



161
2 es.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA
DIGITAL PARA CONTROL DE EQUIPOS
INDUSTRIALES DE PROTECCION
CATODICA.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO - ELECTRICISTA
AREA ELECTRICA - ELECTRONICA
P R E S E N T A:
ALBERTO VELASCO GARCIA



DIRECTOR DE TESIS:

M. EN I. ABEL CLEMENTE REYES

CIUDAD UNIVERSITARIA

1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

259955



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mi Padre-Madre Dios
del todo armonioso.*

*A mis padres Ana Ma. García Franck y
Agustín J. Velasco Mandujano.*

A mis hermanos Edgar, Sandra y Cristina.

A mis familiares y queridos amigos.

*A la Universidad Nacional, por la enorme
labor social que desempeña.*

*A mis profesores empeñosos y deseosos de
formar mejores generaciones con su ejemplo
y enseñanza.*

*En especial, René Rentería por su
invaluable apoyo y orientación.*

*A Pedro Colín Mercado,
por su importante apoyo.*

“Toda buena dádiva y todo don perfecto desciende de lo alto, del Padre de las luces, en el cual no hay mudanza, ni sombra de variación.”

Santiago 1:17

ÍNDICE GENERAL

PRÓLOGO	7
INTRODUCCIÓN	8
I CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE PROTECCIÓN CATÓDICA	12
1.1 EL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN METALES	13
1.1.1 CONCEPTOS BÁSICOS	13
1.1.2 EL MECANISMO DE CORROSIÓN	15
1.1.3 TIPOS DE CELDAS DE CORROSIÓN EN TUBERÍAS	16
1.2 MÉTODOS DE CONTROL DE CORROSIÓN EN TUBERÍAS	17
1.2.1 CUBIERTAS	17
1.2.2 JUNTAS DE AISLAMIENTO	17
1.2.3 PROTECCIÓN CATÓDICA	18
1.3 PROTECCIÓN CATÓDICA A TUBERÍAS	18
1.3.1 TEORÍA BÁSICA	19
1.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA	19
1.3.3 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA	20
1.3.4 MODELO ELÉCTRICO	21

II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
2.1 RECTIFICADORES AUTOMÁTICOS	24
2.1.1 RECTIFICADORES DE ONDA COMPLETA	24
2.1.2 CONTROL DE FASE	26
2.1.3 CÁLCULO DEL VOLTAJE Y CORRIENTE DE DIRECTA	27
2.1.4 FACTOR DE POTENCIA	28
2.1.5 ARMÓNICAS	28
2.2 ESQUEMAS BÁSICOS DE CONTROL PARA SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA	29
2.2.1 CONTROL POR POTENCIAL CON LÍMITE DE CORRIENTE	29
2.2.2 CONTROL POR CORRIENTE	30
2.2.3 CONTROL POR VOLTAJE CON LÍMITE DE CORRIENTE	30
2.3 ADECUACIÓN DE LAS SEÑALES QUE INTERVIENEN EN UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA	30
2.3.1 MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE LA TUBERÍA A PROTEGER, CON RESPECTO AL MEDIO AMBIENTE	30
2.3.2 MEDICIÓN DEL VOLTAJE DE SALIDA DEL RECTIFICADOR	30
2.3.3 MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DE SALIDA DEL RECTIFICADOR	31
2.3.4 SEÑAL DE SINCRONÍA	31
2.3.5 CONEXIÓN DEL EQUIPO A TIERRA FÍSICA	31
2.4 DEFINICIÓN DEL PROYECTO	32

III DISEÑO DEL SISTEMA	33
3.1 INTRODUCCIÓN	34
3.1.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CONTROLADORES DIGITALES Y ANALÓGICOS	34
3.1.2 INTEGRACIÓN DE UNA SOLUCIÓN A PARTIR DE EQUIPOS COMERCIALES CONVENCIONALES RESPECTO DEL DISEÑO DETALLADO DEL EQUIPO	34
3.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO	35
3.3 ESTRUCTURA GENERAL DEL SISTEMA DE RECTIFICACIÓN AUTOMÁTICA	37
3.4 ESPECIFICACIONES DEL CONTROLADOR	38
3.4.1 MODOS DE CONTROL	38
3.4.2 ALMACENAMIENTO DE PARÁMETROS DE CONTROL	38
3.4.3 SEÑAL DE DISPARO PARA LOS SCR'S	38
3.5 PARTICIÓN DEL SISTEMA EN MÓDULOS	39
3.5.1 MÓDULO DE CONTROL DIGITAL DEL RECTIFICADOR	39
3.5.2 MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS	40
3.5.3 MANEJADORES DE LOS SCR'S	40
3.6 SELECCIÓN DE LA FAMILIA DE MICROPROCESADORES	40
3.6.1 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PALABRA	40
3.6.2 FRECUENCIA DE TRABAJO DEL PROCESADOR	40
3.6.3 CAPACIDAD DE DIRECCIONAMIENTO DE MEMORIA	41
3.6.4 EVALUACION DE ALTERNATIVAS	41

3.7	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MÓDULO DE CONTROL	43
3.7.1	EL MICROCONTROLADOR 8031	44
3.7.2	EL CONVERTIDOR ANALÓGICO-DIGITAL	46
3.8	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS	48
3.8.1	ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL	49
3.8.2	RECUPERACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL	49
3.9	MANEJADORES DE SCR'S	50
3.10	SOFTWARE	51
3.10.1	PARTICIÓN DEL ALGORITMO EN MACROS	51
3.10.2	SELECCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN	53
3.10.3	PARTICIÓN FUNCIONAL DE CADA MACRO	53
IV	IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DE OPERACIÓN	58
4.1	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	59
4.2	DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS FINALES	59
4.2.1	OBJETIVOS DE LA PRUEBA	59
4.2.2	DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS	60
4.2.3	LIMITANTES DE LA PRUEBA	61
4.3	RESULTADOS	61
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	62

CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFÍA	66
APENDICE A: DIAGRAMAS ELÉCTRICOS	67
APENDICE B: PROGRAMA DE CONTROL	82

PRÓLOGO

Dentro del amplio campo de la Ingeniería Eléctrica y Electrónica, existen múltiples áreas de aplicación y desarrollo de las cuales seleccionar un tema de investigación. En lo particular, el tema de "Diseño y construcción de un sistema digital para control de equipos industriales de protección catódica", ha sido de interés para mí desde su propuesta. Si bien mi área de estudio no fue directamente protección catódica, si lo ha sido la electrónica y la eléctrica, así como la instrumentación y el control.

Desde muy joven tuve especial gusto por la automatización de procesos. La robótica, como área de aplicación de la electrónica, siempre me pareció interesante. Cuando comencé la carrera de Ingeniería Mecánica-Eléctricista, opté por la rama de Eléctrica-Electrónica, y posteriormente, como módulo optativo de especialización, el área de Sistemas Digitales. En este último módulo, aprendí los rudimentos del diseño de sistemas con microprocesadores, descubriéndolos como una herramienta útil, versátil y eficiente en la resolución de problemas de ingeniería.

El objetivo de este trabajo de tesis es, en esencia, presentar el desarrollo de un controlador digital para rectificadores de potencia, que en conjunto con el rectificador mismo, proporcionen una fuente de corriente directa variable y controlada, para sistemas de protección catódica.

Así mismo, el diseño y construcción del sistema en su conjunto, requirió de la participación y colaboración múltiples personas, quienes a lo largo del desarrollo de este proyecto, brindaron sus ideas y apoyo. Este proyecto de tesis es el resultado de un trabajo arduo y prolongado, un esfuerzo en conjunto hasta lograr la meta.

Deseo hacer un reconocimiento al M.I. Abel Clemente R. por su especial apoyo y confianza a lo largo del desarrollo de este sistema. De igual manera, deseo expresar mi gratitud al Lic. René Rentería Solís por su gran apoyo en la elaboración de este trabajo.

Alberto Velasco García.

INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo de tesis es diseñar y construir un controlador digital para rectificadores de potencia, aplicados a Sistemas de Protección Catódica. Dicho controlador forma parte de la estructura de un sistema digital de control, el cual incluye, además, algunas otras funciones, mismas que no se describen aquí puesto que son ajenas al alcance definido para este trabajo.

La unidad funcional que aquí se describe, tendrá como tarea principal, monitorear y controlar las salidas de voltaje y corriente del rectificador de potencia bajo las tres modalidades siguientes:

1. Control por potencial con límite de corriente.
2. Control por voltaje con límite de corriente.
3. Control por corriente.

Así mismo, deberá poder intercambiar información con el resto del sistema, a través de una interfase de comunicación interna.

La sección del sistema digital de control, que escapa los alcances de este trabajo de tesis, corresponde a la parte de Comunicación con el Usuario. Esta sección es la encargada de proveer la comunicación de y hacia el usuario, mediante un panel de control. Éste incluye entre algunas de sus características, visualizadores numéricos y un teclado de programación con el cual se ingresen los modos y parámetros de control a la unidad.

Por otra lado, este trabajo de tesis tiene su enfoque principal en el Control y la Adquisición de datos y consta, esencialmente, de tres partes. La primera de ellas, contenida en los capítulos I y II, expone los elementos de carácter teórico, que enmarcan y fundamentan al desarrollo aquí planteado; la segunda descrita en el capítulo III presenta los criterios de diseño considerados y el desarrollo del sistema en particular; y la tercera, expuesta en el capítulo IV, en donde se describen las pruebas efectuadas y se presentan los resultados obtenidos.

El capítulo primero es una introducción genérica al tema de Protección Catódica, donde se explican brevemente algunas de las causas de la corrosión en metales, los criterios para el control de corrosión más utilizados y la teoría básica que rige a los sistemas de protección catódica a tuberías.

En el segundo capítulo, se exponen algunos de los elementos teóricos en las áreas de ingeniería eléctrica y electrónica, que dan fundamento al diseño del sistema propuesto. En específico, se abordan conceptos sobre control de rectificadores por fase, esquemas de control más comunes en protección catódica, así como algunas consideraciones de utilidad en la adquisición de las señales presentes en estos sistemas.

En el tercer capítulo se plantean los criterios de diseño considerados y se expone el desarrollo del sistema como resultado del seguimiento de una metodología de diseño.

En el cuarto capítulo se presenta una descripción de las pruebas efectuadas al sistema y una tabla con los resultados obtenidos. Al final de este escrito, se incluyen las conclusiones a las que se pudo llegar, dados los resultados experimentales obtenidos.

CAPÍTULO I



1.1 EL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN METALES.

1.1.1 CONCEPTOS BÁSICOS.

Corrosión.

La corrosión se define como el resultado destructivo de una reacción química entre un metal o aleación de metales y su medio ambiente¹.

Electronegatividad de los materiales.

“La electronegatividad de un átomo es una medida de su atracción por los electrones en la unión entre él y otro átomo. Los átomos que atraen fuertemente a los electrones, tienen electronegatividades elevadas”². Los metales son los elementos cuyos átomos pierden más fácilmente sus electrones; por lo tanto tienen baja electronegatividad. Esta fácil pérdida de electrones, hace que sus átomos se ionicen. Sin embargo, la capacidad de una sustancia de perder electrones es relativa; debe haber otra sustancia capaz de recibir los electrones que esta está perdiendo. La sustancia que reciba estos electrones, deberá ser más electronegativa que la anterior. Para conocer el nivel de electronegatividad de los metales, se dispone de lo que se conoce como la *serie de actividad electromotriz* o *serie electroquímica de los metales* (ver tabla 1-1). Esta serie toma como referencia al electrodo de hidrógeno.

Metal	Voltaje [volts]
Litio	-3.045
Calcio	-2.87
Magnesio	-2.37
Aluminio	-1.66
Manganeso	-1.18
Zinc	-0.762
Fierro	-0.44
Estaño	-0.14
Plomo	-0.13
Hidrógeno	0.00
Cobre	0.34 a 0.52
Plata	0.80
Platino	1.20
Oro	1.50 a 1.68

Tabla 1-1. Serie electroquímica de los metales.

La serie electroquímica de los metales establece los potenciales característicos naturales que los metales asumen con respecto a un electrolito formado por una solución de sus propias sales, medidos con respecto a una celda de referencia estándar de hidrógeno.

¹ JONES DENNY. Principles and prevention of corrosion. Pág. 4.

² MADRAS, SAMUEL. Química. Curso preuniversitario. Pág. 162

Celdas electroquímicas.

“Una celda electroquímica es una combinación del tipo Conductor electrónico (metal) - Conductor iónico (electrolito) - Conductor electrónico (metal) en la cual se pueden llevar a cabo procesos electroquímicos con el paso de una corriente eléctrica. Si la celda electroquímica produce energía causada por el consumo de energía química, se dice que se tiene una celda galvánica o pila. Si, en cambio, si la celda electroquímica consume corriente de una fuente de corriente externa, almacenado como consecuencia, energía química, se dice que es una celda electrolítica... Una celda de corrosión es una celda o pila galvánica en la cual las reacciones electroquímicas que tienen lugar conducen a la corrosión.”¹

Para entender el funcionamiento de una celda electroquímica, se definirá la palabra *cátodo* como “un material capaz de tomar electrones de un circuito externo”² y *ánodo* como “un material que proporciona electrones a un circuito externo”³. Se recuerda que por convención, el sentido de la corriente es opuesto al sentido del flujo de los electrones.

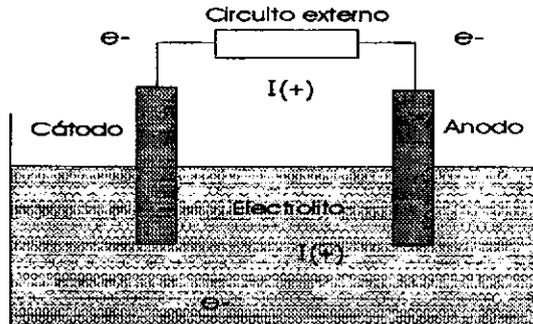


Fig. 1-1. Celda electroquímica.

1.1.2 EL MECANISMO DE CORROSIÓN.

El mecanismo básico de corrosión en tuberías puede ser simulado mediante una *celda de corrosión*. Esta se compone de lo siguiente:

- Un cátodo y un ánodo.
- Una diferencia de potencial eléctrico entre el ánodo y el cátodo.
- Una trayectoria metálica que conecte al ánodo y al cátodo, eléctricamente.
- Un electrolito eléctricamente conductivo, en el cual queden sumergidos tanto el ánodo como el cátodo.

¹ AVILA J. Y GENESCA J. Más allá de la herrumbre II. Pág. 37.

² DURACELL CORPORATION. <http://www.duracel.usa.com/education/anatomy.html>

³ DURACELL CORPORATION. Ob. cit. Pág. Anatomy.html.

Debido a la diferencia de potencial a la que están sometidos tanto ánodo como cátodo, se genera un flujo de electrones desde el ánodo hacia el cátodo por el circuito externo (trayectoria metálica que conecta al ánodo con cátodo). Este flujo hace que en el ánodo se produzca una carencia de electrones, haciendo a éste más positivo. Esto causa que los iones negativos (OH^-) disueltos en el electrolito, se sientan atraídos eléctricamente hacia el ánodo, reaccionando con éste para formar hidróxido ferroso ($\text{Fe}(\text{OH})_2$). Más adelante el anterior compuesto seguirá reaccionando hasta formar hidróxido férrico ($\text{Fe}_2(\text{OH})_3$), que es el óxido que se conoce comúnmente.

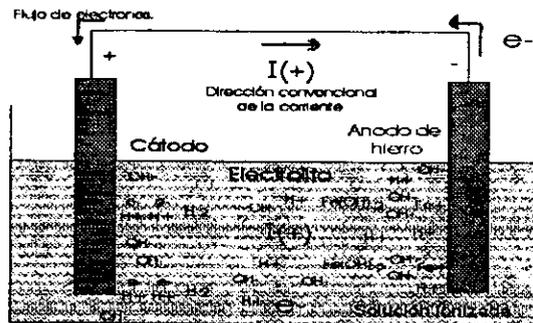


Fig. 1-2. Representación diagramática de una celda de corrosión.

Del lado del cátodo, éste recibirá un exceso de electrones provenientes del ánodo a través de la trayectoria metálica. Esto hará que el cátodo se torne más negativo atrayendo iones positivos de hidrógeno (H^+) disueltos en el electrolito. Al combinarse, los iones de hidrógeno se transformarán en hidrógeno puro (H_2). Este proceso se ilustra en la figura 1-2.

En una tubería enterrada o sumergida, se producen *microceldas* de corrosión, en las cuales se generan de manera natural, zonas anódicas y catódicas, como se observará en la figura 1-3. Las causas de la polarización natural de la tubería se mencionaran más adelante. En un sistema de protección catódica, la trayectoria metálica que conecta eléctricamente a las zonas anódicas con las catódicas será generalmente la tubería misma; y el electrolito circundante, el medio en que se encuentra sumergida (ver fig. 1-3).

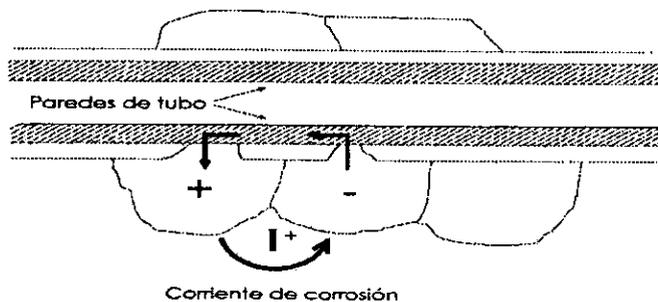


Fig. 1-3. Representación de una pila de corrosión en una tubería.

1.1.3 TIPOS DE CELDAS DE CORROSIÓN EN TUBERÍAS.

En esta sección se explican algunos de los diferentes tipos de celdas de corrosión que se encuentran en tuberías. Lo que determina el tipo de celda, es la causa del establecimiento de la diferencia de potencial eléctrico entre zonas anódicas y catódicas de la misma.

Celdas de corrosión por metales disímiles.

Esta celda se establece cuando se hace uso de metales diferentes en la construcción de la tubería, y se cumple que ambos tubos están unidos eléctricamente entre si y que además, están en contacto con el mismo electrolito. Si esto es así, se produce una diferencia de potencial en la unión entre ambos metales. La magnitud de este potencial, dependerá de la posición relativa que cada metal guarde, con respecto al otro, en serie electroquímica de los metales (ver tabla 1-1).

Por otra parte, es más común el uso de una serie galvánica práctica, es decir una serie cuyo potencial de referencia sea diferente al del electrodo de hidrógeno. Esto se debe a que dicho electrodo resulta frágil para ser utilizado en aplicaciones de campo. En su lugar se puede utilizar electrodo de cobre-sulfato de cobre, como electrodo de referencia (ver tabla 1-2).

Voltaje [volts]	Metal
-1.75	Magnesio
-1.10	Zinc
-0.80	Aluminio
-0.5 a -0.80	Acero
-0.2 a -0.50	Acero oxidado
-0.50	Fierro
-0.50	Plomo
-0.20	Cobre
0.30	Grafito

Tabla 1-2. Serie galvánica práctica¹.

Celda de corrosión generada por suelos diferentes.

Otra posibilidad de generación de celdas de corrosión en las tuberías es mediante el paso de la tubería a través de suelos disímiles. Como se observa en la figura 1-4, el potencial del metal de la línea con respecto al electrolito representado por el suelo "A" es ligeramente diferente al potencial del mismo metal con respecto al electrolito representado por el suelo "B". El potencial natural o potencial de media celda de un metal con respecto a su medio ambiente puede variar con las diferencias en la composición del electrolito. Esto da origen a la diferencia de potencial ilustrada y satisface las condiciones necesarias para establecer una celda de corrosión. De acuerdo con la figura 1-4, la tubería en el suelo "A" es anódica con respecto a la sección de tubería en el suelo "B".

¹ PEABODY A.W. Control of pipeline corrosion. Pág. 5.

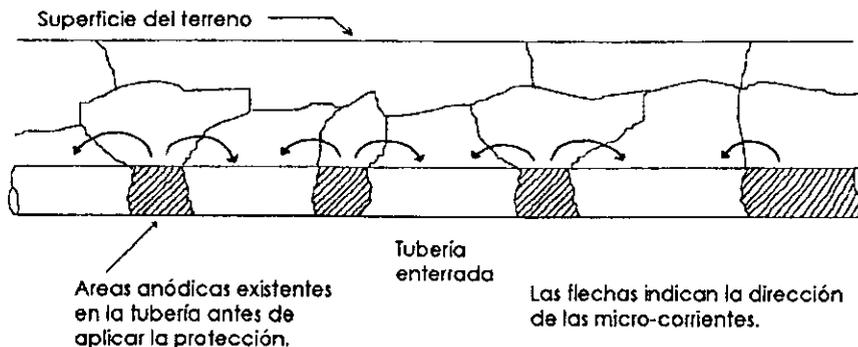


Figura 1-4. Corrosión por suelos diferentes¹.

Celda de corrosión producida por la unión de tramos de tubería nueva y vieja.

Cuando tramos de tubería nueva son conectados galvánicamente con tramos de tubería vieja, se presenta una situación similar a la de las celdas de corrosión generadas por dos metales distintos. Normalmente, el valor de electronegatividad de un metal, por ejemplo el acero nuevo, no será igual que el del acero con algún nivel de corrosión. De esta manera el tramo nuevo fungirá como ánodo de esta sección y se corroerá más rápidamente que el resto de la tubería.

1.2 MÉTODOS DE CONTROL DE CORROSIÓN EN TUBERIAS.

En general, existen tres métodos diferentes para controlar el proceso de corrosión en tuberías: el uso de cubiertas protectoras, de juntas aisladas y la protección catódica.

1.2.1 CUBIERTAS.

El propósito de estas cubiertas es el de recubrir el metal de la tubería con una capa de material eléctricamente aislante. La función de esta cubierta es la de aislar el metal del contacto directo con el electrolito circundante e interponer una resistencia eléctrica elevada en el circuito ánodo-cátodo, de manera que no fluya una corriente de corrosión significativa del ánodo al cátodo.

1.2.2 JUNTAS DE AISLAMIENTO.

Las juntas de aislamiento son utilizadas para evitar el contacto directo entre secciones diferentes de tubería en las líneas, interponiendo una resistencia muy elevada entre ellas. Esto evita la propagación de corrientes de corrosión entre los tramos de tubería.

¹ PEABODY, A.W. Ob. cit. Pág. 7.

1.2.3 PROTECCIÓN CATÓDICA.

La protección catódica es un método para el control de corrosión, el cual consiste básicamente en la inyección de corriente directa, proveniente de alguna fuente externa, para contraponerse a la descarga de corriente de corrosión proveniente de las áreas anódicas. Esto se logra haciendo que todas las porciones de la estructura protegida sean colectoras de corriente del electrolito circundante, de manera que toda la superficie expuesta se convierta en una sola área catódica.

