

**Instituto Tecnológico de Costa Rica**

**Escuela de Ingeniería en Electrónica**



**Saret Metalmecánica**

**Diseño e implementación de la actualización de un banco de capacitores  
para la corrección del factor de potencia y monitoreo remoto**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el  
Título de Ingeniero en Electrónica con el Grado Académico de Licenciatura**

**Aníbal Coto Cortés**

**Cartago, Julio de 2003**

## Resumen

SARET METALMECÁNICA es empresa líder en la construcción y montaje de estructuras de acero, como tanques, silos, recipientes a presión, tolvas y tuberías a presión, entre otros, para lo que se utilizan máquinas eléctricas de mediana potencia.

Debido al carácter inductivo de la maquinaria con que se trabaja, se necesita un equipo regulador del factor de potencia. En 1997 la empresa Schneider instaló un banco de capacitores en la planta, sin embargo hace más de un año se tiene que la regulación no es efectiva, lo que ha hecho que la empresa pague altas cantidades de dinero en multas por bajo factor de potencia.

Este documento describe el trabajo realizado para actualizar el banco de capacitores. Se discute acerca de la detección de capacitores defectuosos y del cálculo de la potencia reactiva necesaria para alcanzar los valores mínimos necesarios para eliminar el pago de multas.

La empresa cuenta con un equipo de medición de variables eléctricas denominado Power Logic. Se describe la instalación de un software en un PC que trabaja en conjunto con el Power Logic, con el que es posible monitorear y almacenar todos los datos recolectados, como voltajes, corrientes, factor de potencia, distorsión armónica; para realizar análisis posteriores tipo estadístico.

Para conocer el estado de funcionamiento del banco de capacitores se desarrolló un sistema de monitoreo, mediante el cual es posible detectar las fallas, y así aplicar las medidas correctivas antes de que los efectos adversos sean muy grandes. El sistema es manejado por un microcontrolador, encargado de registrar datos de los sensores, ordenarlos y transmitirlos a un computador tipo PC para que puedan ser almacenados y consultados. Las variables controladas son las corrientes de línea de cada etapa capacitiva y la temperatura del gabinete.

**Palabras claves:** banco de capacitores, factor de potencia, microcontrolador, power logic, RS232, RS485

## **Abstract**

SARET METALMECÁNICA is a leader company in construction and assembly of steel structures, like tanks, silos, pressure recipients, hoppers, pressure pipes, among others, what involves the use of medium power electric machines.

Due at the inductive characteristic of the machinery with works, it's needed a power factor regulator equipment. In 1997 Schneider Company, installed a capacitors bank in the plant. However, since more than one year, the regulation is ineffective. It's consequence has been the payment of high fines by low power factor.

This document describes the job made at the capacitor bank for achieving a power factor according to the standards required by an electrical company. It discusses the detection of faulty capacitors and the calculus of the reactive power needed to get the minimum values that eliminate the fines pay.

The company has a measure equipment denominated Power Logic, which monitors electrical variables. It's described the installation of a software that works with the Power Logic, running in a PC and which is possible to monitor and store the recollected data, as voltages, currents, power factor, harmonic distortion; this offers the opportunity to analyze the electrical energy quality with the plant works.

For knowing the operation state of the capacitors bank, it was developed a monitor system, by means of is possible detect faults, and thus apply the corrective actions before the consequences be big. The system is driven by a microcontroller, which registers the sensor data, orders it and transmits it to a PC to be stored and consulted. The controlled variables are line currents of each capacitor stage and the temperature of the cabinet.

**Key words:** capacitors bank, power factor, microcontroller, power logic, RS232, RS485

## **DEDICATORIA**

***A mi familia, a quien debo todo lo que soy como persona, y que han ayudado para que esta meta sea una realidad. A Melissa, cuyo amor, apoyo y comprensión me dan fuerzas para seguir adelante, y por supuesto a todos aquellos que han contribuido de una u otra forma para alcanzar esta meta.***

