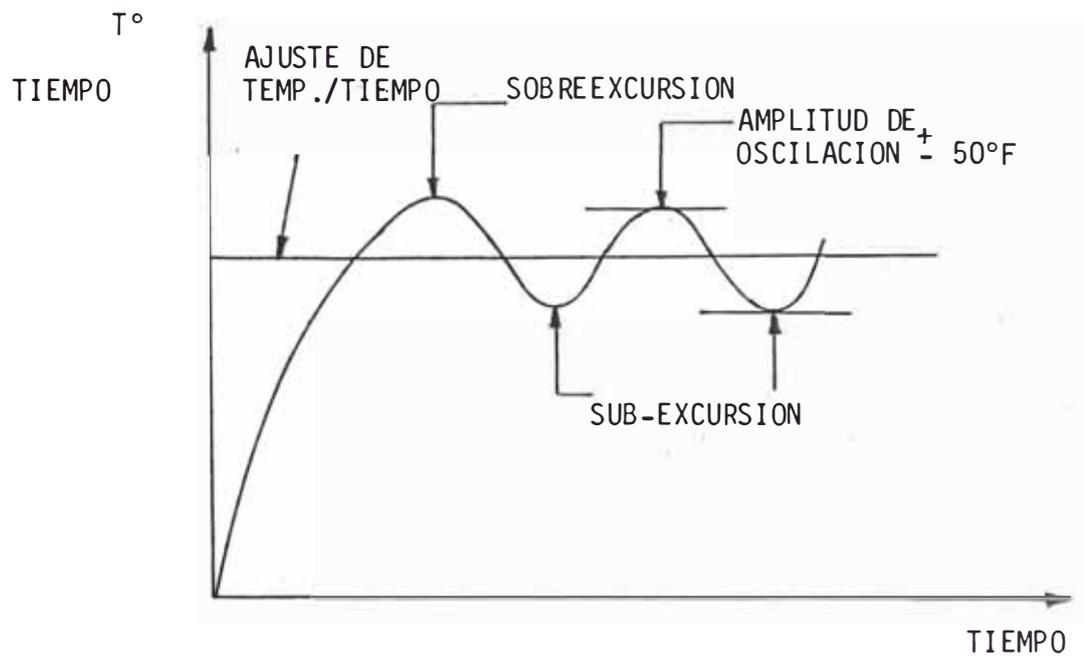


FIG. 4.9

CONCLUSIONES

1. Los Resultados gráficos que se obtienen de los tratamientos electrotérmicos efectuados con la participación de un elemento como el que hemos diseñado, y que tengan las características del gráfico de la fig. 4.6; evidentemente nos representa una alternativa, que al ser evaluada desde todo punto de vista, ya sea económico, técnico o laboral, mostrará con creces la superioridad sobre cualquier otra técnica de control anteriormente usada.
2. El elemento que hemos diseñado, representa la alternativa de ser un modelo acequible a ser perfeccionado, haciendo uso tal vez de otros componentes o dispositivos electrónicos con características adicionales que le proporcionen otras ventajas en el control que puedan adherirse a las que le hemos proporcionado.
3. Este diseño podría servir como un elemento de mucha importancia para nuestra Industria Petrolera en la actualidad, que ha iniciado un despegue promisorio en la Construcción de Gasoductos y en la cual su aplicación sería de singular importancia.

BIBLIOGRAFIA

1. "CIRCUITOS INTEGRADOS LINEALES", Henri Lilen
(Marcombo - 1975)
2. "ENCYCLOPEDIA OF INSTRUMENTATION AND CONTROL"
Douglas M. Considine, (Mc Graw Hill - 1971)
3. "ELECTRONICA, TEORIA DE CIRCUITOS" EDITORIAL PRENTICE
Robert Boylestad and Louis Nashelsky - 1983
4. "HANDBOOK OF INTEGRATED CIRCUIT OPERATIONAL AMPLIFIERS",
George B. Rutkowski (Prentice Hall 1975)
5. "MANUAL DE INFORMACION DE HONEYWELL"
6. "MANUAL DE INFORMACION DE EXOMET HEAT TREATING SPECIALIST"
7. "NATIONAL DATA BOOKS FOR DESIGNERS"
8. "SIGNETICS ANOLOG APPLICATIONS MANUAL", 1979.
9. "SISTEMAS DE CONTROL AUTOMATICO", Carlos Rider
10. "TTL DATA BOOKS FOR DESIGNERS"