Por lo general, en la práctica, los sistemas de control de corrosión, suelen combinar más de uno de los métodos de control de corrosión, antes mencionados.

1.3 PROTECCIÓN CATÓDICA A TUBERÍAS.

1.3.1 TEORÍA BÁSICA.

Se ha visto hasta ahora que independientemente de las posibles causas de la generación de celdas de corrosión en tuberías, en cada uno de los casos, se observa la presencia de zonas tanto anódicas como catódicas en las tuberías. Así mismo se ha observado que en las áreas anódicas, la corriente de corrosión fluye desde el metal de la tubería hacia el electrolito circundante (suelo o agua), y por lo tanto, el metal en éstas zonas se corroe. Por otro lado, en el caso de las zonas catódicas, éstas son receptoras de la corriente proveniente del electrolito circundante y no presentan corrosión en ellas.

Con base en lo anterior, se deduce que si cada parte del metal expuesto en la superficie de la tubería colecta corriente, éste no deberá corroerse en su superficie, ya que ésta será completamente catódica. A partir de una fuente de corriente directa externa, se hace fluir una corriente sobre toda la superficie de la tubería. Cuando la cantidad de corriente que se aplica es la adecuada, ésta contrarrestará la corriente de corrosión saliente de las zonas anódicas de la tubería y se generará un flujo de corriente neto hacia la tubería en estos puntos. De esta manera, toda la tubería se transformará en una zona catódica y por lo tanto protegida.

Para obtener este flujo neto de corriente directa hacia la tubería en todos sus puntos, es necesario que el voltaje producido por la fuente del sistema de protección catódica sea mayor que el voltaje a superar producido por las celdas de corrosión. La distribución de esta corriente externa se hace por medio de una "cama de tierra". Como es de observar, la protección catódica no elimina el efecto de corrosión, más sí lo localiza en un punto conocido o cama de tierra.

1.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

Dependiendo del método utilizado para proporcionar la diferencia de potencial o voltaje externo, los sistemas de protección catódica se clasifican en: sistemas de protección catódica con ánodos galvánicos y sistemas de protección catódica de corriente impresa.

- **Sistemas de protección catódica con ánodos galvánicos.**

En la sección 1.1 se explicó el funcionamiento de una celda de corrosión. Con base en el principio de que entre dos metales diferentes siempre habrá una diferencia natural de potencial, el método de protección con ánodos galvánicos establece a propósito una celda de corrosión entre metales disímiles, seleccionando a un metal muy activo como ánodo del sistema. De esta manera el ánodo, al corroerse, proporcionará la corriente necesaria para contrarrestar a las celdas de corrosión normalmente existentes en los ductos metálicos.

Cabe mencionar que bajo este esquema, la capacidad de corriente disponible al sistema queda limitada por la propia capacidad electroquímica de generación de corriente del ánodo. Generalmente, los ánodos galvánicos son utilizados en aplicaciones en las cuales la corriente de protección necesaria es pequeña y la resistividad del suelo baja.

- **Sistemas de protección catódica con corriente impresa.**

Se llaman de corriente impresa debido a que se hace uso de una fuente externa de voltaje para proteger la estructura. Esta fuente de corriente directa se coloca entre la estructura a proteger y la cama de tierra, imprimiéndole así un flujo neto de corriente al circuito.

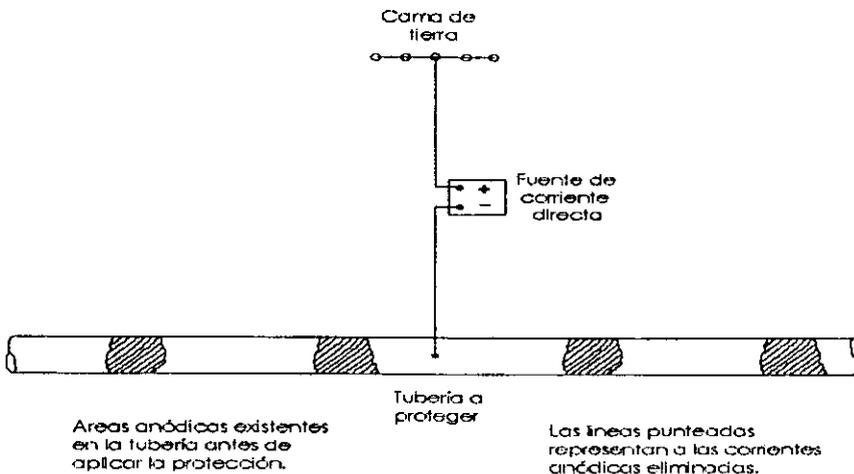


Fig. 1-5. Sistema básico de protección catódica¹.

¹ PEABODY, A. W. Ob. cit. Pág. 19.

1.3.3 CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

Cuando se habla de criterios de evaluación, se hace referencia al cómo poder determinar si una estructura está o no suficientemente protegida. Como se vio con anterioridad, el método de protección catódica es un método de impresión de corriente.

El principal criterio utilizado para indicar el grado de protección, incluso el de sobreprotección, es la medición de potencial de la estructura protegida con respecto a su medio ambiente. Dicho potencial aceptado y empleado por ingenieros especialistas en corrosión es de $-0.85V$ contra la semipila de $Cu-SO_4Cu$ saturado o $-0.53V$ en la escala normal de H_2 .

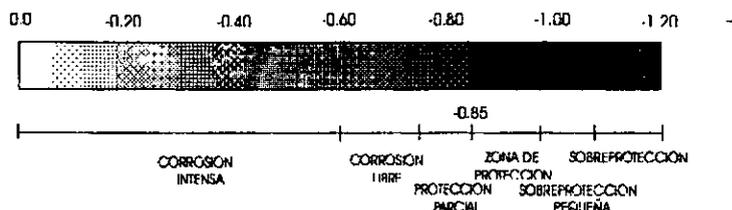


Fig. 1-6. Escala de potencial relativa al electrodo de $Cu-SO_4Cu$.¹

Aunque el criterio anterior es uno de los más aceptados, algunos autores han propuesto otros criterios. En ocasiones en las cuales no es posible tomar mediciones de potencial de la estructura protegida, es posible determinar la densidad de corriente necesaria por medio del uso de tablas de requerimientos de corriente de acuerdo a materiales usados y tipo de medio ambiente que los rodea. En otras se indica la cantidad aproximada de corriente de protección por unidad de longitud de tubería necesaria, tomando en consideración el espesor y resistencia efectiva de la cubierta de protección. Bajo ciertas condiciones, el nivel de voltaje aplicado por la fuente externa, puede ser considerado como criterio de protección.

¹ AVILA J. Y GENESCA J. Ob. cit. Pág. 35.

1.3.4 MODELO ELÉCTRICO.

Se ha visto que en protección catódica se hace fluir una corriente desde una fuente externa hacia la tubería. Esta acción generará una diferencia de potencial entre la cama de tierra y la tubería, siendo la cama de tierra positiva y la estructura negativa. Existen dos tipos de instalaciones de camas de tierra: las *remotas* y las *cercanas*. La que más utilizada es la cama remota, ya que es la que ofrece mayor cobertura y una protección más uniforme.

En una instalación de cama de tierra remota, la descarga de corriente a través de los ánodos que forman la cama de tierra provoca una caída de voltaje entre los diferentes puntos de las trayectorias de irradiación de la corriente. En puntos cercanos a la cama de tierra, esta caída de voltaje por unidad de distancia es relativamente alta. Al avanzar sobre la trayectoria de la corriente, esta caída de voltaje por unidad de distancia disminuye paulatinamente hasta un punto en el que ya no se registran caídas de voltaje significativas. A este punto se le conoce como punto de *tierra remota*, delimitando así el *área de influencia* de la cama de tierra.

Lo mismo sucede con el área catódica del sistema o tubería, donde la corriente que fluye hacia ésta, genera caídas de voltaje en el terreno adyacente, definiendo así también una área de influencia catódica alrededor de la tubería. Ahora bien, si la cama de tierra se localiza lo suficientemente lejos de la línea o tubería, las áreas de influencia de cada una de ellas no se interceptarán, y se considerará entonces que la cama de tierra se encuentra *remota* respecto de la línea. Bajo tales condiciones, la corriente proveniente de la cama de tierra fluirá hacia una masa general de tierra la cual se considerará sin resistencia o como un conductor infinito. De la misma manera, la corriente proveniente de dicho conductor, fluirá hacia la tubería causando una caída de voltaje a través de la resistencia entre la línea y el conductor infinito. Esto se puede observar mas claramente en la figura 1-7.

Al final lo que se obtiene es que la línea se hace suficientemente negativa respecto de tierra remota, proporcionado así la protección requerida.

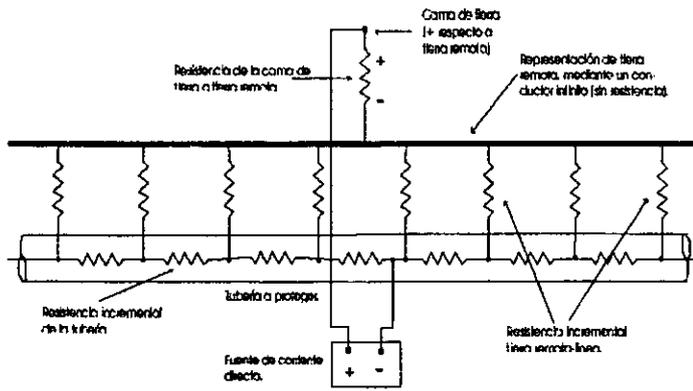


Fig. 1-7. Modelo eléctrico de un sistema de protección catódica con cama de tierra remota.

CAPÍTULO II



**PLANTEAMIENTO
DEL
PROBLEMA**

Aunque existen varias alternativas de fuentes de corriente directa, siempre que exista un punto de suministro de corriente alterna cercano, se considera que la forma más sencilla de obtener corriente directa será mediante el uso de un rectificador¹. En el caso de que el suministro de energía eléctrica no se encuentre cercano, se puede optar por el uso de otros dispositivos más complejos como moto-generadores acoplados a rectificadores o arreglos de celdas fotovoltaicas y bancos de baterías recargables, entre otros.

2.1 RECTIFICADORES AUTOMÁTICOS.

En instalaciones de protección catódica de corriente impresa, es común el uso de ánodos de sacrificio para generar las corrientes de protección cuando la corriente que se demanda es pequeña y de rectificadores de potencia cuando los requerimientos de corriente son mayores.

Normalmente dichos rectificadores tienen la posibilidad de modificar su valor de su salida en voltaje y corriente de manera manual, dentro del límite de diseño del equipo. Sin embargo en zonas en las cuales los cambios climatológicos son frecuentes, las condiciones de resistividad de los suelos varían, requiriéndose del ajuste correspondiente en la salida del rectificador. La finalidad de un rectificador automático es proveer una salida autoregulada constante independientemente a los cambios en el medio ambiente.

2.1.1 RECTIFICADORES DE ONDA COMPLETA.

Un equipo de rectificación de potencia monofásico consta básicamente de dos partes: un transformador de potencia, generalmente de reducción, ya sea enfriado por aire o por aceite y un circuito o red de rectificación.

Dentro de los rectificadores de onda completa monofásicos, se conocen dos tipos principalmente. El primero está conformado por un transformador con tap central en el embobinado secundario y dos diodos rectificadores (ver fig. 2-1(a)); y el segundo utiliza un transformador de un solo embobinado en el secundario, sin tap central y un puente rectificador de 4 diodos (fig. 2-1(b)).

Las formas de onda de la señal rectificada de voltaje y corriente son esencialmente las mismas en ambos casos (ver figura 2-1(c)).

¹ PEABODY, A.W. Ob. cit. Pág. 9

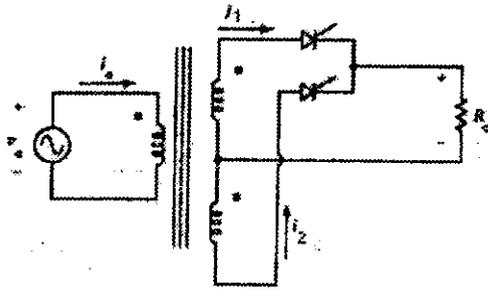


Figura 2.1(a): Circuito rectificador de onda completa con transformador con tap central.

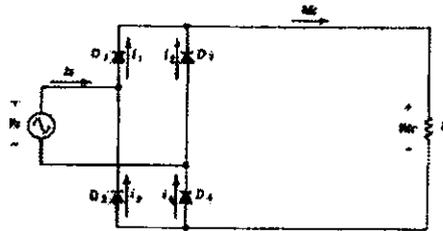


Figura 2.1(b): Circuito rectificador de onda completa con puente de 4 diodos.

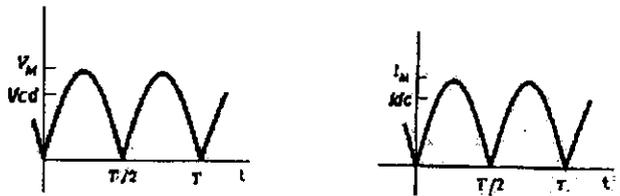


Figura 2-1(c): Formas de onda del voltaje y corriente de salida.

2.1.2 CONTROL DE RECTIFICADORES POR FASE.

El control por fase se puede entender como la posibilidad de modificar la magnitud de una señal rectificadora de salida mediante la variación del ángulo de disparo de los SCR's presentes en el circuito de rectificación.

Existen diferentes métodos de control por fase: control por fase de media onda o de onda completa; de un sistema trifásico o uno monofásico, en el primer cuadrante o en el primero y cuarto o en todos los cuadrantes de una gráfica de corriente contra voltaje de salida; con carga tipo resistiva, inductiva o capacitiva. En particular se hará referencia en este capítulo a rectificadores controlados por fase, de onda completa, con carga resistiva y operación en el primer cuadrante.

Al intercambiar dos de los diodos (fig. 2-1(b)) por SCR's (fig. 2-2(a)), será posible modificar la forma de la señal de salida de c.d variando el ángulo de disparo de los SCR's. Estos se activarán mediante pulsos eléctricos en la compuerta o "gate" y se desactivarán por conmutación natural. Las formas de onda para voltaje de directa y corriente de directa de salida, se ilustran en la fig. 2-2(b).

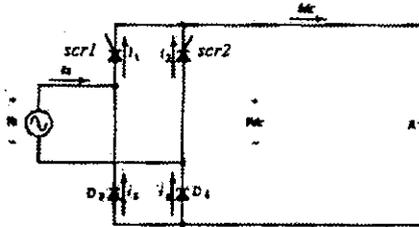


Fig. 2-2(a). Puente de rectificación con scr's.

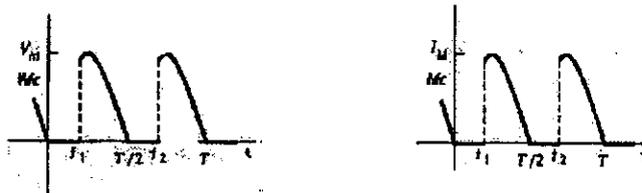


Fig. 2-2(b). Formas de onda resultantes.

2.1.3. CÁLCULO DEL VOLTAJE Y LA CORRIENTE DE DIRECTA.

Las ecuaciones siguientes definen el voltaje y la corriente de c.d. (o promedio) de una señal periódica:

$$V_{cd} = \frac{1}{T} \int_0^T v_L(t) dt \quad (2.1)$$

$$I_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) dt \quad (2.2)$$

donde para el caso de carga resistiva las expresiones para $v_L(t)$ e $i_L(t)$ son

$$v_L(t) = V_m \text{sen}(wt) \quad (2.3)$$

$$i_L(t) = I_m \text{sen}(wt) \quad (2.4)$$

considerando que $I_m = V_m/R$, y T es el período de la señal.

Sustituyendo 2.3 y 2.4 en 2.1 y 2.2 respectivamente e integrando se obtiene que

$$V_{cd} = \frac{1}{T} \int_0^T V_m \text{sen}(wt) dt = \frac{1}{T} \left[\int_{t_1}^{t_2} V_m \text{sen}(wt) dt + \int_{t_2}^T -V_m \text{sen}(wt) dt \right] \dots (2.5)$$

donde $t_2 = t_1 + T/2$

o lo que es lo mismo

$$V_{cd} = \frac{1}{T} \int_0^T V_m \text{sen}(wt) dt = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T/2} V_m \text{sen}(wt) dt \quad (2.6)$$

Integrando 2.5 se obtiene

$$V_{cd} = (V_m/\pi)(1 + \cos \alpha_1) \quad (2.7)$$

donde $\alpha_1 = wt_1$

De la misma manera, al desarrollar la ecn. 2.2 para I_{cd} se obtiene que

$$I_{cd} = (I_m/\pi)(1 + \cos \alpha_1) \quad (2.8)$$

¹ RASHID, M. H. Power electronics: circuits, devices and applications. Pág. 31

² FISHER, J. Marvin. Power Electronics. Pág. 158.

donde $\alpha_1 = \omega t_1$

Si $\alpha_1 = 0$,

$$V_{cd} = 2V_m / \pi \quad \text{e} \quad I_{dc} = 2 I_m / \pi.$$

Si $\alpha_1 = \pi$,

$$V_{dc} = 0 \quad \text{e} \quad I_{dc} = 0.$$

2.1.4 FACTOR DE POTENCIA.

El factor de potencia en un rectificador es importante dado las compañías suministradoras de energía regularmente aplican sanciones a aquellos usuarios cuyos equipos trabajen con factores de potencia bajos.

El factor de potencia en este caso, se define como la relación de la potencia real entregada a la carga contra la potencia aparente proporcionada al sistema.

El factor de potencia puede ser calculado mediante la expresión

$$FP = (1 - \alpha / \pi + \text{sen } 2\alpha / 2\pi)^{0.5} \dots\dots\dots (2.9)$$

Se puede ver que para el caso en que no exista control por fase ($\alpha = 0$), el factor de potencia será unitario.

2.1.5 ARMÓNICAS.

Por su naturaleza misma, los rectificadores controlados por fase producen problemas de generación de armónicas. Dicho contenido de armónicas varía con respecto al ángulo de disparo α . A continuación se presenta una gráfica de la magnitud de los coeficientes armónicos como una función de α . Todas las corrientes están normalizadas al valor de la componente fundamental para $\alpha = 0$.

¹ FISHER, J.MARVIN. Ob. cit. Pág. 175.

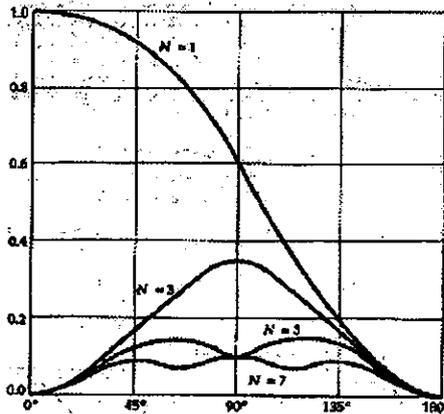


Figura 2-3: Gráfica normalizada de la magnitud de las principales armónicas vs. el ángulo de disparo¹.

Para disminuir la magnitud de las componentes armónicas de la señal tanto de entrada como de salida del rectificador, se pueden agregar opcionalmente filtros de c.d. a la salida de éste.

2.2 ESQUEMAS BÁSICOS DE CONTROL PARA SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

Como se señaló al principio de este capítulo, cambios en las características del medio ambiente, especialmente en la resistividad del suelo, hacen convenientes a los rectificadores automáticos. Los modos de control mas comunes a estos equipos son los siguientes:

- Control de potencial con límite de corriente.
- Control de corriente de salida.
- Control de voltaje con límite de corriente.

2.2.1 CONTROL POR POTENCIAL CON LÍMITE DE CORRIENTE.

Como se mencionó en el primer capítulo, uno de los principales criterios en la evaluación de la protección catódica suministrada a una estructura, es el del valor de

¹ FISHER, J. MARVIN. Ob. cit. Pág. 182.

potencial que ésta guarda con respecto a su medio ambiente. De esta manera, el controlador deberá proveer un modo para monitorear y mantener constante la variable de potencial seleccionada como parámetro de referencia.

Además, bajo este esquema, será conveniente tener control sobre la cantidad de corriente que se proporcione, por cuestiones de seguridad de los usuarios y de protección del equipo mismo. Esto se logra mediante el establecimiento de *límites de corriente*.

2.2.2 CONTROL POR CORRIENTE.

De igual manera, en el capítulo primero se indicó que otro criterio importante de evaluación de protección catódica, es la magnitud de corriente que se proporciona a la estructura. Este criterio se establece mediante la comparación de la magnitud de corriente aplicada contra la sugerida en tablas, según el tipo de estructura. Por lo tanto, el equipo deberá poder ofrecer también, un modo de control por corriente.

2.2.3 CONTROL POR VOLTAJE CON LÍMITE DE CORRIENTE.

En algunos casos y bajo ciertas circunstancias, es utilizado un criterio de voltaje. Cuando se conoce estadísticamente el comportamiento o variación de las condiciones del medio ambiente circundante, es posible estimar las magnitudes de voltaje que deben ser aplicadas para mantener un nivel aceptable de protección en las estructuras.

2.3 ADECUACIÓN DE LAS SEÑALES QUE INTERVIENEN EN UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

Los parámetros eléctricos mas importantes involucrados en un sistema de control para rectificadores en un sistema de protección catódica son los siguientes:

2.3.1. MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE LA ESTRUCTURA A PROTEGER CON RESPECTO AL MEDIO AMBIENTE.

Como se explicó con anterioridad, la medida de potencial de la tubería indica el nivel de protección obtenido. En este caso, el medio ambiente es el suelo circundante. El rango de variación de esta señal para la celda de cobre-sulfato de cobre puede variar entre 0 y -2V.

2.3.2 MEDICIÓN DEL VOLTAJE DE SALIDA DEL RECTIFICADOR.

El rango de voltaje de c.d. para esta señal será de 0 a 100 VCD, mas un 15 % de sobredimensionamiento en la capacidad del lector como factor de protección. Dado que la señal de voltaje de c.d. a medir varía en su forma de onda (ver figura. 2-2(b)), es necesario que dicho medidor de voltaje sea capaz de registrar magnitudes de c.d. de señales periódicas de forma de onda variable.

2.3.3 MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DE SALIDA DEL RECTIFICADOR.

De igual forma que el medidor anterior, la señal de corriente de directa, dependiendo de su valor, será también variable en su forma (ver Figura 2-2(b)). La magnitud de la corriente a medir será relativamente alta, la cual oscilará entre los 0 y 100 amperes. Se considera un 15% de sobredimensionamiento en la capacidad del medidor, como factor de protección.

Por otra parte, hay otros aspectos importantes que se deben tomar en cuenta como previos al diseño del sistema:

2.3.4. SEÑAL DE SINCRONÍA.

Debido a que el control de las señales de salida del rectificador se realiza en cada ciclo de la señal de alterna, de entrada, es necesario que el sistema de control se sincronice con esta última. Por otro lado será conveniente considerar que la frecuencia de dicha señal de alterna, podría tener variaciones en su valor, dentro de las tolerancias que la Comisión Federal de Electricidad establezca.

2.3.5. CONEXIÓN DEL EQUIPO A TIERRA FÍSICA.

Normalmente los equipos eléctricos, deben ser aterrizados por las razones siguientes¹:

- Para protección del usuario contra descargas de voltaje peligrosas generadas por alguna anomalía en el funcionamiento del equipo.
- Para proteger el equipo de daño o malfuncionamiento debido a transitorios.
- Para reducir el ruido inducido en los circuitos.

Sin embargo, debido al tipo de arreglo eléctrico que tiene un sistema de protección catódica, una conexión a tierra del rectificador automático podría generar serios problemas de desvío de la corriente de protección. El rectificador automático consta básicamente de dos módulos: un módulo de rectificación de potencia y otro de adquisición de datos y control. Normalmente para monitorear las señales de salida del rectificador, se requiere que los medidores tengan un punto de referencia o tierra al cual referir dicha medición. En el caso del medidor de voltaje de c.d., este punto será la terminal negativa de la salida de potencia., Dado que el medidor de voltaje es parte del sistema de adquisición de datos y control, éste último compartirá el bus de tierra con el medidor. Si se conecta el sistema de adquisición de datos y control a un punto de tierra física, automáticamente queda también aterrizada la terminal negativa del rectificador. En la figura 2-4 se puede observar con líneas punteadas la trayectoria de la corriente de protección antes de la conexión del sistema a un punto de tierra física, y con línea discontinua, la nueva trayectoria de la corriente después de la conexión a tierra física

¹ BUCHLA, DAVID. Applied electronics instrumentation and measurement. Pág. 537.

del mismo. Esto, debido a que la corriente siempre busca la trayectoria de menor resistencia para su flujo.

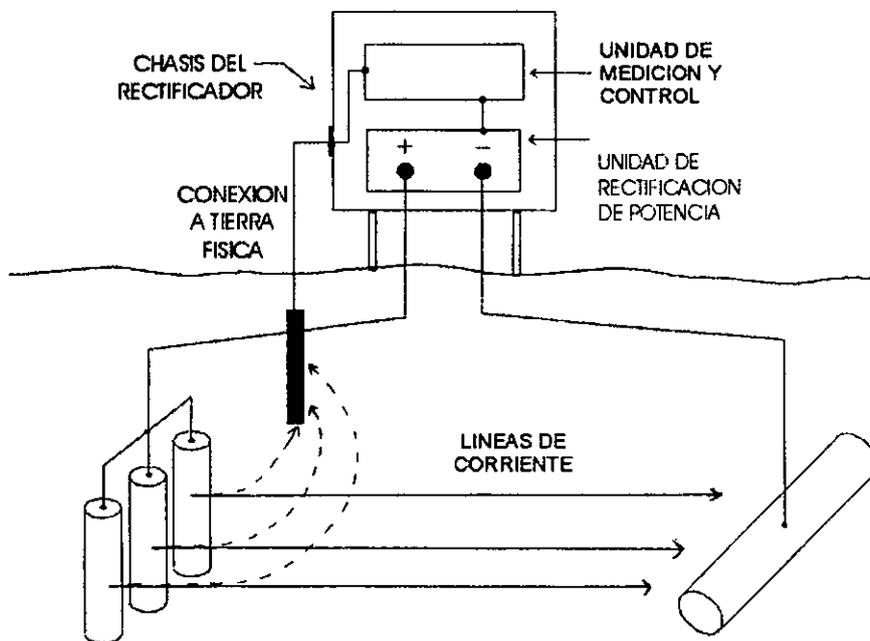


Figura. 2-4. Análisis de trayectorias de corriente en un sistema de protección catódica mediante el uso de un rectificador automático.

2.4 DEFINICION DEL PROYECTO.

Diseñar y construir el módulo de control prototipo para un rectificador automático monofásico controlado por voltaje, corriente o potencial, con límite de corriente para los modos primero y tercero, con capacidad de salida de 0-100 VCD y 0 -100 ACD.

CAPITULO III



**DISEÑO
DEL
SISTEMA**

3.1 INTRODUCCIÓN.

3.1.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE CONTROLADORES DIGITALES Y ANALÓGICOS.

Una de las ventajas de implementar un sistema control con microprocesadores, es la versatilidad que estos tienen de modificar el tipo de procesamiento que puedan aplicar a una señal. Debido a que estos dispositivos son programables, el algoritmo de control podrá ser modificado con bastante libertad. Además, con los microprocesadores es posible aplicar funciones diferentes a diferentes señales, e incluso relacionarlas entre sí.

Adicionalmente como efecto secundario, considerando que la información ya se encuentra en un formato digital, ésta se puede presentar en formas mas claras y sencillas para el usuario (mediante el uso de desplegados numéricos o alfanuméricos, pantallas de cristal líquido, etc.). Así mismo, la introducción de parámetros de control y modos de operación se puede realizar mediante el uso de teclados de numéricos o gráficos, lo que mejora la presentación y funcionalidad del equipo. Así mismo, un formato digital permite que eventualmente la información generada pueda ser compartida con otros equipos digitales de diagnóstico, almacenamiento de información, etc.

Sin embargo los sistemas analógicos también tienen sus ventajas. La principal de ellas es que estos pueden llegar a ser más rápidos en el procesamiento de algunas señales. Además, la exactitud en el procesamiento de la señal puede llegar a ser bastante satisfactoria. Una de las desventajas inherentes a un sistema digital es el error de cuantización, error que se produce al digitalizar la señal debido a la resolución limitada del convertidor A-D. El precio de utilizar lectores analógicos para adquirir cada una de las señales, es el uso de una mayor cantidad de circuitos en el módulo de adquisición de datos y control.

3.1.2 INTEGRACIÓN DE UNA SOLUCIÓN A PARTIR DE EQUIPOS COMERCIALES CONVENCIONALES RESPECTO DEL DISEÑO DETALLADO DEL EQUIPO.

En ocasiones resulta importante considerar como opciones posibles de solución, la utilización de equipos de propósito general ya existentes en el mercado. Una de las ventajas al utilizar este tipo de equipos, es aprovechar las múltiples capacidades ya instaladas en ellos, como módulos de entrada y salida digitales y analógicos, módulos de comunicaciones estandarizados, etc. Además son equipos programables y pueden adaptarse a diferentes necesidades, ya que son modularmente configurables. Adicionalmente estos equipos generalmente cuentan con una o mas certificaciones oficiales (como NOM, UL entre otras). La viabilidad de esta propuesta depende de si estos sistemas son lo suficientemente versátiles para integrar todos los elementos

necesarios para la resolución del problema; es decir, si poseen todos los elementos internos o interfases necesarias disponibles al integrador de sistemas para dar solución al problema.

Dentro de las opciones para equipos de control de propósito general se ubican a los Controladores Lógicos Programables (PLCs, por sus siglas en inglés) y a las Unidades Terminales Remotas (RTU's, de igual manera por sus siglas en inglés).

Para tener una mejor idea de características y costos de algunos de estos equipos, se cita el siguiente ejemplo. Un PLC con un CPU sencillo, fuente de poder y un módulo de 32 E/S digitales (Micrologic 1000 de Allen Bradley), el cual tiene un costo en México de aproximadamente 500 dólares americanos. Ahora bien, si se requiere del manejo de señales analógicas, ya sea de entrada o salida, se requiere de un PLC que provea esos módulos. El PLC SLC500 de Allen Bradley es el sistema mínimo que cumple con estos requerimientos y tiene un costo aproximado de 2,200 dólares americanos. Si se considera que aun se deberá agregar el costo de los transductores y actuadores para estos PLC's, el éste se eleva considerablemente.

El caso de las RTU's es mas o menos similar. El precio de estas oscila entre 2,000 y 4,000 dólares, (sin considerar los módulos adicionales de pre-acondicionamiento de señal e interfase con el usuario). En el caso de la interfase con el usuario ó panel de control, tanto las RTU's como los PLC se encuentran muy limitados en cuanto a opciones.

La otra alternativa es la de diseñar y construir un equipo desde cero. Muy posiblemente, esta opción requerirá de mayor tiempo de desarrollo, pero en cambio se podrá construir un equipo con las características particulares necesarias y posiblemente a un menor costo unitario. Por esta razón se decidió que la alternativa más viable sería el diseño y construcción del equipo.

3.2 METODOLOGÍA DE DISEÑO.

La técnica de diseño funcional descendente es de propósito general y consiste en un conjunto de procedimientos para diseñar sistemas de aplicación específica, abordando el problema de lo general a lo particular. Fundamentalmente, consiste en dividir un problema complejo en varios sub-problemas o módulos de menor complejidad.

El planteamiento general del método se presenta en el siguiente diagrama:

Fig. 3-1: Técnica de diseño funcional descendente.



3.3 ESTRUCTURA GENERAL DEL SISTEMA DE RECTIFICACIÓN AUTOMÁTICA

Como se mencionó al principio de esta obra, el sistema global de rectificación consta de varios módulos funcionales. En este trabajo de tesis se presenta el diseño específico del módulo de Control y Adquisición de datos, el cual es parte integrante de un sistema de mayores dimensiones. A continuación se presenta el diagrama de bloques del proyecto general (ver fig. 3-2). En él se muestran las partes que lo integran así como las relaciones existentes entre ellas.

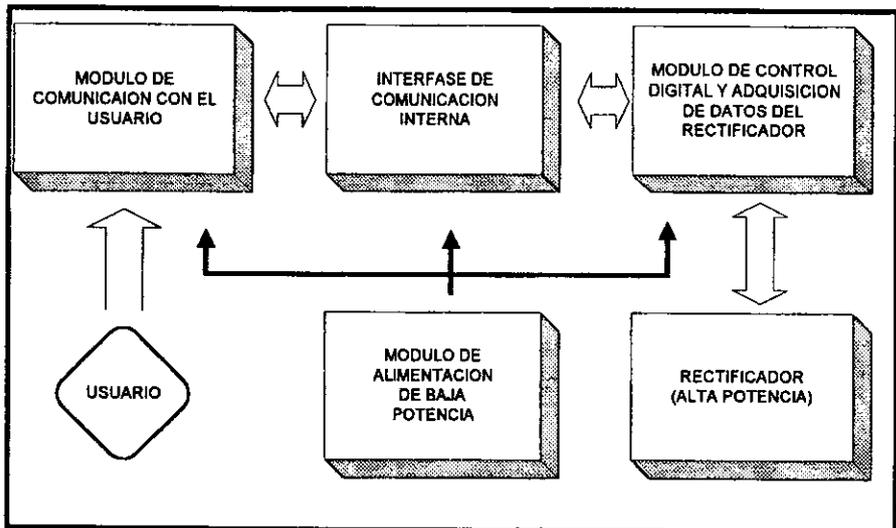


Figura 3-2: Módulos principales del Sistema de Rectificación Automática en su conjunto.

El sistema está integrado por cinco módulos diferentes. El diseño es completamente modular y cada bloque realiza una función específica; cada módulo podría ser evaluado en forma individual.

La idea de particionar el sistema en módulos surge de especializar a cada uno en su tarea. Con base en los conceptos expuestos en la sección 3.1.1, se decidió que el sistema a desarrollar estuviese basado en microcontroladores. Además, se vio la conveniencia de utilizar dos CPUs para coordinar por separado cada una de las dos tareas más importantes del sistema: la de proveer al sistema con una interfase hombre-máquina versátil, funcional y de fácil manejo; y la de adquirir y controlar las variables del sistema. La primera tarea, la cubre el Módulo de Comunicación el Usuario. La segunda, el Módulo de Control y Adquisición de datos.

El tercer módulo tiene la finalidad de proveer al sistema con una interfase de comunicación interna entre ambos CPUs. El cuarto módulo o de alimentación de baja potencia, se encarga de proporcionar los niveles de voltaje adecuados para la operación de los circuitos. Por último, el módulo de rectificación de potencia. En él se incluyen los manejadores de los SCR's y el puente eléctrico rectificador de potencia como elementos principales.

3.4 ESPECIFICACIONES DEL CONTROLADOR.

3.4.1 MODOS DE CONTROL:

MODO 1: Potencial con límite de corriente.

RANGOS	POTENCIAL DE CD	0 A -2.00[V]
	LIMITE DE CORRIENTE DE CD	0 A 100[A]
RESOLUCIÓN:	POTENCIAL DE CD	10[mV]
	LIMITE DE CORRIENTE DE CD	0.5[A]

MODO 2: Voltaje con límite de corriente.

RANGOS:	VOLTAJE DE CD	0 A 100[V]
	LIMITE DE CORRIENTE DE CD	0 A 100[A]
RESOLUCIÓN:	VOLTAJE DE CD	0.5[V]
	LIMITE DE CORRIENTE DE CD	0.5[A]

MODO 3: Corriente.

RANGOS:	CORRIENTE DE CD	0 A 100[A]
RESOLUCIÓN:	CORRIENTE DE CD	0.5[A]

3.4.2 ALMACENAMIENTO DE PARÁMETROS DE CONTROL.

El controlador deberá ser capaz de mantener los parámetros de control programados, de manera permanente, aún cuando el suministro eléctrico haya sido suspendido.

3.4.3 SEÑAL DE DISPARO DE SCR'S.

Se deberá proporcionar una señal digital de salida de 3[V] @ 200 mA con duración mínima de 2 μ s, de acuerdo con el manual de referencia del fabricante. Esta señal de activación o disparo será la que se aplique en las compuertas de los SCR's.

3.5 PARTICION DEL SISTEMA EN MÓDULOS.

Antes de proseguir, se desea hacer un ajuste en la nomenclatura utilizada hasta el punto anterior. A partir de este momento se designa al Módulo de Control y Adquisición de Datos, como Sistema de Control y Adquisición de Datos; esto con la finalidad de apegarse mejor en este diseño, a la terminología utilizada en el Método Funcional Descendente, expuesto en la sección 3.2 de este trabajo de tesis.

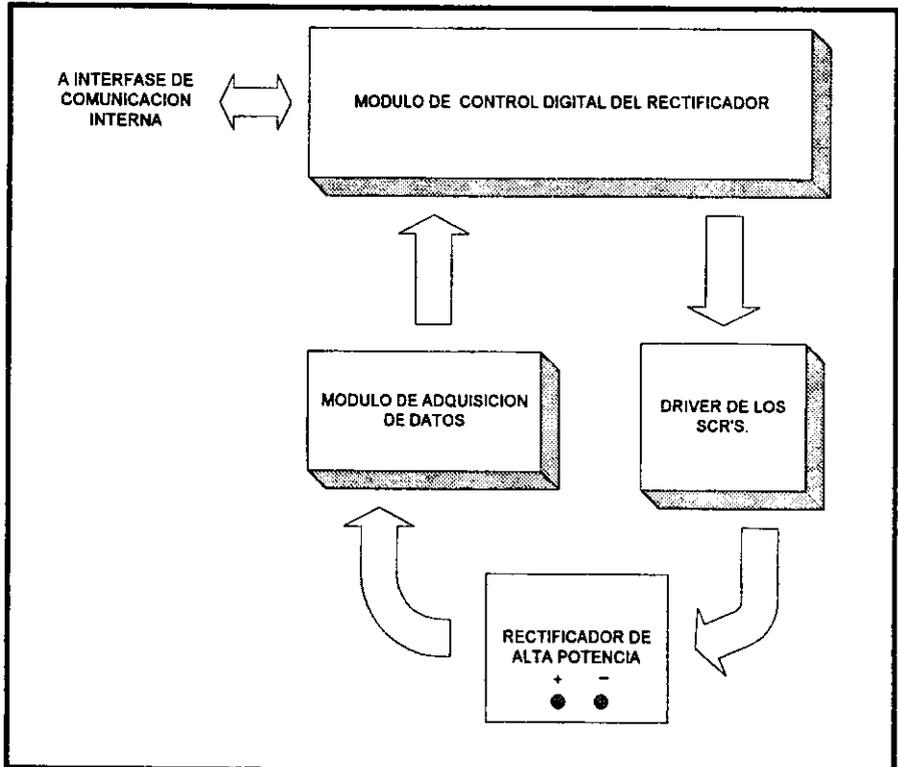


Fig. 3-3: Módulos integrantes del Sistema de Control y Adquisición de Datos.

3.5.1 MÓDULO DE CONTROL DIGITAL DEL RECTIFICADOR.

El módulo de Control Digital del Rectificador tiene las siguientes funciones: correr el algoritmo de control, coordinar al módulo de Adquisición de datos y de proporcionar una salida digital control hacia los Manejadores de los SCR's. Los parámetros de control son tomados a través de la interfase de comunicación interna.

3.5.2 MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

El módulo de Adquisición de Datos tiene la finalidad de acondicionar y procesar las señales de voltaje y corriente de directa así como de potencial. También en este módulo se genera la señal de sincronía (o cruce por cero).

3.5.3 MANEJADORES DE LOS SCR'S.

En este módulo se amplifican las señales de control que comandan al puente de rectificación.

3.6 SELECCIÓN DE LA FAMILIA DE MICROPROCESADORES.

3.6.1 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PALABRA.

A partir de las especificaciones, es posible determinar el tamaño de palabra digital mínimo requerido. Esto se logra al efectuar el cociente del rango de medición entre la resolución del medidor, obteniéndose así el número de niveles discretos mínimos necesarios, tanto para potencial como para voltaje y corriente, que satisfacen la resolución especificada:

$$\# \text{ de niveles discretos} = \frac{ABS.(RANGO)}{RESOLUCIÓN} \dots\dots\dots (2.1)$$

Rango del lector de potencial: 0.00 A -2.50 [V]

Resolución: 0.01 [V]

DE NIVELES: 250

Rango del lector voltaje: 0 A 100 [V] + 15% = 115 [V]

Resolución: 0.5 [V]

DE NIVELES: 200 + 30 = 230

Rango del lector de corriente: 0 A 100[A] + 15% = 115[A]

Resolución: 0.5[A]

DE NIVELES: 200 + 30 = 230

Con un tamaño de palabra de 8 bits pueden representar hasta 256 valores diferentes; con 12 bits, 4096 y con 16 bits, hasta 65,536 posibles valores.

3.6.2 FRECUENCIA DE TRABAJO DEL PROCESADOR.

En un sistema de adquisición de datos convencional, la selección de la velocidad de trabajo de un procesador tiene que ver, entre otros puntos, con

rápidez de la señal a monitorear. Si la señal a monitorear es una señal predominantemente de alta frecuencia, por el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo mínima deberá de ser de al menos el doble de la componente de frecuencia máxima de la señal.

Por otra parte, si esta señal o señales adquiridas, requieren además de un procesamiento digital intenso, habrá que considerar para la selección de la frecuencia de trabajo del procesador, el número de operaciones a realizar y el tiempo de que se dispone para este fin. Cuando el procesamiento de la señal es muy complejo, se recomienda la utilización de DSPs (procesadores digitales de señales, por sus siglas en inglés) como una mejor alternativa.

En el caso de esta aplicación, la frecuencia de la señal a monitorear es baja, del orden de los 60 Hz. Adicionalmente, parte del procesamiento de las señales, se realizará previo a la digitalización de la señal, mediante circuitería analógica. Es por esto que la velocidad de trabajo del procesador no será un factor determinante.

3.6.3 CAPACIDAD DE DIRECCIONAMIENTO DE MEMORIA.

Estimativamente y basándose en experiencias de proyectos anteriores, 64 Kbits de ROM pueden ser suficientes para almacenar el programa. Si se considera la utilización de una memoria de 128 Kbits, se requerirían 14 líneas del bus de direccionamiento de memoria de programa. Generalmente procesadores de 8 o 16 bits proveen al usuario con 16 líneas como mínimo, es decir con capacidad de direccionamiento de 2^{16} direcciones (65,536)

En cuanto al requerimiento de direccionamiento de memoria RAM, este de antemano se ha considerado mínimo, ya que esta se utilizará para almacenar los parámetros de control, los valores leídos y algunas banderas y datos temporales de cálculo, principalmente.

En cuanto a líneas de E/S, éstas se pueden configurar mediante el uso de múltiples puertos paralelos, en el caso de los microprocesadores, o a través de puertos integrados o líneas de propósito específico, en los microcontroladores.

3.6.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.

Una vez expuestos los puntos anteriores, se podrá seleccionar con un mejor criterio el procesador o microcontrolador que más convenga. Sin embargo, a pesar de que el dispositivo que se escoja deberá cumplir con los requerimientos mínimos especificados, existen otros factores posiblemente de igual o mayor importancia, en la selección del dispositivo. Primeramente, es indispensable considerar el conocimiento y experiencia que los desarrolladores tengan sobre los dispositivos candidatos. Por otra parte, es conveniente tomar en cuenta

también las herramientas de desarrollo con que se cuenta (ensambladores y simuladores). Así mismo, un tercer factor será la disponibilidad del dispositivo y su precio en el mercado.

Los dispositivos que se evaluaron fueron los siguientes:

- El MC68000 de Motorola.
- El 8031 de Intel.
- El MCHC11 de Motorola.

El MC68000 de Motorola es un microprocesador de 16 bits con un amplio conjunto de instrucciones y modos de direccionamiento. Puede procesar varios tipos de datos —bits, BCD de 4 bits, bytes de 8 bits, palabras de 16 bits y palabras largas de 32 bits. La planilla de instrucciones consta de 56 tipos de instrucciones básicas y 14 modos diferentes de direccionamiento. Los tres elementos antes mencionados en conjunto (5 tipos de datos, 56 instrucciones básicas y 14 modos de direccionamiento), arrojan un total de mas de 1000 instrucciones posibles. Este procesador también tiene capacidades para soporte de tareas multiusuario y multitarea mediante dos estados de trabajo: el estado de usuario y el estado de supervisor. Este último es el único que puede ejecutar algunas instrucciones que se consideran 'privilegiadas'. Por otra parte, el procesador cuenta con 1024 bytes para alojar vectores de interrupción, vectores de error y vectores para otro tipo de excepciones. Estos vectores apuntarán a las rutinas de servicio correspondientes.¹

El microcontrolador MCHC11, es un dispositivo de 8 bits con memoria bloques de memoria ROM, EEPROM y RAM internas, un temporizador de 16 bits mejorado, convertidor analógico-digital de 8 bits, una interfase serial sincrónica y una asíncrona, un acumulador de pulsos y un sistema de 'watch dog', entre otras características. Con relación a la disponibilidad de interrupciones externas, ofrece hasta dos pero únicamente en su versión mas completa, el HC11E9. En cuanto a señales de E/S de propósito general, si se trabaja en modo extendido, se puede disponer de hasta 12 señales de entrada (utilizando los puertos A y E) pero únicamente 5 de salida. Este último factor se postula como la principal limitante para el uso del HC11 como una opción viable.

El 8031 de Intel, es también un microcontrolador de 8 bits, con capacidad de direccionamiento de memoria externa de 64K bytes para memoria de programa y 64K bytes para memoria de datos. Posee bloques de 4K bytes de memoria ROM y 128 K bytes de memoria RAM en chip; 32 líneas bidireccionales de E/S con capacidad de ser comandadas al nivel de bit (utilizando memoria extendida para lectura de programas quedan libres únicamente 12). Incluye también dos

¹ LEO J. SCANLON. The 68000: principles & programming. Pág. 14.

temporizadores/contadores de 16 bits y una UART 'full duplex' para comunicación serial asíncrona. No incluye convertidor analógico/digital.

Del análisis anterior se puede concluir que el dispositivo más viable es el microcontrolador de Intel ya que el MC68000, además de ser un dispositivo de mayor complejidad al cual se le deben agregar los puertos, timers y demás elementos, supera en mucho los requerimientos de procesamiento de aplicación que se pretende desarrollar. Por otra parte, como ya se mencionó, el HC11 presenta algunos inconvenientes como la falta de líneas de salida, de temporizadores e interrupciones; por lo tanto el dispositivo que se adoptará para este desarrollo será el 8031.

3.7 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MÓDULO DE CONTROL.

El módulo de control digital esta integrado en su hardware por un Intel 8031, su memoria de programa, conexión a memoria RAM compartida (la cual forma parte de la Interfase de comunicación interna), un convertidor analógico digital tipo flash, un multiplexor analógico de 8 canales y 2 salidas digitales hacia el módulo de Manejadores de SCRs.

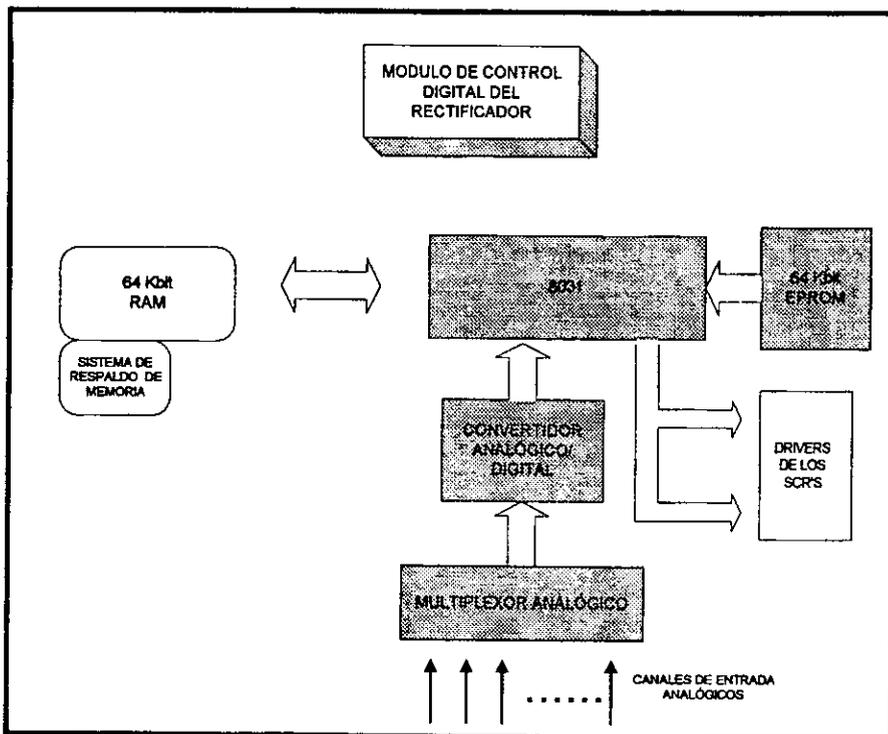


Figura 3-4: Diagrama de bloques del Módulo de Control.

3.7.1 EL MICROCONTROLADOR 8031

El 8031 es un microcontrolador de 8 bits con cuatro puertos de E/S bidireccionales, direccionables al nivel de bit. Cuenta además con dos temporizadores de 16 bits, 128 bits de memoria RAM y cinco vectores de interrupción. Su frecuencia de trabajo será de 10 Mhz, aunque normalmente trabaja a 12 Mhz. Lo anterior disminución se debe que obtienen algunas ventajas de operación con el convertidor A-D, como se verá mas adelante. Un diagrama de su arquitectura se presenta a continuación:

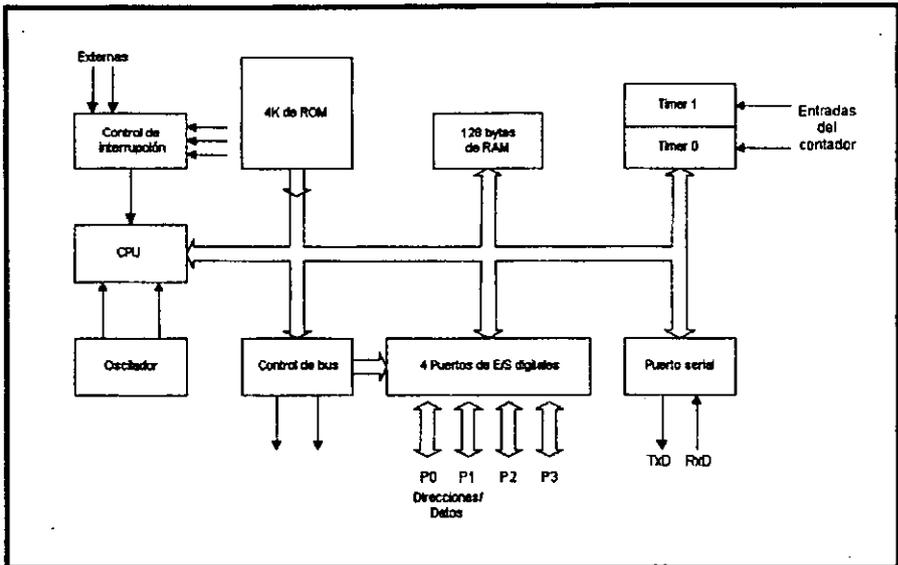


Figura 3-5: Diagrama de bloques de la arquitectura básica del 8031.

- **Registros.**

Dentro de los registros internos más importantes se cuentan el Puntero de Datos (DPTR por sus siglas en inglés), el cual es un registro de 16 bits para almacenar direcciones externas mayores a 8 bits y el Contador de Programa (PCL y PCH), el cual se encarga de apuntar a la dirección de la siguiente instrucción (emite el byte menos significativo a través del puerto P0 y el byte mas significativo por P2).

Estos y otros registros se encuentran en el bloque de RAM interna llamado de Registros de Función Especial (SFR). Algunos otros de estos registros son: un Acumulador (ACC), Puntero de Pila (SP), puertos (P0, P1, P2 y P3), temporizadores (TH0, TL0, TH1, TL1), habilitación y control de temporizadores (TMOD, TCON), habilitación y control de interrupciones (IP, IE), etc. Además, fuera de esta área (SFR), cuenta con cuatro bloques de 8 registros de propósito general (R0 - R7) y un área de memoria interna direccionable a nivel bit de 16 bytes.

- **Señales de control.**

En cuanto a señales de control, PSEN (habilitador de almacenaje de programa) es la señal que el microcontrolador utiliza para habilitar la memoria externa de programa. Mediante esta señal, hace la decodificación entre memoria de datos y memoria de programa externas. Para escritura o lectura de memoria de datos,

utiliza las señales RD y WR. Dado que el bus de direcciones bajas (P0) es multiplexado, la señal ALE (habilitador del latch de direcciones) habilita a un latch, para retener el valor de la dirección baja, emitido por P0.

- **Memoria de programa.**

El comienzo de la ejecución del programa comienza en la dirección 0000H de la memoria de programa, ya sea por encendido natural o debido a una acción de 'reset'. Las rutinas de servicio a interrupciones tienen asignadas localidades fijas. El primer vector de interrupción (IE0) comienza en la dirección 0003H y puede continuar hasta 7 bytes mas, ya que el espaciamiento entre vectores es de 8 bytes. Así pues, la siguiente rutina comenzará en la dirección 000BH.

- **Instrucciones.**

El 8031 cuenta con un conjunto de 256 instrucciones, muchas ellas a nivel de bit. El número de ciclos utilizados por instrucción varia y esta entre 12 a 48 ciclos. De esta manera, con una frecuencia de reloj de 10 Mhz, las instrucciones se efectuan en un tiempo mínimo de 1.2 y máximo de 4.8 μ s respectivamente. Cuenta con 6 modos de direccionamiento.

Para mayor información sobre este dispositivo, consultar el manual de referencia de la familia 8051 de Intel, mismo que se cita en la bibliografía.

3.7.2 EL CONVERTIDOR ANALÓGICO DIGITAL.

El convertidor analógico-digital utilizado fue el ADC8020 de National Semiconductors. Este convertidor tiene la característica de ser muy rápido, no necesitar de circuiteria de "muestra y retén" y adaptarse con el menor número de señales de control a un microcontrolador. Además, este dispositivo tiene las siguientes características adicionales:

- Para hacer las conversiones utiliza la técnica 'half-flash', con una resolución de 8 bits y un tiempo de conversión de 1.5 μ s máximo en modo 'WR-RD' y de 2.5 μ s máximo en modo 'RD'. Disipa únicamente 75 mW. La técnica 'half-flash' utiliza en su conversión 32 comparadores y separa la conversión en dos tiempos. En un primer tiempo se hace la conversión A-D de los 4 bits más significativos y en un segundo tiempo la de los 4 bits menos significativos.
- La señal de entrada al convertidor es rastreada y retenida por la circuiteria de muestreo de entrada eliminando la necesidad de circuitos externos de muestra-retén para señales que cambian con pendientes menores a 100mV/ μ s.

- Para facilitar su interfasamiento con microprocesadores, el ADC0820 esta diseñado para aparecer como una localidad de memoria más o puerto de E/S, evitando así la necesidad de lógica externa de interfase.
- Error total sin ajuste: $\pm \frac{1}{2}$ LSB (bit menos significativo, por sus siglas en inglés) en el modelo 0820B y ± 1 LSB en otros modelos.

En el caso del presente diseño, el ADC trabaja en modo WR/RD utilizando la señal de INT a manera de interrupción hacia el microcontrolador indicando la finalización de la conversión. El tiempo de conversión es de aproximadamente 800 ns. En el caso de no desear utilizar la señal de IRQ del ADC, es posible solo utilizar las señales de WR/RD tomando la lectura aproximadamente en 600 ns.

Para mayor información, consultar el manual de referencia que se cita en la bibliografía.

3.7.3 EL LF13508

El LF13508 es un multiplexor analógico de 8 canales, el cual direcciona cada uno de los canales hacia la salida mediante una dirección binaria de 3 bits. Además cuenta con función de habilitación del chip. Una de las características importantes es que mantiene su resistencia de encendido constante para cualquier señal analógica dentro de su rango de operación de -11 a 11 V.

3.8 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

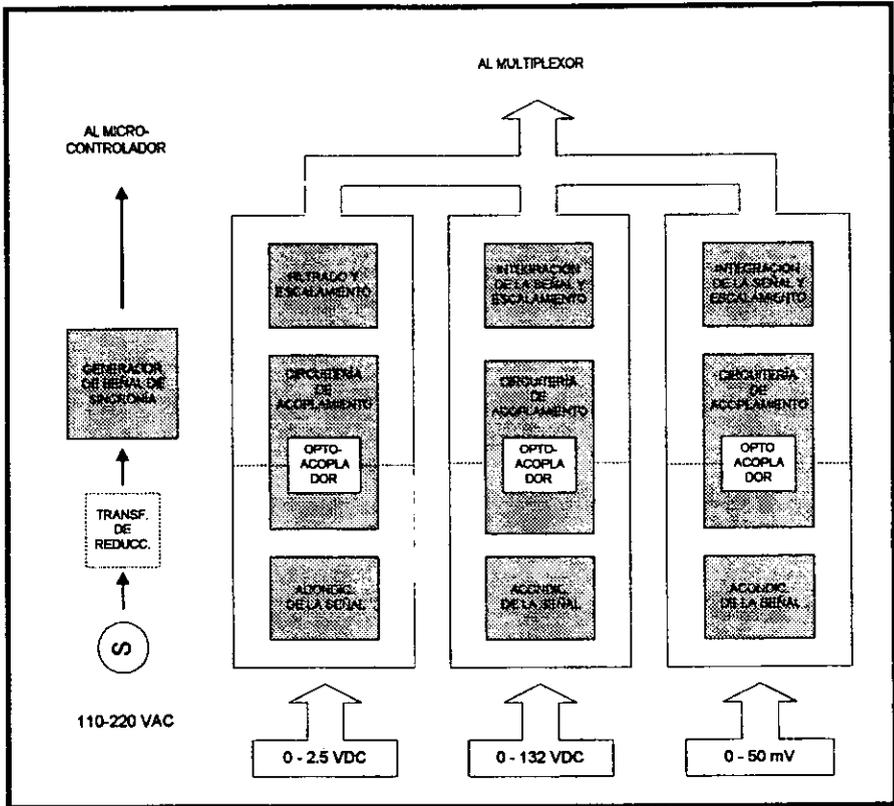


Figura 3-6. Diagrama de bloques del módulo de adquisición y acondicionamiento de señales.

De la figura 3-6, de derecha a izquierda, cada bloque tiene la siguiente función:

Primero, se tiene el generador de la señal de sincronía. Este básicamente genera una señal cuadrada, simétrica con niveles lógicos, a partir de una señal atenuada de alterna de la señal de alimentación del rectificador. Esta señal de sincronización o cruce por cero genera una interrupción en el microcontrolador, lo que hace que éste se sincronice con la señal de alterna de alimentación del rectificador.

En seguida se tiene el lector de potencial. Éste, como los otros dos restantes, están divididos en dos secciones por un optoacoplador. La razón para este arreglo se encuentra claramente expuesta en la sección 2.5 de este trabajo. La primera sección (parte inferior a las líneas punteadas), tiene la función de acondicionar la señal y amplificarla con los niveles adecuados tanto de c.d. como de amplitud, para transmitirse a través del fotodiodo.

La segunda parte tiene la función de recuperar la señal a partir del fototransistor y regresarla al nivel original de componente de c.d. y nivel adecuado de amplitud, para su procesamiento final. En el caso de celda de potencial, este procesamiento será el filtrado de la señal y el escalamiento de la misma. En el caso de los lectores tanto de voltaje como de corriente de directa, el proceso es similar, sin embargo su proceso final será ligeramente diferente.

3.8.1 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL.

Para el caso del lector de potencial proveniente de la celda, la amplitud de la señal (0 a 2.5 VCD) es muy aceptable (no requiere de gran amplificación para su proceso). Sin embargo, será conveniente que la impedancia de entrada del lector sea alta para no drenar mucha corriente de la celda. Con este fin se implementó una configuración no inversora, provee la mayor impedancia del amplificador operacional (alrededor de 100 M Ω y de 250K Ω con diodos de protección contra sobrevoltajes).

Con relación al lector de voltaje de CD, la amplitud de entrada de la señal es de aproximadamente 132VCD. Dado que el nivel en la alimentación de los circuitos analógicos marcan el límite de la amplitud esperada de la señal de entrada, mediante un divisor de voltaje, se podrá reducir el valor de entrada a unos 7 u 8 volts pico.

La lectura de la corriente, se hace por medio de un derivador de voltaje o shunt. El shunt convierte la señal de la corriente que pasa por él, en una señal de voltaje muy débil, la cual se deberá amplificar. Por otra parte, se debe considerar que la impedancia de entrada que presenta el derivador al amplificador operacional es muy pequeña.

3.8.2 RECUPERACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL.

La segunda parte, como ya se había mencionado, tiene la finalidad de recuperar la señal del optoacoplador y acondicionarla para su procesamiento. El caso del lector de potencial, como es una señal de directa constante, lo único que hace falta es filtrarla y escalarla.

En el caso del lector de voltaje, al igual que en el de corriente, después de recuperada la señal, se deberán adecuar a las características de entrada de la

sección de integración. El fundamento de este proceso se enuncia en la expresión 2.1 del capítulo anterior, sección 2.2.2. Este proceso de integración sólo se realiza para la mitad de un ciclo de alterna de la señal de alimentación. El problema de la constante de proporcionalidad se puede resolver mediante un control de ajuste de ganancia previo o posterior a la etapa de integración de la señal.

El mismo procedimiento se lleva a cabo en la señal de corriente de directa, debido a que la expresión para su cálculo es similar (ver expresión 2.2, sección 2.2.2).

3.9 MANEJADORES DE SCRS.

Debido a que éste módulo es el más pequeño de los tres que integran al sistema de control y adquisición de datos, no se provee un diagrama de bloques para este. La función de estos manejadores, como ya se vio anteriormente, es amplificar las señales digitales de comando al nivel en que puedan ser utilizadas por los SCRs. Este módulo cuenta con una etapa de recuperación de señal, otra de pre-amplificación y una última de amplificación de corriente.

Los diagramas correspondientes a cada uno de los módulos, se podrán encontrar en el Apéndice A.

3.10 SOFTWARE.

3.10.1 PARTICIÓN DEL ALGORITMO EN MACROS.

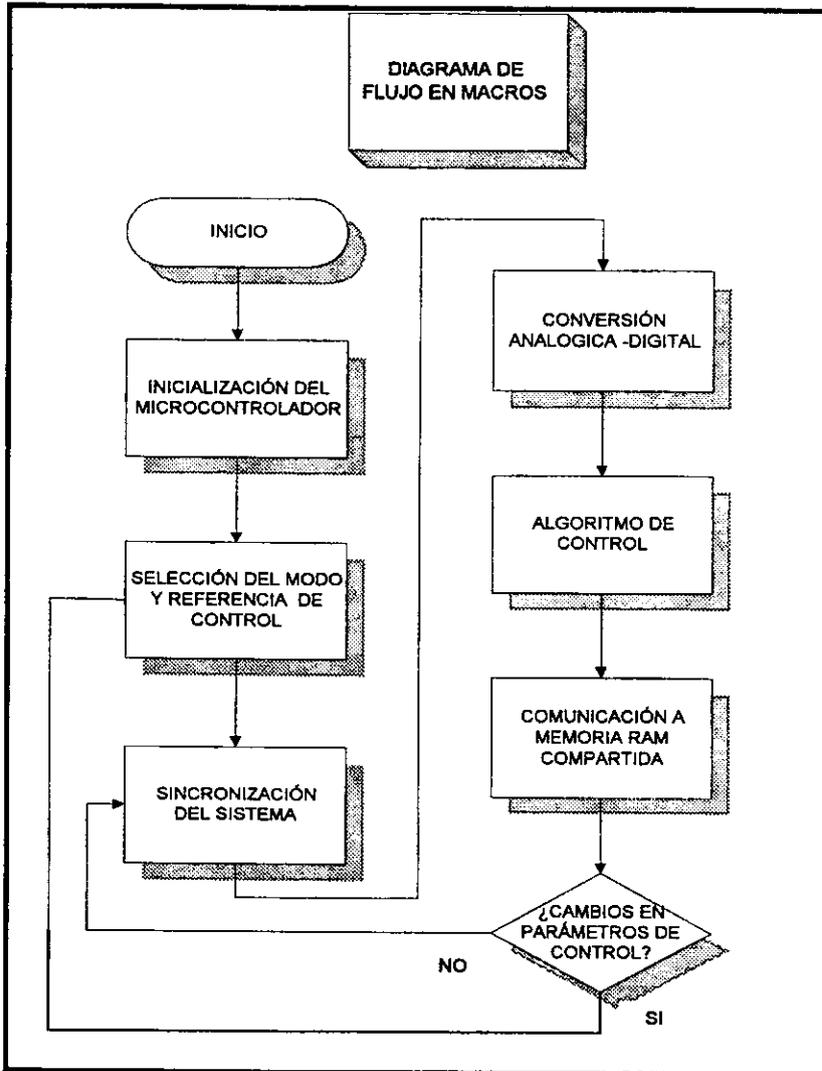


Fig. 3-7. Partición del algoritmo en macros.

El software del controlador básicamente lo que hace es determinar el tiempo de disparo de los SCRs, dependiendo si el nivel del parámetro que se desea en la señal rectificadora (voltaje o corriente) o debido a ella (potencial) se ha alcanzado

o no, o si se ha sobrepasado. Un circuito de detección de cruce por cero servirá para sincronizar a los SCRs respecto de la señal de alimentación.

La manera como el controlador obtiene los parámetros de modo de control y el valor del parámetro de referencia al cual se desea controlar, es mediante la memoria RAM compartida, ubicada en la interfase de comunicación interna. El controlador lee estos datos de la RAM y los compara con los respectivos valores a la salida del rectificador (o en la celda de potencial). Dependiendo del resultado de dicha comparación se llevan a cabo las acciones pertinentes y entonces se realiza la función de control. El controlador reportará para su visualización, los valores obtenidos a la salida del lazo de control, a través de la interfase de comunicación interna hacia el módulo de comunicación con el usuario.

El controlador cuenta con medidores de potencial, voltaje y corriente para poder recibir los datos que se dan a la salida de los lazos de control. Para los modos de control por potencial y voltaje se cuenta con una corriente límite, de la cual el rectificador no deberá rebasar, no importando si el valor de potencial y/o voltaje deseado no se haya alcanzado.

En un inicio, el software del controlador lee los valores de referencia y el modo de control de la memoria RAM, establece el tiempo de disparo de los SCRs para que se tenga una salida mínima del rectificador.

Después el software del controlador realiza periódicamente las siguientes funciones:

- Lee los valores que se presentan a la salida del rectificador y celda de potencial y los compara con los valores que se tienen como de referencia. Se procede a calcular el tiempo de disparo de los SCRs para disminuir los valores de salida. Por el contrario, si los valores de referencia son mayores que los de salida, entonces se calcula el tiempo de disparo para aumentar los valores de salida. Si se trata de modo de control por corriente se lleva a cabo la modificación del tiempo de disparo de los SCRs.
- En el caso de los modos de control por potencial y voltaje, se verifica si se ha alcanzado o no la corriente límite. De ser así, y el cálculo del tiempo es para aumentar los valores de salida, el tiempo de disparo no se modifica. El tiempo de disparo para estos modos de control se modifica sólo si el cálculo es para disminuir los valores de salida o cuando no se ha alcanzado la corriente límite.
- Verifica si los valores de referencia y/o modo en la memoria RAM han sido modificados. Si dichos valores han sido modificados, los lee de la memoria

para trabajar con los nuevos valores de referencia y/o modo; en caso contrario sigue trabajando con los valores de referencia y modo que tenía.

Como ya se mencionó, el tiempo de disparo del SCR es el que se modifica para aumentar o disminuir el valor de la señal rectificada. Se debe de observar que mientras más tiempo se tarde en disparar a los SCR's, el valor de la señal rectificada en cada lóbulo será menor.

De acuerdo a lo anterior, si se desea aumentar la señal rectificada se debe disminuir el tiempo de retardo de disparo de cada SCR; y por el contrario, si se desea disminuir la señal, hay que aumentar el tiempo de retardo.

El detector de cruce por cero, indica al programa a partir de que momento empieza a contarse el tiempo de retardo. El controlador modifica este tiempo pudiéndolo llevar hasta un valor máximo de 8.33 mS, que es lo que dura un semiciclo de una señal de alterna de alimentación (es decir de una señal de 60 Hz).

3.10.2 SELECCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN.

Dentro de las posibles opciones para el lenguaje de programación del microcontrolador se encuentran solo dos: lenguaje ensamblador y lenguaje C. Para programar en ambos casos, se requiere de software de apoyo. En el primer caso se requiere de un ensamblador y en el segundo de un compilador. Como lo que se tuvo disponible fue únicamente el ensamblador, el programa se escribió precisamente en ese lenguaje.

3.10.3 PARTICIÓN FUNCIONAL DE CADA MACRO.

• Programa principal.

START:	LLAMA A SUBROUTINA INICIA	INICIALIZACIÓN DE PARÁMETROS
SELMODO:	LLAMA A MODO	SE SELECCIONA EL MODO DE CONTROL Y VALORES DE REFERENCIA
SELCON*:	JB P3.2 (INT0), \$	SE DEJA PASAR LO QUE QUEDA DEL SEMICICLO ALTO DEL DETECTOR DE CRUCE POR CERO Y ENTRA LA INT0.
	JB P3.2 (INT0), \$	SE DEJA PASAR LO QUE QUEDA DEL SEMICICLO BAJO DEL DETECTOR DE CRUCE POR CERO Y ENTRA INT1 EN P3.3.
CONTROL:	LLAMA A SUBROUTINA SCONV	RUTINA DE LECTURA DE CP, VCD E ICD MEDIANTE EL CAD.
	LLAMA A PASO1	RUTINA DE CONTROL, PARÁMETROS CONSIDERADOS: MODO DE CONTROL Y REFERENCIA.

	LLAMA A PASO2	RUTINA DE CONTROL, PARÁMETROS CONSIDERADOS: LÍMITE DE CORRIENTE
INSISTE:	CICLO DE COMUNICACIÓN A RAM	VARIABLES AUXILIARES: DIR 70H Y SEH DE RAM INTERNA. LA PRIMERA FUNCIONA COMO UN CONTADOR DE INTENTOS (5 MAX.) O INDICADOR DE EXITO EN LA ESCRITURA. LA SEGUNDA SE USA COMO UN CONTADOR PARA HACER TIEMPO ENTRE INTENTOS.
	LLAMA SUBROUTINA COMM	RUTINA DE ESCRITURA DE LOS VALORES LEIDOS DE CP, VCD E ICD. SI LA ESCRITURA SE LLEVÓ A CABO, CARGA A 70H CON #05H.
TIEMPO 6*:	SUBTAREA DE TIEMPO	ESPERA APROX. X* MICROSEGS. ANTES DE HACER UN NUEVO INTENTO.
CAMBIO:		AVERIGUA SI HA HABIDO CAMBIO EN LA SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE REF. DE CONROL.
	JB P3.0, NO_CAMB	PREGUNTA SI PUEDE ACCESAR A RAM EXTERNA. SI NO ESPERA AL SIGUIENTE CICLO PARA HACERLO, LLÉNDOSE A NO_CAMB.
	CLR P3.1	ACCESA A BUS COMÚN.
	LEE DIR. EXTERNA 30H	SI EL CONTENIDO NO ES #55H, => NO HAY UN CAMBIO Y SE VA A NO_CAMB
SI_CAMB:	BRINCA A SELMOD0	
NO_CAMB:	BRINCA A SELCON	
	END	

• **Rutina inicia.**

- DESCONECTA BUS COMÚN (AUNQUE POR DEFAULT DE ENCENDIDO DEL MICRO, EL BUS DEBE ESTAR DESCONECTADO: ES REDUNDANTE).
- CONFIGURA TIMERS 0 Y 1 A MODO DE 16 BITS.
- SE ESTABLECEN VALORES INICIALES DE LOS TIMERS (E511H PARA RELOJ DE 10 MHZ., CON INCREMENTO DE 18H Y TOLERANCIAS PARA CP, VCD E ICD DE 00H)
- CARGA TIMERS CON VALORES DE INICIALIZACIÓN.
- LIMPIA LOS PINES DE DISPARO DE SCR'S (P3.4 Y P3.5).
- DESHABILITA EL SEGURO DE HARDWARE (P1.2 CONTRA FALSOS DISPAROS) POR ENERGIZACIÓN O RESET DEL MICRO.
- HABILITA INTERRUPTIONES (IE = 8BH)

- **Rutina modo.**

LEE LOS VALORES DE MODO: CP, VCD O ICD EN CELDAS 00H, 01H Y 02H DE MEMORIA COMPARTIDA. ESTABLECE VARIABLES PARA UNA TOLERANCIA+ Y TOLERANCIA-, PARA LAS VARIABLES QUE SE SELECCIONEN COMO PARÁMETRO DE CONTROL.

CARGA_REF:

- ESPERA AL SEMÁFORO PARA ACCESAR A RAM (P3.0).
- DESHABILITA INTERRUPCIONES (EA: =0).
- ACCESA A BUS COMÚN (P3.1) EN BAJO (PONE UN LATCH EN ESTADO DE TRANSPARENCIA; EL OTRO LO HABILITA PARA CAMBIAR ENTE ESTADO DE LANCHEO O TRANSPARENCIA).
- CARGA MODO DE CONTROL DE REFERENCIA EN R7 (01H - CP, 02H - VCD, 03H - ICD).
- CARGA REFERENCIA DE CP/VCD EN DIR 3DH DESDE DIR 01H DE RAM EXTERNA.
- CARGA REFERENCIA DE ICD EN DIR 32H DESDE DIR 02H DE RAM EXTERNA.
- LIBERA BUS COMÚN Y HABILITA INTERRUPCIONES.
- GENERA I + TOL:= 3AH E I - TOL:= 3BH. DIRECCIONES USADAS PARA I COMO PARÁMETRO LÍMITE..

REFI_TOL:

- PREGUNTA SI EL MODO DE REFERNCIA ES CORRIENTE, SI NO SE VA A REF_CP.
- TOMA IREF (32H) Y SUMA Y RESTA LA TOLERANCIA GENERANDO NUEVAMENTE I + TOL : = 38H E I - TOL: = 39H (DIRECCIONES USADAS CUANDO LA CORRIENTE ES REFERENCIA).
- SALTA A RETMODO.

REFCP_TOL:

- SI MODO DE REFERNCIA NO ES CP ENTONCES SE VA A REV_TOL
- TOMA LO QUE HAYA EN REF. AUX. (DIR 3DH) Y LO PONE EN REFERENCIA DE CP (DIR 30H)
- GENERA REF(MODO) + TOL:= 38H Y REF(MODO) - TOL:= 39H
- SALTA A RETMODO

REFV_TOL:

- SI EL MODO DE REFERENCIA NO ES VCD ENTONCES SE VA A ERR1:
- TOMA LO QUE HAYA EN REF. AUX. (DIR 3DH) Y LO PONE EN REF. DE VOLTAJE (DIR 31H).
- GENERA REF(MODO) + TOL:= 38H Y REF(MODO) - TOL:= 39H.

ERR1: EN ESTE CASO, SE HA GENERADO UN ERROR DE MODO. SE CARGAN LOS TIMERS CON EL VALOR QUE GENERA LA SALIDA CERO. SE CARGAN DE NUEVO LOS PARÁMETROS DE CONTROL.

RETMODO:

- REHABILITA INTERRUPCIONES
- REGRESA DE LA SUBROUTINA DE MODO AL PROGRAMA PRINCIPAL.

- **Rutina sconv.**

REALIZA LA CONVERSIÓN DE LAS DIFERENTES LECTURAS (CP, VCD E ICD) A FORMATO DIGITAL DE 8 BITS Y SE CONCLUYE EL PROCESO DE INTEGRACIÓN DE LA TARJETA ANALÓGICA. P1.5, P1.6 Y P1.7 SELECCIONAN EL CANAL DE CONVERSIÓN EN EL MULTIPLEXOR ANALÓGICO.

- SE SELECCIONA EL CANAL 1 : CELDA DE POTENCIAL.
- SE HACE LECTURA
- SE GUARDA EN DIR 60H (RAM INTERNA)
- SE SELECCIONA EL CANAL EL CANAL 2: VOLATAJE DE CD.
- SE HACE LECTURA
- SE GUARDA EN DIR 61H (RAM INTERNA)
- SE SELECCIONA EL CANAL 3: CORRIENTE DE DIRECTA.
- SE HACE LECTURA
- SE GUARDA EN DIR 62H (RAM INTERNA)

- **Rutina paso1.**

- EL ACUMULADOR ES CARGADO CON EL VALOR LEIDO DEL MODO DE CONTROL SELECCIONADO.
- SE COMPARA VALOR LEIDO CONTRA VALOR DE REFERENCIA. SI ES IGUAL TERMINA LA RUTINA.
- SI EL VALOR LEIDO ES MENOR QUE EL DE REFERENCIA + TOLERANCIA, SE EVALUA SI TAMBIÉN ES MENOR QUE EL VALOR DE REF. - TOL. SI NO, SE DECREMENTA LA SALIDA MEDIANTE DECTIME.
- SI EL VALOR DE REFERENCIA ES IGUAL, SALE DE RUTINA. SI NO, EVALUA SI VALOR LEIDO ES MAYOR QUE EL VALOR DE REF. - TOL. SI SÍ, ENTONCES SE SALE DE RUTINA. SI NO, PREGUNTA SI EL MODO SELECCIONADO ES MODO DE CORRIENTE. SI ES MODO DE CORRIENTE, SE INCREMENTA LA SALIDA MEDIANTE INCTIME. SI NO, SE CARGA LA BANDERA DE SOLICITUD DE INCREMENTO Y RETORNA DE LA RUTINA.

- **Rutina paso2.**

- SI EL MODO DE CONTROL SELECCIONADO ES CORRIENTE, SALE DE RUTINA.
- SI EL VALOR LEIDO ES IGUAL A LA REF. DE CORRIENTE + TOL., SE VA A TEMP2; SI NO, SE EVALUA SI EL VALOR LEIDO ES MENOR QUE LA REF. DE CORRIENTE + TOL. SI NO, SE DECREMENTA LA SALIDA Y LIMPIA LA BANDERA DE AUMENTAR SALIDA. SI SÍ, SE HACE LA SIGUIENTE EVALUACIÓN.
- SI EL VALOR LEIDO = REF. CORR - TOL., SE VA A TEMP2. SI NO, PREGUNTA SI EL VALOR LEIDO ES MAYOR QUE LA REF. DE CORRIENTE - TOL. SI SÍ, SE VA A TEMP2. SI NO LEE LA BANDERA DE AUMENTAR. SI SU CONTENIDO ES UN #55 SE INCREMENTA LA SALIDA Y SE LIMPIA LA BANDERA DE AUMENTAR SALIDA. SI NO SE RETORNA AL PROGRAMA PRINCIPAL.
- EN TEMP2 DE LEE LA BANDERA DE AUMENTAR. SI ES IGUAL A #55H, SE AUMENTA LA SALIDA Y SE LIMPIA LA BANDERA DE AUMENTAR SALIDA. SI NO, SE RETORNA AL PROGRAMA PRINCIPAL.

- **Rutina comm**

- PREGUNTA POR BANDERA DE ACCESO A RAM EXTERNA. SI ESTA EN ALTO, NO SE EFECTUA LA ESCRITURA A RAM EXTERNA, SINO HASTA EL PRÓXIMO CICLO.
- DESHABILITA INTERRUPCIONES, ACCESA BUS COMÚN.
- PONE LOS VALORES LEIDOS EN RAM COMPARTIDA. EN R2 SE INDICA CUANTOS VALORES SE DESEAN ESCRIBIR EN RAM, EN UN SOLO ACCESO.
- DESCONEXIÓN DE BUS COMÚN Y REHABILITACIÓN DE INTERRUPCIONES.
- SE MODIFICA BANDERA DE EXITO EN LA ESCRITURA A RAM EXTERNA (DIR 70H := 05H).

- **Rutinas de atención a interrupciones.**

EXTI0: ACTIVA AL TIMER 0 Y HABILITA A LOS INTEGRADORES.

EXTI1: PONE A TRABAJAR EL TIMER 1

TIMER0: DISPARA AL SCR 1.

TIMER1: DISPARA AL SCR 2.

- **Rutina muleta.**

ESTA RUTINA PERMITE HACER UN DIAGNÓSTICO DEL MÓDULO DE CONTROL E INTERFASE DE COMUNICACIÓN INTERNA, INDEPENDIENTEMENTE DEL MÓDULO 1 MAESTRO. ÚNICAMENTE SE DEBE ACTIVAR, REENSAMBLANDO ESTE PROGRAMA. CONSIDERE QUE LA BANDERA DE ACCESO A RAM EXTERNA SE DEBERÁ ESTAR EN NIVEL BAJO.

Nota: El algoritmo a detalle se encuentra en el Apéndice B de esta obra.

CAPITULO IV

**IMPLEMENTACIÓN
Y PRUEBAS DE
OPERACIÓN**

4.1 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

El prototipo se construyó por etapas. La primera de ellas se implementó mediante tarjetas protoboard, módulo por módulo hasta llegar a integrar el sistema completo. En esta versión inicial, se hicieron los primeros experimentos.

Posteriormente, habiendo conocido algunas de las consecuencias de armar un prototipo tan grande en tarjetas de este tipo, se traslado todo el armado a tarjetas mas compactas y seguras utilizando una técnica de wire-wrap ligeramente modificada. Esto permitió que el número de circuitos por área disminuyera y que la permanencia y calidad de contacto de las conexiones se garantizara.

El sistema se armó modularmente. Cada módulo se probó en forma independiente hasta completar el sistema. Se hicieron pruebas de funcionamiento conjunto y algunos ajustes. Finalmente se interconectaron las dos grandes secciones del proyecto: la interfase de comunicación con el usuario y el módulo de control y adquisición de datos mediante la interfase de comunicación interna. Se hicieron las pruebas globales del sistema.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS FINALES.

Estas pruebas se hicieron con el propósito de conocer mas sobre las características operativas del equipo en su conjunto. A pesar de que estas fueron sencillas, ellas reflejan en forma objetiva, hasta que punto se cumplieron o no los objetivos planteados al principio de esta obra.

4.2.1 OBJETIVOS DE LA PRUEBA.

Verificar:

1. La operación adecuada de lazos de control.
2. La exactitud de las lecturas.
3. El desempeño del equipo a su máxima capacidad.
4. La operación del equipo por tiempo prolongado.

En pruebas preliminares y parciales se utilizaron equipos como osciloscopios, multímetros, juegos de resistencias de potencia, cables, electrodos, celda de referencia, etc. Sin embargo para la prueba final, el equipo se redujo a:

- Dos multímetros RMS verdadero marca Fluke.
- Un osciloscopio
- Cables
- Un generador de señales.
- Un juego de resistencias de potencia de 4.3 ohms aproximadamente, cada una.

- Un banco de resistencias de precisión de 1ohm con capacidad de disipación mayor a 15 KW.
- Un punto de tierra física.

4.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBAS.

Se hicieron 3 tipos de pruebas: una por cada modo de control.

- **Prueba de control por Voltaje con Limite de Corriente.**

Pasos:

1. Se conectaron las terminales de salida "+" y "-" del rectificador a un arreglo resistivo de 17.6 ohms aproximadamente, con la finalidad de reducir el consumo de corriente durante la prueba.
2. Se accionó el equipo. Por omisión, la referencia de voltaje y corriente de salida siempre son 0 VCD y 0 ACD respectivamente.
3. Se seleccionó como límite de corriente 100 ACD y se aumentó el valor de la referencia de voltaje desde 0 hasta 100VCD en pasos de 10 VCD.
4. Se hizo la respectiva tabulación (ver primer columna de la tabla 4-1).
5. Se cambio el valor del banco de resistencias de 17.6 por una resistencia de 4.6 aproximadamente. Se seleccionó como máxima salida de voltaje a 100 VCD y se seleccionaron aleatoriamente diferentes valores de límite de corriente entre 0 y 20 ACD. Teóricamente, el valor de corriente que se genera al aplicar un voltaje de 100 VCD a una resistencia de 4.6 ohms es de 23.25 amperes. Sin embargo, al aplicar los límites de corriente, el sistema respondió a ellos eficazmente.

- **Prueba de Control por Corriente.**

Pasos:

1. Se conectaron las terminales de salida "+" y "-" del rectificador a un arreglo resistivo de 1.0 ohm. La finalidad de esto fue la evaluación indirecta de los valores de corriente proporcionados.
2. Se puso en funcionamiento el equipo (por omisión, la referencia de corriente de salida siempre será 0 ACD). Se aumentó gradualmente el valor de la referencia de corriente desde 0 hasta 100VCD en pasos de 10 VCD.
3. Se hizo la respectiva tabulación (ver segunda columna de la tabla 4-1).

- **Prueba de Control por Potencial con Limite de Corriente.**

Pasos:

1. Se conectaron las terminales de salida "+" y "-" del rectificador a un arreglo resistivo de aproximadamente 17.6 ohms.
2. Se accionó el equipo. Por omisión, la referencia de potencial y corriente de salida siempre son 0 VCD y 0 ACD respectivamente.

3. Se seleccionó como límite de corriente 100 ACD y se aumentó el valor de la referencia de potencial desde 0 hasta 2.40VCD en pasos de 0.20 VCD.
4. Se hizo la respectiva tabulación (ver la tercer columna de la tabla 4-1).
5. Se cambió el valor del banco de resistencias de 17.6 por una resistencia de 4.6 aproximadamente. Se seleccionó como valor de referencia de potencial mayor al valor actual la estructura, propiciando un incremento en la corriente. Se seleccionaron aleatoriamente diferentes valores de límites de corriente entre 0 a unos 80 amps. de CD y todos ellos fueron respetados.

Las pruebas anteriores se hicieron a una tensión de alimentación de 220 VAC, para eliminar el riesgo de exceder la capacidad de circulación de corriente de la instalación eléctrica del lugar. Sin embargo, en pruebas de bajo consumo de corriente, se operó el equipo a 110 VAC.

4.2.3 LIMITANTES DE LA PRUEBA.

Una de ellas, es la que concierne a las deficiencias que se presentaron en la regulación de voltaje del suministro eléctrico en la zona. En alguna de las muestras de lecturas para control por corriente, no se pudo obtener el valor máximo de corriente de salida, debido a esta situación.

En el caso de pruebas de control por celda de potencial, la prueba se tuvo que limitar a simular la señal de realimentación de la celda de referencia, a través de un generador de señales, debido a que no se tuvo disponible una instalación real de protección catódica cercana.

4.3 RESULTADOS.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en una tabla. En ésta, se ilustran los valores experimentales de salida obtenidos para los modos de control de voltaje y corriente. Además se muestran los valores de potencial leídos por el sistema al simularse la señal de realimentación para este modo de control.

Voltaje de Salida (VCD)		Corriente de Salida (ACD)		Celda de potencial (VCD)	
Valor mostrado en desplegado numérico.	Valor mostrado en voltmetro marca Fluke 77	Valor mostrado en desplegado numérico.	Voltmetro Fluke 77, resistencia de carga es de 1 Ω	Entrada medida en voltmetro Fluke 77.	Valor mostrado en desplegado numérico.
10	7.9	10	10	0.80	0.79
20	18.3	20	20	1.00	0.99
30	28.2	30	30	1.20	1.20
40	38.2	40	40	1.40	1.40

50	48.3	50	50	1.60	1.61
60	58.5	60	60	1.80	1.80
70	68.8	70	70.9	2.00	2.00
80	79.1	80	80	2.20	2.20
90	89.6	90	90	2.40	2.40
100	101.4	100	100		

TABLA 4-1. Lecturas tomadas después de calibración.

Voltaje de Salida (VCD)		Corriente de Salida (ACD)		Celda de potencial (VCD)	
Valor mostrado en desplegado numérico.	Valor mostrado en voltmetro marca Fluke 77	Valor mostrado en desplegado numérico.	Voltímetro Fluke 77, resistencia de carga es de 1 Ω	Entrada medida en voltmetro Fluke 77.	Valor mostrado en desplegado numérico.
10	8.05	10	10.5	0.80	0.74
20	18.6	20	21.5	1.00	0.95
30	28.6	30	31.1	1.20	1.10
40	38.7	40	41.1	1.40	1.36
50	49.2	50	51.5	1.60	1.56
60	59.4	60	61.8	1.80	1.76
70	69.7	70	72.9	2.00	1.96
80	80.2	80	83.3	2.20	2.15
90	91.8	90	94.6	2.40	2.34
100	103.1	*	*		

*No se obtuvo una lectura correcta debido a mala regulación en la línea.

TABLA 4-2. Lecturas tomadas después de una variación de aproximadamente 10°C en la temperatura de operación.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En cuanto a las especificaciones planteadas en la sección 3.4 se obtuvo lo siguiente:

- Se cumplieron los requerimientos de resolución en los medidores y los rangos de control propuestos para los diferentes modos, incluyendo límites de corriente.
- El controlador puede almacenar permanentemente los parámetros de control guardando una copia de estos en la interfase de comunicación interna.
- Las señales proporcionadas por los drivers de los SCR's fueron adecuadas.
- Sobre la exactitud en el control de las variables, se obtuvieron errores de 2.1% para control por voltaje, 0.9% para control por corriente y 0.4% para potencial. Sin embargo, se encontró que el coeficiente de variación por temperatura es un poco elevado.

Por otro lado, algunas observaciones adicionales sobre el comportamiento del controlador durante el tiempo de pruebas, fueron las siguientes.

- En cuanto a la estabilidad del controlador, las lecturas a lazo cerrado, en el caso de control por voltaje y por corriente se mantuvieron en ± 1 cuenta, es decir ± 0.5 V y 0.5 A.
- En general, el equipo siempre trabajó con continuidad, mientras estuvo encendido. Se tuvo trabajando bajo prueba durante mas de dos meses y medio, varias horas al día y solo en una ocasión presentó un fallo, entrando a estado de reset, re-inicializando el control con los parámetros por omisión (valores de inicialización).
- En cuanto a la operación del equipo a máxima capacidad, éste siempre funcionó correctamente, alcanzado los niveles máximos sin ningún problema, mientras el porcentaje de regulación de la alimentación, no sea mayor al 20%.

CONCLUSIONES

Dentro del área de mantenimiento y conservación de estructuras metálicas, se plantea la necesidad de proteger a éstas de los efectos nocivos de la corrosión. Poco a poco se han ido desarrollando diferentes métodos para disminuir o minimizar el proceso corrosivo en tuberías y otros elementos. Cambios en las condiciones ambientales de clima y humedad, modifican la composición y conductividad de los suelos. El presente trabajo presenta una alternativa de solución, que permita al usuario disponer de un sistema de suministro de corriente directa que se adapte a las condiciones cambiantes del medio. Es por esto que este sistema podrá proporcionar una protección más eficiente, sin necesidad de modificar constantemente los parámetros de operación, como en el caso de un rectificador manual convencional.

Por otra parte, a lo largo de este trabajo, ha sido posible verificar algunos de los fundamentos teóricos que dieron pie a este desarrollo. Con base en resultados experimentales, se pudo demostrar que:

- Es posible construir una fuente de corriente directa variable a través del uso de rectificadores controlados por fase.
- El valor promedio o de corriente directa de una señal periódica y variable puede evaluarse mediante la integración física de las señales de voltaje y corriente de directa, corroborando así las expresiones teóricas 2.1 y 2.2 citadas en el segundo capítulo de esta obra.
- El modelo arquitectónico multiprocesador del sistema digital propuesto es funcional, y simplifica y eficientiza las tareas de control y adquisición de señales del rectificador.

Dentro de objetivos planteados al principio de esta tesis, se encuentra el del diseño y construcción de un sistema de control digital para rectificadores de potencia monofásicos con capacidad de salida de directa en sus terminales de 0-100 [V] y de 0-100 [A] con control de salida por Voltaje, Corriente y Potencial. En el capítulo cuarto, secciones 4.3 y 4.4, que corresponden a resultados y análisis de los mismos, se verifica el cumplimiento del objetivo principal de esta tesis.

Algunos de los problemas que se encontraron durante desarrollo de este proyecto fueron los siguientes:

- La generación de componentes de ruido indeseables en el voltaje de alimentación del controlador. Este ruido se producía por la conmutación electrónica de los circuitos digitales presentes. Esta situación afectaba principalmente el funcionamiento de la circuitería analógica y a la precisión y exactitud de las conversiones A-D. Este problema se pudo solucionar implementando algunos cambios en diferentes áreas del proyecto. El primero de estos cambios, fue colocar varios capacitores de 0.1 μ F el de La primera fue

en la sección de Control y Adquisición de Datos colocando capacitores de $0.1\mu\text{F}$ entre el punto de alimentación y tierra de circuitos tanto analógicos como digitales alimentados por $V_{cc}(5\text{V})$. La segunda modificación se llevó a cabo en la sección de fuentes de alimentación del sistema, separando los puntos de alimentación positiva de 5 volts para circuitos digitales y para los analógicos, a través de un filtro LC.

- La linealización de las señales optoacopladas. Normalmente, al trabajar con opto-transistores, se obtiene una pequeña distorsión de la señal amplificada de salida. Esta inconveniencia se pudo reducir considerablemente, mediante una polarización adecuada de los opto-transistores y el recorte en amplitud de la señal transmitida a través de los mismos, de modo el punto de operación de la señal, se ubicara en una zona de operación lo más lineal posible.

En resumen, en esta tesis se ha demostrado la viabilidad de la construcción de un sistema de control que automatice las funciones de rectificadores para protección catódica.

Además, después de un gran esfuerzo y dedicación, a través de la aplicación de diversos conocimientos de las áreas de electrónica y la eléctrica, así como de sistemas de protección catódica en general, se logra cumplir la meta: el diseño y construcción de un controlador para rectificadores aplicados a sistemas de protección catódica.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁVILA J. Y GENESCA J. Más allá de la herrumbre II. Ed. Fondo de Cultura Económica, México, 1991.
2. BUCHLA, DAVID. Applied electronics instrumentation and measurement. Ed. Merril-MacMillan Publishing Co., E.U.A., 1992.
3. CLAYTON, G.B. Operational Amplifiers. Ed. Newnes-Butterworths, E.U.A., 1973.
4. DURACELL CORPORATION.
[Http://www.duracellusa.com/education/anatomy.html](http://www.duracellusa.com/education/anatomy.html).
5. FISHER, MARVIN J. Power electronics. PWS-Kent Publishing Company, E.U.A., 1991.
6. JONES, DENNY A. Principles and prevention of corrosion, E.U.A., 1992.
7. INTEL, Manual de Referencia de la familia de microcontroladores MCS 8051. E.U.A.
8. NATIONAL SEMICONDUCTOR. Cmos logic devices, E.U.A., 1993.
9. NATIONAL SEMICONDUCTOR. Operational amplifiers databook, E.U.A., 1993.
10. NATIONAL SEMICONDUCTOR. Data acquisition databook, E.U.A., 1993.
11. MADRAS, SAMUEL. Química. Curso preuniversitario, McGraw-Hill, México, 1980.
12. MOTOROLA. M68HC11 reference manual, E.U.A., 1991.
13. PEABODY, A.G. Control of Pipeline Corrosion. NACE, E.U.A., 1967.
14. RASHID, M. H. Power electronics: circuits, devices and applications, Prentice-Hall. E.U.A., 1988.
15. SCANLON, LEO J. The 68000: Principles & Programming. H. W. Sams & Co., E.U.A., 1985.
16. UHLIGH, H. H. Corrosión y control de corrosión, 1963.

APÉNDICE A

DIAGRAMAS ELÉCTRICOS.

En esta sección se presentan los diagramas del sistema desarrollado. Estos diagramas están agrupados en dos planos. El primero corresponde al Tarjeta del Controlador Digital. Este está distribuido en seis subplanos: P1A, P1B, ... P1F. La segunda plano es referente a la Tarjeta Analógica, la cual incluye a los lectores de voltaje, corriente y potencial así como los drivers de SCRs. Esta sección esta distribuida en ocho subplanos: P2A, P2B, ... P2H.

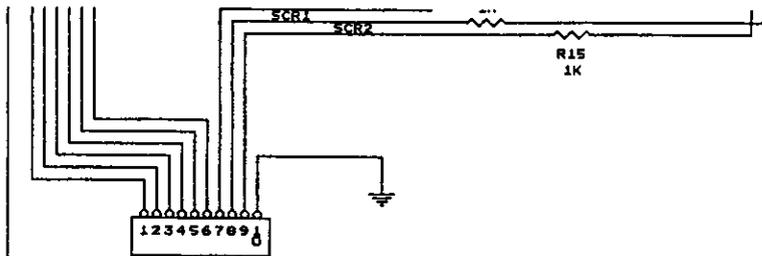
Los esquemas de distribución de planos son los siguientes:

Plano 1

P1A	P1C	P1E
P1B	P1D	P1F

Plano 2

P2A	P2C	P2E	P2G
P2B	P2D	P2F	P2H

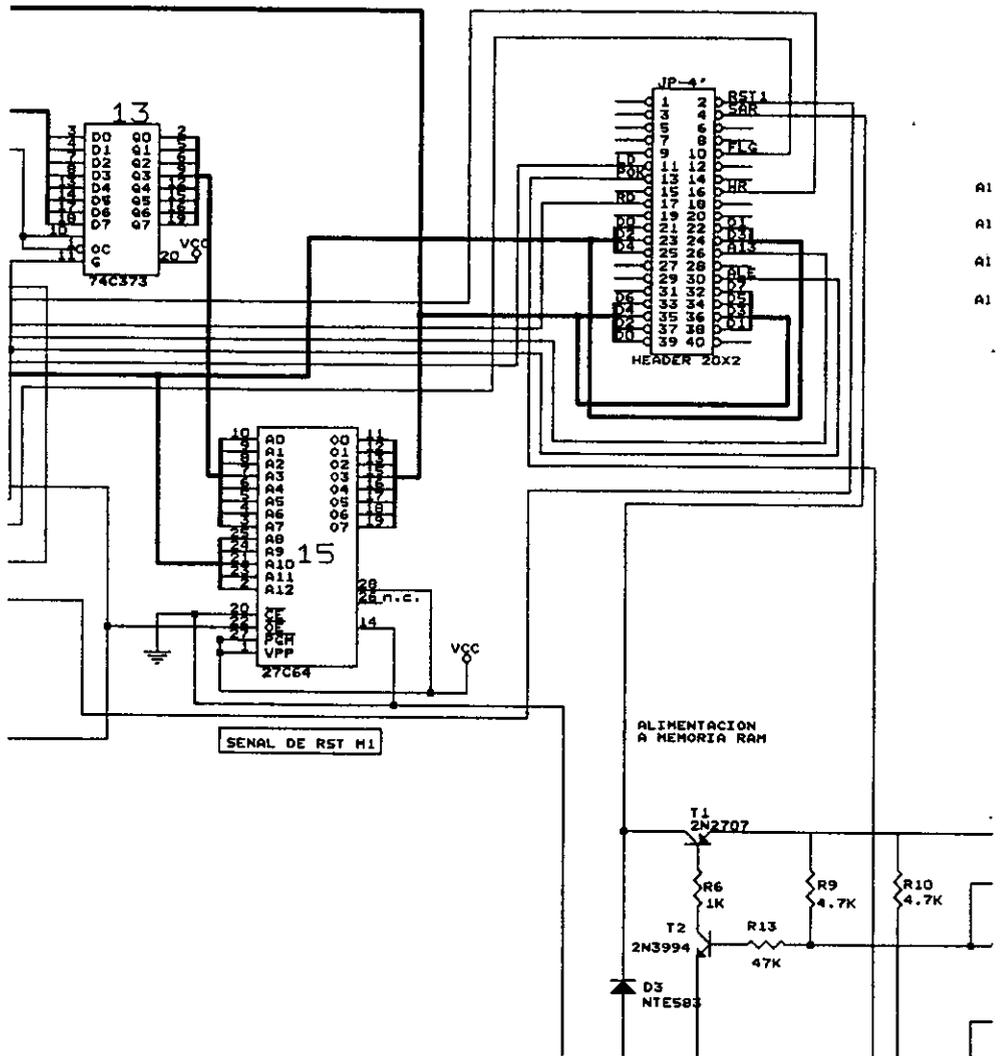


HEADER 10
 A TARJETA DE
 ADQUISICION DE
 DATOS.

NOTA:

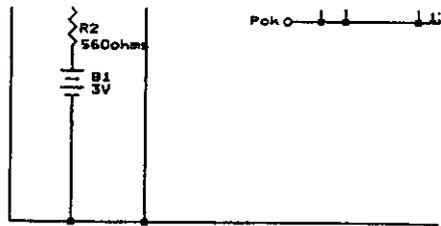
Pok Es un punto de prueba.

∅ diametro de cc1 a cc4 1.75mm



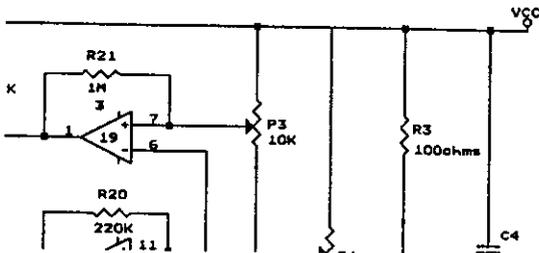
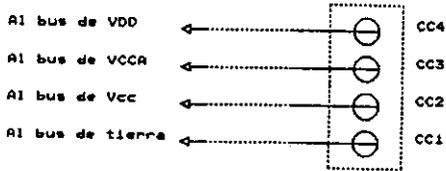
A1
A1
A1
A1

PLANO 1-C

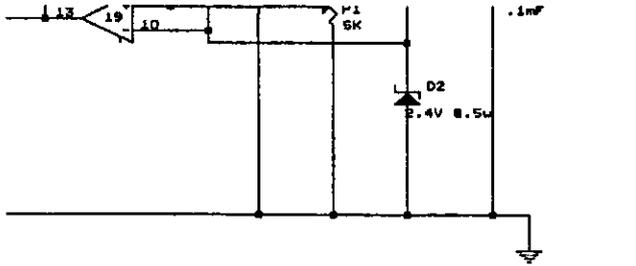


PLANO 1-D

DETALLE DE CONEXION
DE TERMINALES DE
ALIMENTACION

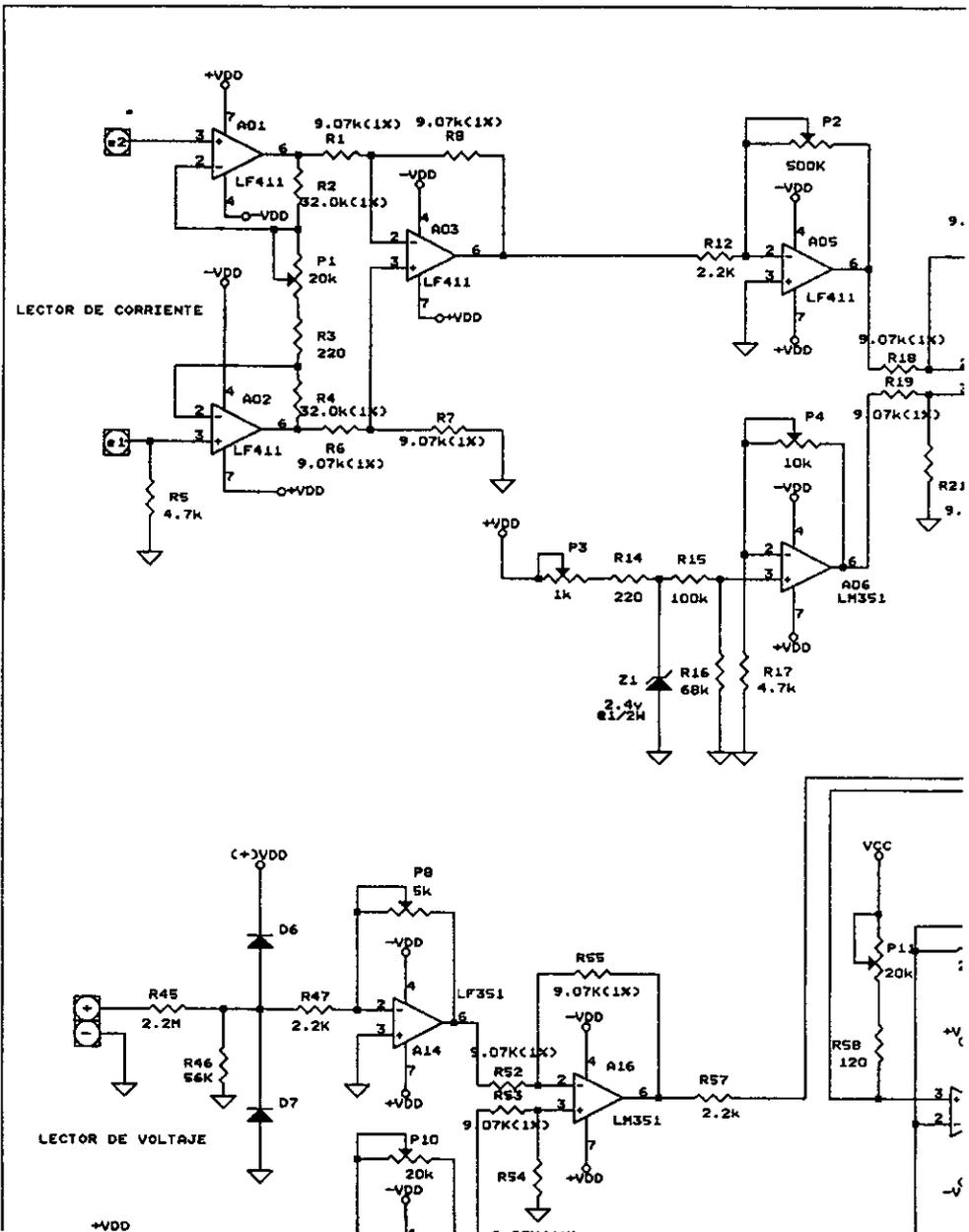


PLANO 1-E

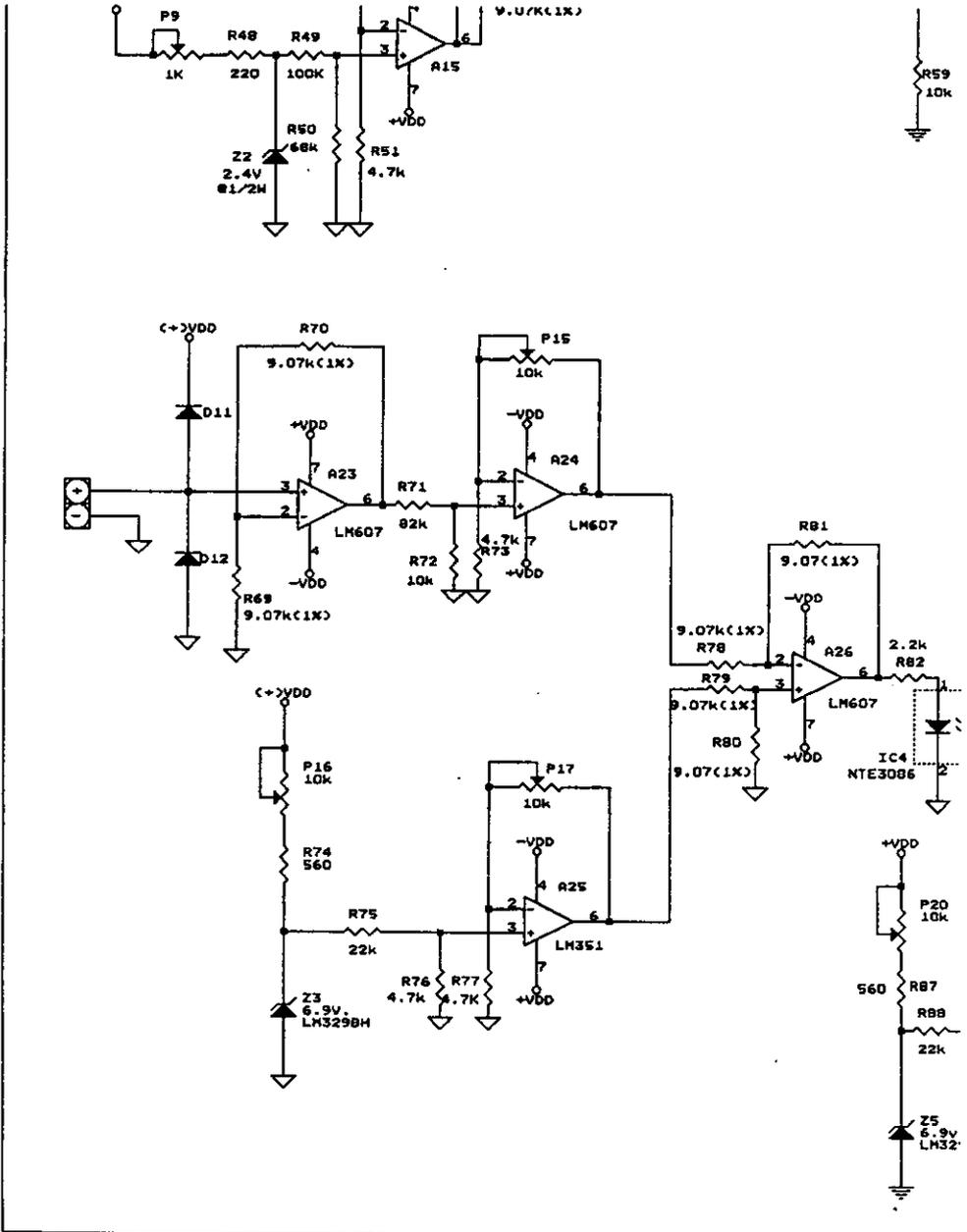


Title		
MODULO CONTROLADOR		
Size	Document Number	REV
C	DIG-1	2
Date:	March 8, 1998	Sheet of

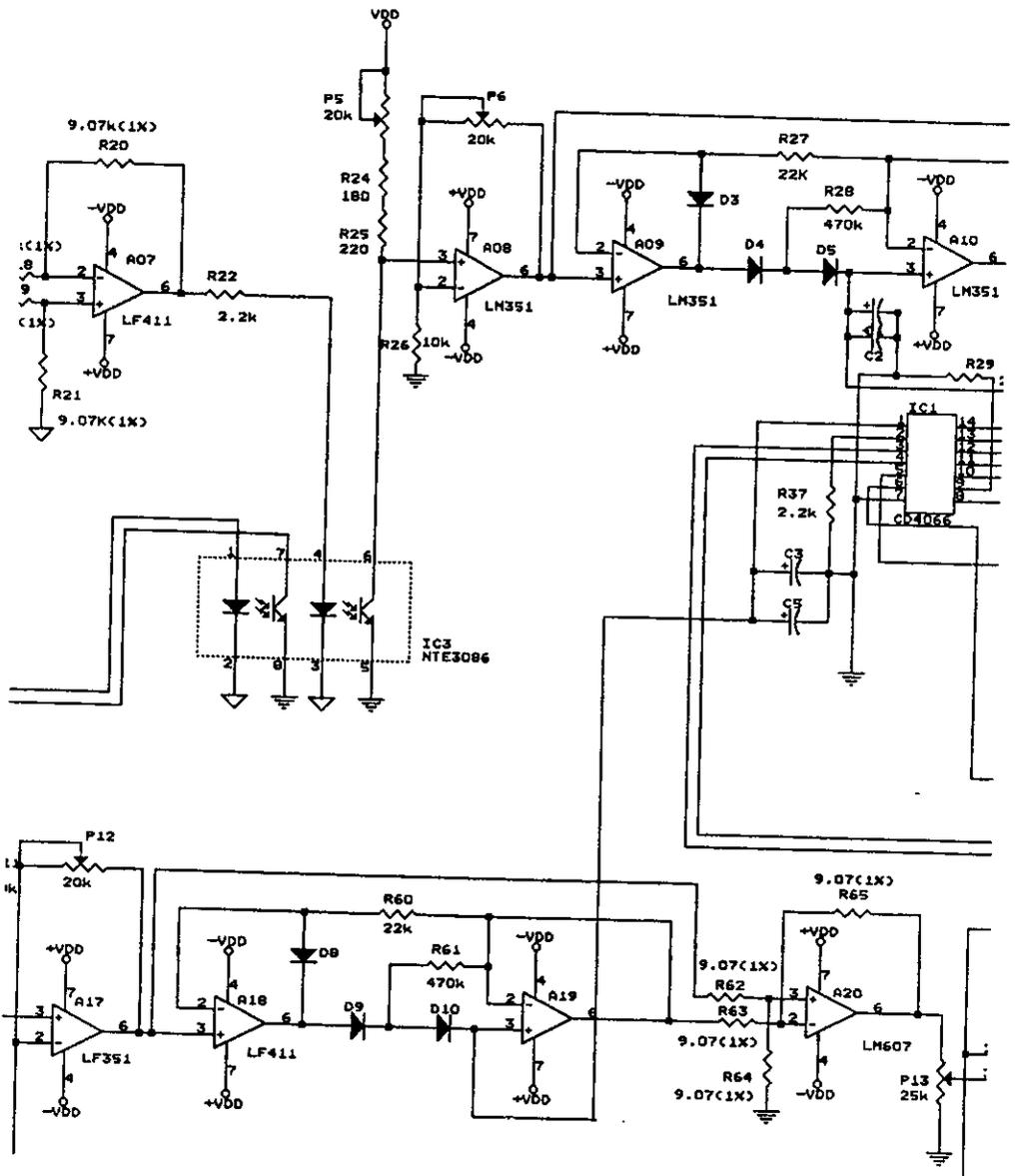
PLANO 1-F



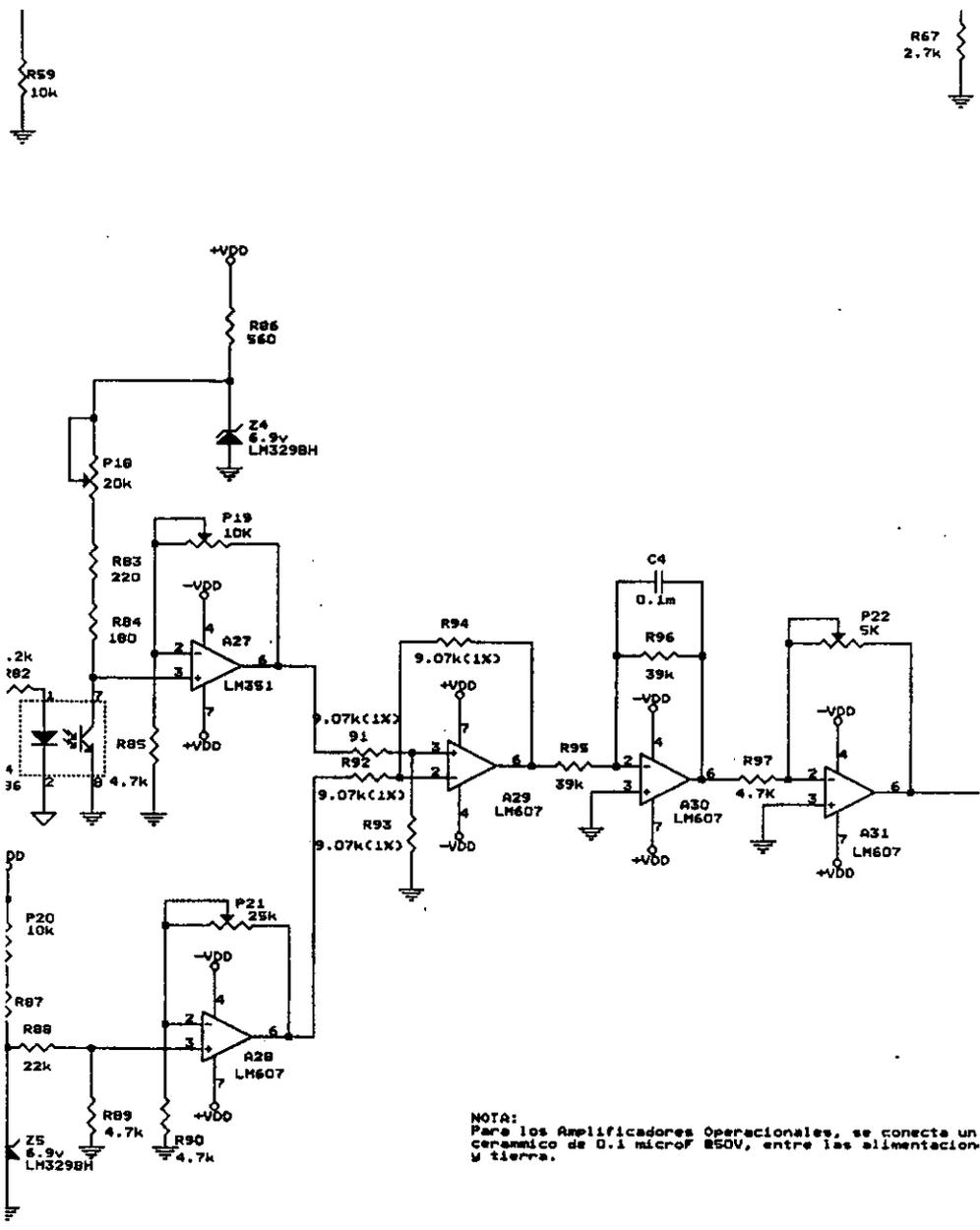
PLANO 1-B



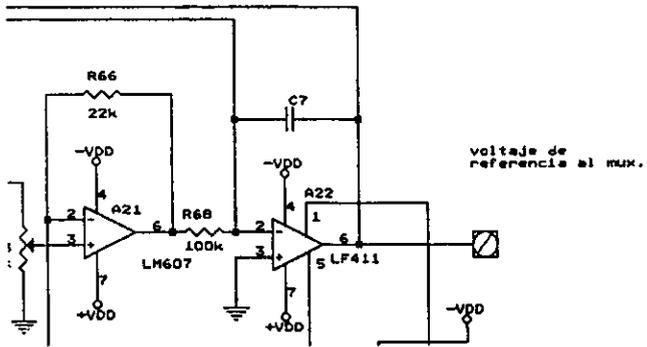
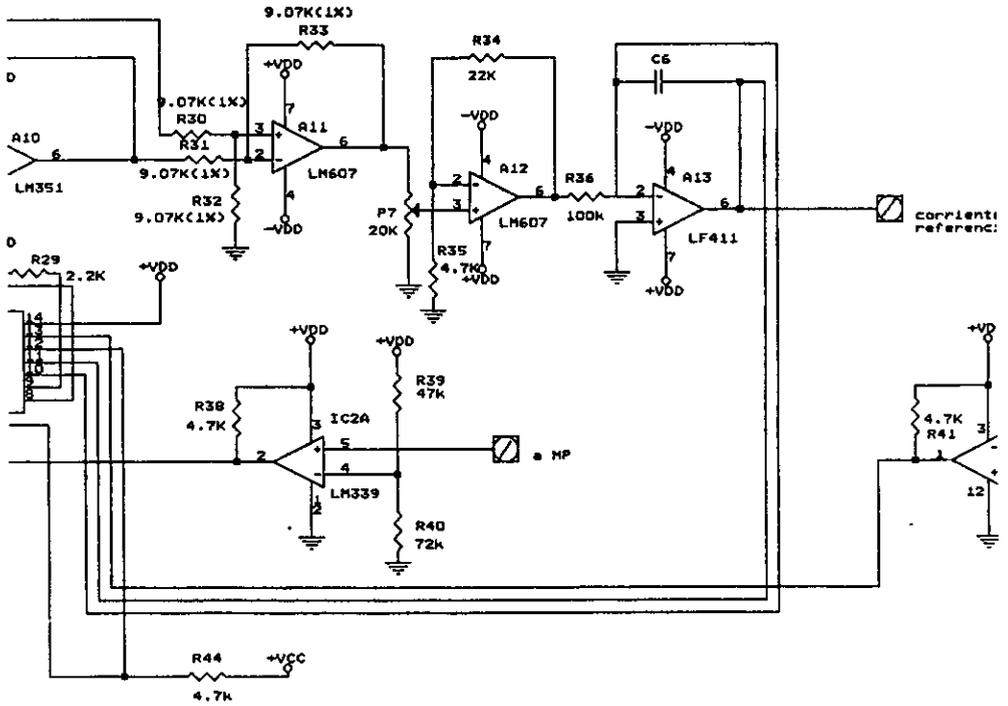
PLANO 2-B



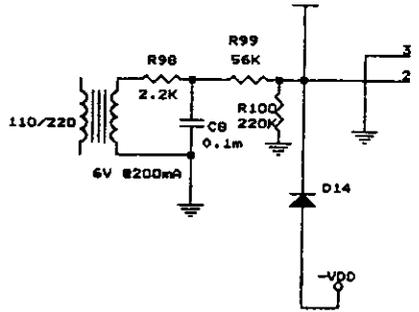
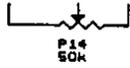
PLANO 2-C



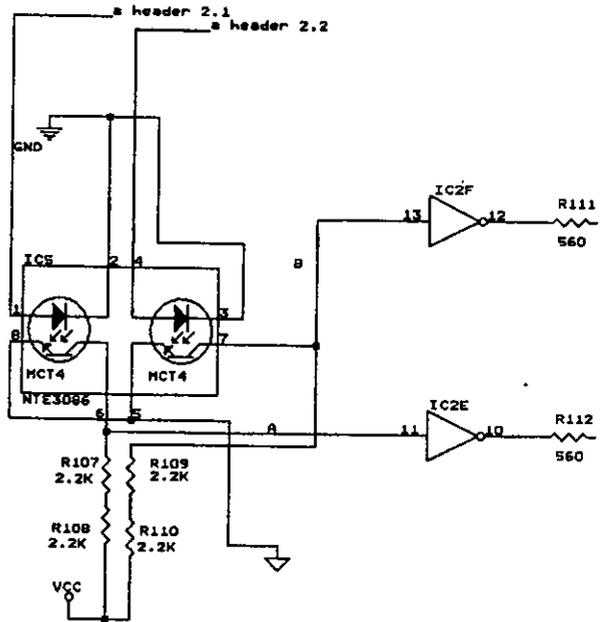
NOTA:
 Para los Amplificadores Operacionales, se conecta un cerámico de 0.1 microF 50V, entre las alimentación y tierra.



PLANO 2-E



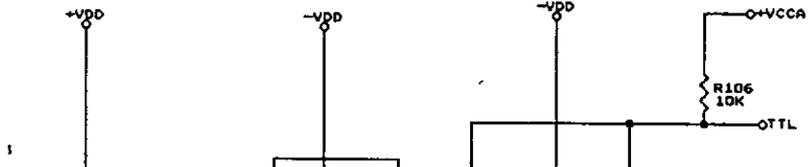
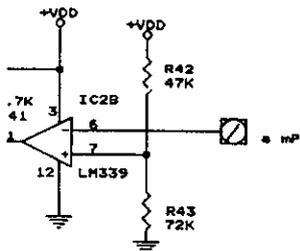

 potencial de
 referencia al mux.



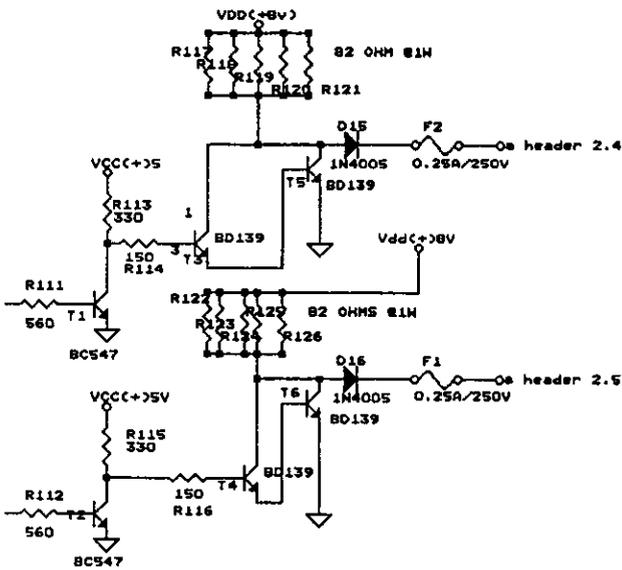
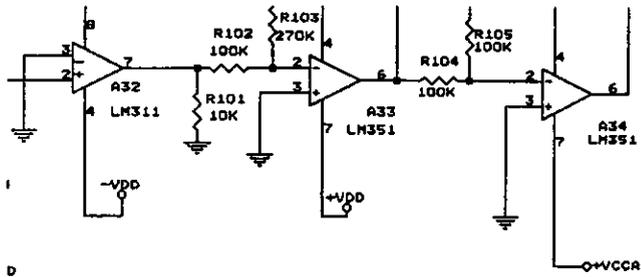
cta un capacitor
 acion +VDD y -VDD

PLANO 2-F

ente de
ferencia al mux.



PLANO 2-G



Title		
Tarjeta de Analógica		
Size	Document Number	REV
A	ANA-001	0
Date:	March 11, 1998	Sheet of 8

PLANO 2-H

APÉNDICE B

PROGRAMA DE CONTROL

```

; *****
; *****          PROGRAMA DE CONTROL          *****
; *****          *****
; *****
RESET:  L JMP START
ORG 03H
        ACALL EXTIO      ;          INT EXTERNA
        RETI             ;          0
ORG 0BH
        ACALL TIMER0    ;          INT TIMER 0
        RETI             ;
ORG 13H
        ACALL EXTII     ;          INT EXTERNA
        RETI             ;          1
ORG 1BH
        ACALL TIMER1    ;          INT TIMER 1
        RETI             ;
ORG 40H
EXTIO:  SETB TCON.4      ; LA INTERRUPCION EXTERNA 0 PONE A RUTINA
        ;              ; CONTAR EL TIMER 0 EXTIO
        CLR P1.1        ; P1.1 EN BAJO LE INDICA AL
        ;              ; INTEGRADOR QUE EMPIECE A TRABAJAR
        MOV 4AH,#55H    ; UN 55H EN LA DIR 4AH INDICA A LAS PONE A
        ;              ; RUTINAS DE INCREMENTO O DECREMENTO
        ;              ; QUE PUEDEN ACTUAR PARA ALTERAR LOS
        ;              ; VALORES INICIALES AUXILIARES DE LOS
        ;              ; TIMERS
        CLR IE.0        ; DESHABILITA LA INT EXT 0 PUES EL CRUCE POR
        ;              ; PULSO DEL CRUCE POR CERO
        ;              ; DURA MEDIO CICLO
        SETB IE.2       ; HABILITA LA INT EXT 1
        RET             ;
EXTII:  SETB TCON.6     ; LA INTERRUPCION EXTERNA 0 PONE A RUTINA
        ;              ; CONTAR EL TIMER 1 EXTIO
        CLR IE.2        ; DESHABILITA LA INT EXT 1 PUES EL PONE A
        ;              ; PULSO DEL CRUCE POR CERO DURA MEDIO
        ;              ; CICLO
        SETB IE.0       ; HABILITA LA INT EXT 0
        RET             ;
TIMER0: SETB P3.4       ; LA INTERRUPCION DEL TIMER 0 RUT TIMER 0
        CLR TCON.4     ; DISPARA EL SCR 1, PARA SU CUENTA
        CLR TCON.5     ; Y LIMPIA SU BANDERA DE OVERFLOW
        ACALL PROCE1   ; LLAMA A LA SUBROUTINA PROCE1
        MOV TH0,40H    ; CARGA T0 (TH0 DE LA DIR 40H
        MOV TLO,41H    ; TLO DE LA DIR 41H)
        ACALL TIEMPO   ; LLAMA A LA RUTINA TIEMPO
        CLR P3.4       ; LIMPIA EL BIT DE DISPARO DEL SCR 1
        RET             ; REGRESA DE LA INTERRUPCION
TIMER1: SETB P3.5       ; LA INTERRUPCION DEL TIMER 1 RUT TIMER 1
        CLR TCON.6     ; DISPARA EL SCR 2, PARA SU CUENTA
        CLR TCON.7     ; Y LIMPIA SU BANDERA DE OVERFLOW
        ACALL PROCE1   ; LLAMA A LA SUBROUTINA PROCE1
        MOV TH1,40H    ; CARGA T1 (TH1 DE LA DIR 40H
        MOV TLI,41H    ; TLI DE LA DIR 41H)

```

```

ACALL TIEMPO      ; LLAMA A LA RUTINA TIEMPO
CLR P3.5         ; LIMPIA EL BIT DE DISPARO DEL SCR 2
RET              ; REGRESA DE LA INTERRUPCION

TIEMPO: MOV 5DH,#80H ; ESTA RUTINA HACE TIEMPO PARA
TIEMPO2: DJNZ 5DH, TIEMPO2 ; PROLONGAR EL PULSO DE DISPARO
RET              ;

PROCE1: MOV 50H,A   ; SALVA EL CONTENIDO DEL ACUMULADOR      PROCE1
          ; EN LA DIR 50H                      SI EL
MOV 20.0H,C       ; SALVA EL CONTENIDO DEL CARRY          INCREMENTO O
          ; EN LA DIR 20.0H                    DECREMENTO
MOV A,4CH         ; CARGA EN ACC LA BANDERA DE "LISTO"      DE LOS
          ; PARA LOS VALORES AUXILIARES DE    TIMERS ES
          ; INICIALIZACION DE LOS TIMERS     COMPLETO LOS
CJNE A,#55H,NoRdy1 ; SI NO ES 55 NO ESTAN LISTOS Y          COPIA EN LOS
          ; SE VA A NoRdy1                      PARAMETROS
MOV 40H,R3        ; SI ESTAN LISTOS LOS COPIA DE R3..R4    DE
MOV 41H,R4        ; EN 40H,41H (LAS DIRS DONDE SE BUSCAN INICIALIZA-
          ; LOS PARAMETROS DE INICIALIZACION) CION
NoRdy1: MOV A,50H   ; REGRESA EL ACUMULADOR A COMO ESTABA
MOV C,20.0H      ; REGRESA EL CARRY A COMO ESTABA
RET              ; REGRESA DE LA RUTINA

ORG 100H
INICIA: SETB P3.1 ; DESCONECTA EL BUS COMUN
MOV TMOD,#11H    ; PONE LOS TIMERS 0 Y 1 EN MODO DE      CARGA
          ; 16 BITS                          PARAMETROS
MOV 46H,#0E5H    ; PONE EN LAS DIR 46H..47H LOS          DE
MOV 47H,#011H    ; VALORES MINIMOS PERMITIDOS A LOS    INICIALIZA-
          ; TIMERS
MOV 40H,46H      ; CARGA EN LAS DIR 40H..41H LOS
MOV 41H,47H      ; VALORES CON LOS CUALES EL DISPARO
          ; DE LOS SCRS DAN LA SALIDA MINIMA
          ; (RELOJ 10 MHZ)
MOV 44H,#24      ; CARGA EN LA DIR 44H EL VALOR DEL
          ; INCREMENTO PARA LOS TIMERS
MOV 33H,#0H      ; CARGA EN LA DIR 33H LA TOLERANCIA
          ; PARA CELDA DE POTENCIAL
MOV 34H,#0H      ; CARGA EN LA DIR 34H LA TOLERANCIA
          ; PARA VOLTAJE
MOV 35H,#0H      ; CARGA EN LA DIR 35H LA TOLERANCIA
          ; PARA CORRIENTE
MOV TH0,40H      ; CARGA LOS TIMERS CON LOS VALORES
MOV TL0,41H      ; DE INICIALIZACION
MOV TH1,40H      ; DE LAS DIRS 40H..41H
MOV TL1,41H      ;
MOV R3,40H       ; CARGA EN R3..R4 LOS VALORES DE
MOV R4,41H       ; INICIALIZACION DE LOS TIMERS
          ; R3..R4 FUNCIONAN COMO AUXILIARES
          ; PARA INCREMENTAR O DECREMENTAR
          ; LOS VALORES DE INICIALIZACION
CLR P3.5         ; LIMPIA LOS CANALES DE LOS SCRS
CLR P3.4         ;
CLR P1.2         ; BAJA EL PIN P1.2 PARA LA HABILITAR LA COMPUERTA
          ; AND QUE EVITA QUE LOS SCR SE DISPAREN AL

```

```

; ENERGIZAR
MOV IE,#0BH ; CARGA INTERRUPCIONES
RET

MODO: NOP ;
MODO3: JB P3.0,MODO3 ; ESPERA A QUE LA BANDERA DE ACCESO
; A RAM ESTE ABAJO
CLR IE.7 ; DESHABILITA INTERRUPCIONES
CLR P3.1 ; ACCESA A BUS COMUN
MOV DPTR,#000H ; LA DIRECCION 000H CONTIENE EL SELECCIONA
MOVX A,@DPTR ; TIPO DE REFERENCIA (TIPO DE MODO) EL MODO
MOV R7,A ; R7 TIENE EL TIPO REFERENCIA DE CONTROL
; 1H PARA C. P.
; 2H PARA VOLTAJE
; 3H PARA CORRIENTE
MOV DPTR,#001H ; CARGA LA REFERENCIA Y LA GUARDA EN
MOVX A,@DPTR ; 3DH
MOV 3DH,A ;
CLR C ;
MOV DPTR,#002H ; LA DIRECCION 002H CONTIENE LA CARGA
MOVX A,@DPTR ; REFERENCIA DE CORRIENTE REFERENCIA
MOV 32H,A ; 32H TIENE LA REFERENCIA DE DE CORRIENTE
; CORRIENTE
SETB P3.1 ; DESCONECTA BUS COMUN
SETB IE.7 ; HABILITA INTERRUPCIONES
ADD A,35H ; SUMA LA REFERENCIA DE ESTABLECE
; CORRIENTE CON SU TOLERANCIA TOLERANCIA
; SI PASA DE FF SE VA A NoTolSup1 DE CORRIENTE
JC NoTol1 ; SI PASA DE FF SE VA A NoTolSup1
MOV 3AH,A ; SI NO PASA LA PONE EN LA DIR 3AH
TOL1: MOV A,32H ; RESTA A LA REFERENCIA DE
SUBB A,35H ; CORRIENTE SU TOLERANCIA
JC NoTol2 ; SI ES MENOR QUE CERO SE VA A
; NoTol2
MOV 3BH,A ; SI NO LA PONE EN LA DIR 3BH
AJMP MODO2
NoTol1: MOV 3AH,#0FFH ; PONE FFH A LA TOL+REF CORR
CLR C ; LIMPIA EL CARRY
AJMP TOL1
NoTol2: MOV 3BH,#00H ; PONE 0 A LA REF CORR - TOL
CLR C ; LIMPIA EL CARRY

MODO2: CJNE R7,#03H,REF_CP ; SI LA REFERENCIA NO ES DE LA REFEREN-
; CORRIENTE SE VA A REF_CP CIA ES DE
; CORRIENTE
MOV A,32H ; CARGA LA REFERENCIA EN ACC ESTABLECE
CLR C ; LA
ADD A,35H ; SUMA LA TOLERANCIA A LA REF TOLERANCIA
JC NoTol13 ; SI PASA DE FFH SE VA A NoTol13 DE CORRIENTE
MOV 38H,A ; SI NO PONE TOL+REF EN LA DIR
; 38H
TOL2: MOV A,32H ; RESTA A LA REFERENCIA SU
SUBB A,35H ; TOLERANCIA (CORRIENTE)
JC NoTol14 ; SI ES MENOS QUE 0 SE VA A NoTol14
MOV 39H,A ; SI NO PONE LA RESTA EN LA DIR
; 39H
AJMP RETMODO ;

```

```

NoTo13: MOV 38H,#0FFH      ; PONE FFH EN LA TOL+REF
        CLR C              ; LIMPIA EL CARRY
        AJMP TOL2         ;
NoTo14: MOV 39H,#00H      ; PONE 0 EN LA REF-TOL
        CLR C              ; LIMPIA EL CARRY
        AJMP RETMODO     ;
                                ;
REF_CP: CJNE R7,#01H,REF_V ; SI LA REFERENCIA NO ES C. P.      CARGA
                                ; SE VA A REF_V          REFERENCIA
                                ;                               DE CELDA
                                ;                               DE POTENCIAL
        MOV 30H,3DH       ; 30H TIENE LA REFERENCIA DE C.P.    LA
                                ;                               REFERENCIA
                                ;                               ES DE C.P.
        MOV A,30H         ; CARGA LA REFERENCIA EN ACC
        CLR C              ;
        ADD A,33H         ; SUMA LA TOLERANCIA A LA REF      ESTABLECE
        JC NoTo15         ; SI PASA DE FFH SE VA A NoTo15   TOLERANCIA
        MOV 38H,A         ; SI NO PONE TOL+REF EN LA DIR    DE C. P.
                                ; 38H
                                ;
TOL3:   MOV A,30H         ; RESTA A LA REFERENCIA SU
        SUBB A,33H        ; TOLERANCIA (C.P.)
        JC NoTo16         ; SI ES MENOS QUE 0 SE VA A NoTo16
        MOV 39H,A         ; SI NO PONE LA RESTA EN LA DIR
                                ; 39H
        AJMP RETMODO     ;
                                ;
NoTo15: MOV 38H,#0FFH      ; PONE FFH EN LA TOL+REF
        CLR C              ; LIMPIA EL CARRY
        AJMP TOL3         ;
NoTo16: MOV 39H,#00H      ; PONE 0 EN LA REF-TOL
        CLR C              ; LIMPIA EL CARRY
        AJMP RETMODO     ;
                                ;
REF_V:  CJNE R7,#02H,ERR1 ; SI LA REFERENCIA NO ES DE      CARGA REF
                                ; VOLTAGE SE VA A ERR1    DE VOLTAJE
        MOV 31H,3DH       ; 31H TIENE LA REFERENCIA DE
                                ; VOLTAGE
                                ;
                                ;                               LA REFEREN-
                                ;                               CIA ES DE
                                ;                               VOLTAJE
        MOV A,31H         ; CARGA LA REFERENCIA EN ACC
        CLR C              ;
        ADD A,34H         ; SUMA LA TOLERANCIA A LA REF      ESTABLECE
        JC NoTo17         ; SI PASA DE FFH SE VA A NoTo17   TOLERANCIA
        MOV 38H,A         ; SI NO PONE TOL+REF EN LA DIR    DE VOLTAJE
                                ; 38H
                                ;
TOL4:   MOV A,31H         ; RESTA A LA REFERENCIA SU
        SUBB A,34H        ; TOLERANCIA (VOLTAJE)
        JC NoTo18         ; SI ES MENOS QUE 0 SE VA A NoTo18
        MOV 39H,A         ; SI NO PONE LA RESTA EN LA DIR
                                ; 39H
        AJMP RETMODO     ;

```

```

NoTol17: MOV 38H,#0FFH ; PONE FFH EN LA TOL+REF
          CLR C          ; LIMPIA EL CARRY
          AJMP TOL4      ;
NoTol18: MOV 39H,#00H ; PONE 0 EN LA REF-TOL
          CLR C          ; LIMPIA EL CARRY

          AJMP RETMODO

ERR1:    MOV R3,46H     ; CARGA LOS VALORES INICIALES           MANEJO
          MOV R4,47H     ; AUXILIARES DE LOS TIMERS                 DE
          MOV R5,48H     ; CON VALORES QUE DEN LA SALIDA           ERROR
          MOV R6,49H     ; MINIMA                                   DE
          MOV 4CH,#55H   ; VALORES LISTOS A SER COPIADOS          MODO
          AJMP MODO3     ; SE REGRESA A MODO3

          ; R7 TIENE EL TIPO DE REFERENCIA
          ; (MODO)
          ; 32H TIENE LA REFERENCIA DE
          ; CORRIENTE
          ; 31H TIENE LA REFERENCIA DE VOLTAJE
          ; 30H TIENE LA REFERENCIA DE C.P.
          ; DEPENDIENDO DE R7
          ; LA DIR 3AH TIENE REF CORR + TOL
          ; LA DIR 3BH TIENE REF CORR - TOL
          ; LA DIR 38H TIENE REF (MODO) + TOL
          ; LA DIR 39H TIENE REF (MODO) - TOL
          ; HABILITA INTERRUPCIONES
          ; REGRESO DE LA RUTINA MODO

RETMODO: SETB IE.7
          RET

SCONV:   MOV DPTR,#2000H ; DIRECCIONA AL CONVERTIDOR           LEE
          ; LOS PINES 5,6 Y 7 DE P1 SELECCIONAN PARAMETROS
          ; LA SEWAL A CONVERTIR DEL ADC
          ; P1.7 P1.6 P1.5
          ; 0 0 0 C. POTENCIAL
          ; 0 0 1 VOLTAJE SALIDA
          ; 0 1 0 CORRIENTE SALIDA
          ; 0 1 1 VOLTAJE ENTRADA
          ; 1 0 0 CORRIENTE ENTRADA
          ; 1 0 1
          ; 1 1 0
          ; 1 1 1
          ; SELECCIONA CONVERSION DE C.P.
          ;
          ;
          ; MANDA A REALIZAR UNA CONVERSION
          ; GUARDA EL VALOR DE C.P. (DIR 60H)
          ; SELECCIONA CONVERSION DE VOLTAJE
          ; DE SALIDA
          ; MANDA A REALIZAR UNA CONVERSION
          ; GUARDA EL VALOR DE VOLTAJE DE
          ; SALIDA (DIR 61H)
          ; SELECCIONA CONVERSION DE CORRIENTE
          ; DE SALIDA
          ; MANDA A REALIZAR UNA CONVERSION
          ; GUARDA EL VALOR DE CORRIENTE DE
          ; SALIDA (DIR 62H)
          ; SELECCIONA CONVERSION DE VOLTAJE

```

```

; DE ENTRADA
ACALL LEE ; MANDA A REALIZAR UNA CONVERSION
MOV 63H,A ; GUARDA EL VALOR DE VOLTAJE DE
; ENTRADA (DIR 63H)
CLR P1.5 ; SELECCIONA CONVERSION DE CORRIENTE
CLR P1.6 ; DE ENTRADA
SETB P1.7 ;
ACALL LEE ; MANDA A REALIZAR UNA CONVERSION
MOV 64H,A ; GUARDA EL VALOR DE CORRIENTE DE
; ENTRADA (DIR 64H)
SETB P1.7 ; DEJA DE SELECCIONAR CONVERSION
SETB P1.6 ;
SETB P1.5 ;
SETB P1.1 ; P1.1 EN ALTO INDICA AL INTEGRADOR
; QUE YA PUEDE DEJAR DE TRABAJAR
;CLR P1.3 ; INICIA RESTAURACION DE LOS DETECTORES
; DE PICOS
RET ; REGRESO DE LA RUTINA SCONV

LEE: MOVX @DPTR,A ; MANDA A REALIZAR UNA CONVERSION
JB P1.0,$ ; ESPERA LA CONVERSION
MOVX A,@DPTR ; LEE LA CONVERSION
RET

PASOL: CJNE R7,#1H,ESVOLT ; SI EL MODO NO ES CP SE VA ESVOLT CARGA EL
MOV A,60H ; SI ES CP CARGA EL VALOR LEIDO DE VALOR LEIDO
; C.P. SEGUN LO
AJMP COMPARA ; SE VA A COMPARA INDIQUE EL
ESVOLT: CJNE R7,#2H,ESCORR ; SI EL MODO NO ES DE VOLTAJE SE VA MODO
; A ESCORR
MOV A,61H ; SI ES VOLTAJE CARGA EL VALOR LEIDO
; DE VOLTAJE DE SALIDA
AJMP COMPARA ; SE VA A COMPARA
ESCORR: MOV A,62H ; SI EL MODO NO FUE CP NI VOLTAJE
; ENTONCES ES CORRIENTE, Y CARGA EL
; VALOR LEIDO DE CORRIENTE DE SALIDA
;
; ACC TIENE EL VALOR LEIDO DEPENDIENDO
; DEL MODO
;
COMPARA: CJNE A,38H,DIF1 ; SI LA CONVERSION Y LA REF+TOL SE COMPARA
AJMP RETP1 ; NO SON IGUALES SE VA A DIF1 LA
; SI SON IGUALES SE VA A RETP1 CONVERSION
; 38H ES LA DIRECCION DE REF+TOL CON LA
; REFERENCIA
DIF1: JC ACCEPTA1 ; SI A (CONVERSION) ES MENOR QUE
; LO QUE HAY EN 38H (REF + TOL) SE
; VA A ACCEPTA1
CJNE R7,#3H,INCRE ; LA CONVERSION ES MAYOR A LA CUANDO LA
; REF + TOL Y SI NO ES MODO DE CONVERSION
; CORRIENTE SE VA A INCRE ES MAYOR
; A LA REF
INCRE: ACALL DECTIME ; PROCEDIMIENTO PARA DECREMENTAR DISMINUYE
; AUX INICIALES DE CONTADOR SALIDA
; (DISMINUIR SALIDA)
AJMP RETP1

```

```

ACEPTA1: CJNE A,39H,DIF2 ; COMPARA A (CONVERSION) CON REF-TOL
                ; Y SI SON DIFERENTES SE VA A DIF2
                AJMP RETP1 ; SI SON IGUALES SE VA A RETP1
                ; 39H ES LA DIR DE REF - TOL
DIF2: JNC RETP1 ; SI A (CONVERSION) ES MAYOR QUE
                ; LO QUE HAY EN 39H (REF - TOL) SE
                ; VA A RETP1

                ; A (CONVERSION) ES MENOR QUE REF-TOL CONVERSION
CJNE R7,#3H,TEMP1 ; SI NO ES MODO CORRIENTE SE VA A MENOR QUE
                ; TEMP1 REFERENCIA

ACALL INCTIME ; SI ES MODO CORRIENTE INCREMENTA SE AUMENTA
                ; AUX INI DE CONTADOR SIN TEMPORALES SALIDA
                ; (AUMENTAR SALIDA DIRECTAMENTE) DIRECTO

AJMP RETP1 ; Y SE VA A RETPT1

TEMP1: MOV 4BH,#55H ; UN 55H EN LA DIR 4BH INDICA QUE SE SE QUIERE
                ; DESEA INCREMENTAR LA SALIDA AUMENTAR
                ; SALIDA

RETP1: RET ; REGRESO DE LA RUTINA PASO1

PASO2: CJNE R7,#3H,PCORR ; SI LA REFERENCIA ES DE CORRIENTE
LJMP RETP2 ; SE VA A RETP2, SI NO SE VA A PCORR

PCORR: MOV A,62H ; CARGA EL VALOR LEIDO DE CORRIENTE
                ; DE SALIDA
                CJNE A,3AH,DIF3 ; SI A (CONVERSION) ES DIFERENTE A LO SE COMPARA
                ; QUE HAY EN 3AH (REF CORR + TOL) SE CONVERSION
                ; VA A DIF3 Y REF CORR
                ; 3AH ES LA DIR DE REF CORR + TOL
                AJMP TEMP2 ; SI ES IGUAL SE VA A TEMP2

DIF3: JC ACEPTA2 ; SI A (CONVERSION) ES MENOR QUE
                ; REF CORR + TOL SE VA A ACEPTA2

                ACALL DECTIME ; PROCEDIMIENTO PARA DECREMENTAR AUX DISMINUYE
                ; INI DE CONTADOR (DISMINUIR SALIDA) SALIDA

                AJMP NoAumen

ACEPTA2: CJNE A,3BH,DIF4 ; SI A (CONVERSION) ES DIFERENTE A
                ; REF CORR - TOL SE VA A DIF4
                AJMP TEMP2 ; SI ES IGUAL SE VA A TEMP2

DIF4: JNC TEMP2 ; SI A (CONVERSION) > REF CORR - TOL
                ; SE VA A TEMP2

                ; A (CONVERSION) < REF CORR - TOL
TEMP3: MOV A,4BH ; SE CARGA EN ACC LA BANDERA DE
                ; AUMENTAR POR TEMPORALES
                CJNE A,#55H,RETP2 ; SI NO SE DESEA AUMENTAR SE VA A
                ; RETP2

                ACALL INCTIME ; PROCEDIMIENTO PARA INCREMENTAR AUX AUMENTAR

```

```

; INI DE CONTADORES INCREMENTAR SALIDA SALIDA
MOV 4BH,#00H ; LIMPIA LA BANDERA DE QUERER
; AUMENTAR SALIDA
AJMP RETP2
TEMP2: MOV A,4BH ; SE CARGA LA BANDERA DE AUMENTAR
; EN ACC
CJNE A,#55H,RETP2 ; SI NO SE DESEA AUMENTAR SE VA A
; RETP2
NoAumen: MOV 4BH,#00H ; LIMPIA LA BANDERA DE AUMENTAR
; SALIDA POR TEMPORALES
RETP2: RET ; REGRESO DE LA RUTINA PASO2
INCTIME: MOV A,4AH ; CARGA LA BANDERA DE CRUCE POR CERO RUTINA PARA
CJNE A,#55H,NO_INC ; SI NO ES 55H SE VA A NO_INC Y NO INCREMENTAR
; INCREMENTA TIMERS Y
MOV 4CH,#00H ; INDICA A LAS INTERRUPCIONES DE LOS DISMINUIR
; TIMERS QUE LOS VALORES AUXILIARES SALIDA
; NO ESTAN LISTOS PARA SER COPIADOS (NO USA
MOV 4AH,#00 ; LIMPIA LA BANDERA DE CRUCE POR CERO TEMPORALES)
CLR C
MOV A,R4 ; CARGA EL BLS INICIAL DEL TIMER (TL)
ADD A,44H ; LE SUMA EL INCREMENTO (DIR 44H)
MOV 45H,A ; LO GUARDA EN UN TEMPORAL (DIR 45H)
JC INCM5B ; SI LA SUMA PASO DE FFH SE VA A
; INCM5B
MOV R4,A ; SI NO PASO, SE ALTERA EL BLS AUX DEL
; TIMER
AJMP LIST01
INCM5B: CJNE R3,#0FFH,SIGUE ; SI EL MSB DE T0 NO ES FFH
; (NO HA LLEGADO AL TOPE) SE VA A
; SIGUE
AJMP LIST01 ; SI YA LEGO AL TOPE NO HACE NADA
; Y SE VA A LIST01
SIGUE: INC R3 ; INCREMENTA EL MSB DEL TIMER
MOV R4,45H ; AFECTA BLS DEL TIMER CON TEMPORAL
CLR C ; LIMPIA EL CARRY
LIST01: MOV 4CH,#55H ; YA ESTAN LISTOS LOS VALORES TEMPORALES
NO_INC: RET
DECTIME: MOV A,4AH ; CARGA LA BANDERA DEL CRUCE POR CERO RUTINA PARA
CJNE A,#55H,NO_DEC ; SI NO ES 55H SE VA A NO_DEC Y NO DECREMENTAR
; DECREMENTA TIMERS Y
MOV 4CH,#00H ; INDICA QUE LOS VALORES AUXILIARES AUMENTAR
; NO ESTAN LISTOS PARA SER COPIADOS SALIDA
MOV 4AH,#00H ; LIMPIA LA BANDERA DE CRUCE POR CERO (NO USA
CLR C ; TEMPORALES)
MOV A,R4 ; CARGA EL BLS DE T1
SUBB A,44H ; LE RESTA EL INCREMENTO
MOV 45H,A ; LO GUARDA EN UN TEMPORAL (DIR 45H)
MOV 20.1H,C ; SALVA EL CARRY DE LA RESTA EN
; LA DIR 20.1H
MOV A,R3 ; CARGA EL MSB DE T1
CJNE A,46H,NORMAL ; LO COMPARA CON EL MSB MINIMO DE T1
; (DIR 46H) Y SI NO ES IGUAL (NI HA

```

```

; LLEGADO AL TOPE SE VA A NORMAL)
MOV A,45H ; RESTAURA LA RESTA EN EL ACUMULADOR
MOV C,20.1H ; Y EL CARRY
CJNE A,47H,PRUEBA; COMPARA EL LSB DE T1 CON EL LSB MIN
; SI ES MAYOR O IGUAL SE VA A MAYOR
PRUEBA: JNC MAYOR ;
ANORMAL: MOV R4,47H ; PONE LOS VALORES MINIMOS DE T1
MOV R3,46H ;
AJMP LISTO2 ;
MAYOR: MOV C,20.1H ; CARCA EL CARRY DE LA RESTA
JNC NORMAL ; SI NO BAJO DE 00 SE VA A NORMAL
AJMP ANORMAL ; SI PASO SE VA A ANORMAL
NORMAL: MOV A,45H ; RESTAURA LA RESTA Y SU CARRY
MOV C,20.1H ;
JC DECSB1 ; SI LA RESTA BAJA DE 00H SE VA A
; DECSB1
MOV R4,A ; SI NO BAJO, SE ALTERA EL BLS DE T1

AJMP LISTO2

DECSB1: MOV A,R3 ; CARGA EL MSB DE T1
CJNE A,46H,SIGUE3 ; SI EL MSB DE T1 NO ES MSB MAX
; (NO HA LLEGADO AL TOPE) SE VA A
; SIGUE3
AJMP LISTO2 ; SI YA LEGO AL TOPE NO HACE NADA
; Y SE VA A LISTO2
SIGUE3: DEC R3 ; DECREENTA EL MSB DE T1
MOV R4,45H ; AFECTA BLS DE T1 CON TEMPORAL
CLR C ; LIMPIA EL CARRY
AJMP LISTO2 ; SE VA A DEC_TO
LISTO2: MOV 4CH,#55H ; YA ESTAN LISTOS LOS VALORES TEMPORALES
NO_DEC: RET

COMM1: JB P3.0,COMM2 ; PREGUNTA POR LA BANDERA, SI ESTA EN UNO
; SE VA A COMMRET Y NO HACE EL ACCESO A
; MEMORIA
CLR IE.7 ; DESHABILITA INTERRUPCIONES (12)
CLR P3.1 ; ACCESA A BUS COMUN (12)
MOV R0,#60H ;
MOV DPTR,#10H ;
MOV A,@R0 ;
MOVX @DPTR,A ;
SETB P3.1 ; DESCONECTA BUS COMUN (12)
SETB IE.7 ; HABILITA INTERRUPCIONES (12)
COMM2: JB P3.0,COMM3 ; PREGUNTA POR LA BANDERA, SI ESTA EN UNO
; SE VA A COMMRET Y NO HACE EL ACCESO A
; MEMORIA
CLR IE.7 ; DESHABILITA INTERRUPCIONES (12)
CLR P3.1 ; ACCESA A BUS COMUN (12)
MOV R0,#61H ;
MOV DPTR,#11H ;
MOV A,@R0 ;
MOVX @DPTR,A ;
SETB P3.1 ; DESCONECTA BUS COMUN (12)
SETB IE.7 ; HABILITA INTERRUPCIONES (12)
COMM3: JB P3.0,COMMRET ; PREGUNTA POR LA BANDERA, SI ESTA EN UNO
; SE VA A COMMRET Y NO HACE EL ACCESO A

```

```

; MEMORIA
CLR IE.7 ; DESHABILITA INTERRUPCIONES (12)
CLR P3.1 ; ACCESA A BUS COMUN (12)
MOV R0,#62H ;
MOV DPTR,#12H ;
MOV A,@R0 ;
MOVX @DPTR,A ;
SETB P3.1 ; DESCONECTA BUS COMUN (12)
SETB IE.7 ; HABILITA INTERRUPCIONES (12)

COMMRET: RET ; (24)

MULETA: JB P3.0,$ ; ESPERA A QUE LA MEMORIA RAM ESTE DISPONIBLE
CLR P3.1 ; ACCESA A BUS COMUN
MOV DPTR,#00H
MOV A,#03H
MOVX @DPTR,A ; PONE MODO DE CORRIENTE
MOV DPTR,#02H
MOV A,#80H
MOVX @DPTR,A ; PONE CORR=80H
MOV DPTR,#01H
MOV A,#80H
MOVX @DPTR,A ; PONE REFERENCIA = 80H
MOV DPTR,#30H
MOV A,#00H
MOVX @DPTR,A ;
SETB P3.1 ; DESCONECTA BUS COMUN
RET

START: ; ACALL MULETA ;
ACALL INICIA ; VALORES INICIALES (A ESTA PARTE HAY
; QUE MODIFICAR PARA CAMBIAR LOS
; VALORES INICIALES DE TIMERS Y
; TOLERANCIAS

SELMODO: ACALL MODO
SELCON: JB P3.2,$ ; DEJA PASAR LO QUE QUEDA DEL SEMICICLO
; ALTO DEL CRUCE POR CERO
JNB P3.2,$ ; DEJA PASAR EL SEMICICLO BAJO DEL
; CRUCE POR CERO
ACALL SCONV ; LEE LOS PARAMETROS DE CP,VOLT Y CORR
ACALL PASO1 ; REALIZA EL PASO DE CONTROL SEGUN
; EL MODO
ACALL PASO2 ; REALIZA EL PASO DE CONTROL POR
; CORRIENTE
MOV 70H,#00H
MOV 5EH,#40H ; CARGA DE TIEMPO

INSISTE: INC 70H
ACALL COMM1 ; MANDA A ESCRIBIR VALORES LEIDOS

TIEMPO6: DJNZ 5EH, TIEMPO6
MOV R5,70H
CJNE R5,#03,INSISTE

CAMBIO: CLR IE.7 ; DESHABILITA INTERRUPCIONES
JB P3.0,NO_CAMB ; PREGUNTA POR LA BANDERA DE ACCESO A MEM EXT
; SI ESTA PRENDIDA SE VA A NO_CAMB

```

```

        CLR P3.1          ; ACCESA A BUS COMUN
        MOV DPTR,#30H    ; LA DIRECCION EXTERNA 30H NOS DICE SI
        MOVX A,@DPTR     ; HA OCURRIDO UN CAMBIO EN LA
                        ; PROGRAMACION (55H=CAMBIO)
        CJNE A,#55H,SI_CAMB; SI NO HA OCURRIDO CAMBIO SE VA      LEE CAMBIO
                        ; A SELCON
SI_CAMB: MOV A,#00H      ; SI HUBO UN CAMBIO SE APAGA LA
        MOVX @DPTR,A     ; BANDERA (DIR EXT 30H DIFERENTE 55H)
        SETB P3.1        ; DESCONECTA BUS COMUN
        SETB IE.7        ; HABILITA INTERRUPCIONES
        AJMP SELMODO     ; Y SE VA A SELECCIONAR EL MODO
NO_CAMB: SETB P3.1      ; DESCONECTA BUS COMUN
        SETB IE.7        ; HABILITA INTERRUPCIONES
        AJMP SELCON
        END

```