## ÍNDICE GENERAL

<b>Capítulo 1: Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Descripción de la empresa .....	1
1.2 Definición del problema y su importancia .....	3
1.2.1 Reducción del Factor de Potencia .....	3
1.2.2 Monitoreo Remoto.....	7
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivo General .....	8
1.3.2 Objetivos Específicos.....	9
<b>Capítulo 2: Antecedentes</b> .....	<b>10</b>
2.1 Estudio del problema a resolver .....	10
2.1.1 Actualización del banco de capacitores .....	10
2.1.2 Monitoreo remoto de los datos brindados por el Power Logic .....	11
2.1.3 Monitoreo remoto del estado de funcionamiento del banco de capacitores.....	11
2.2 Requerimientos de la empresa .....	12
2.3 Solución propuesta .....	12
2.3.1 Actualización del banco de capacitores .....	13
2.3.2 Monitoreo Remoto de los datos brindados por el Power Logic .....	13
2.3.3 Monitoreo remoto del estado de funcionamiento del banco de capacitores.....	14
<b>Capítulo 3: Procedimiento metodológico</b> .....	<b>16</b>
<b>Capitulo 4: Descripción del hardware utilizado</b> .....	<b>18</b>
4.1 Banco de capacitores .....	18
4.1.1 <i>Computer 12</i> .....	18
4.1.2 <i>Capacitores de 15KVAR</i> .....	19
4.2 Monitoreo de los datos del Power Logic .....	19

4.2.1	<i>Power Logic</i> .....	19
4.2.2	<i>Convertidor RS-232/485</i> .....	20
4.2.3	<i>Computador tipo PC</i> .....	20
4.3	Monitoreo del banco de capacitores .....	21
4.3.1	<i>Microcontrolador</i> .....	23
4.3.2	<i>Sensor de temperatura</i> .....	24
4.3.3	<i>Sensores de corriente</i> .....	24
4.3.4	<i>Teclado</i> .....	25
4.3.4	<i>Sensor etapa activa</i> .....	26
4.3.5	<i>Display de Cristal Líquido (LCD)</i> .....	27
4.3.6	<i>Señal de alerta</i> .....	28
4.3.7	<i>Comunicación serial</i> .....	28
 <b>Capítulo 5: Descripción del software del sistema</b> .....		<b>29</b>
5.1	Software para la recepción de datos del Power Logic.....	29
5.2	Software del microcontrolador .....	30
5.2.1	<i>Módulo Principal</i> .....	30
5.2.2	<i>Time Base Module</i> .....	32
5.2.3	<i>Atención de teclado</i> .....	32
5.2.4	<i>Ajuste de hora y fecha</i> .....	35
5.2.5	<i>Lectura de datos</i> .....	37
5.2.6	<i>Revisión de la temperatura y corriente actual</i> .....	39
5.2.7	<i>Revisión de datos almacenados en la pila de datos</i> .....	40
5.2.8	<i>Transmisión de datos</i> .....	42
5.3	Software receptor de datos provenientes del microcontrolador.....	44
5.3.1	<i>Recepción de datos</i> .....	44
5.3.2	<i>Despliegue de datos</i> .....	46
5.3.3	<i>Alarmas</i> .....	47

<b>Capítulo 6: Análisis y resultados</b> .....	<b>50</b>
6.1 Explicación del diseño .....	50
6.1.1 Banco de capacitores.....	50
6.1.2 Monitoreo con el Power Logic.....	55
6.1.3 Monitoreo del banco de capacitores .....	55
6.1.3.1 Microcontrolador.....	55
6.1.3.2 Sensor de temperatura.....	55
6.1.3.3 Sensor de corriente .....	57
6.1.3.4 Teclado.....	61
6.1.3.5 Sensor etapa activa.....	61
6.1.3.6 Display de Cristal Líquido.....	63
6.1.3.7 Señal de alarma .....	63
6.1.3.8 Comunicación serial.....	64
6.2 Alcances y limitaciones.....	65
<b>Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>67</b>
7.1 Conclusiones .....	67
7.2 Recomendaciones .....	68
<b>7.3 Bibliografía</b> .....	<b>69</b>
<b>Apéndices</b> .....	<b>70</b>
Apéndice A.1: Glosario.....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Diagrama de bloques del sistema corrector del factor de potencia.....	4
<b>Figura 1.2</b>	Comportamiento del factor de potencia durante el año 2002.....	6
<b>Figura 1.3</b>	Multas pagadas por la empresa durante el año 2002 debido al bajo factor de potencia .....	6
<b>Figura 1.4</b>	Ubicación del Sistema regulador del factor de potencia dentro de la planta .....	7
<b>Figura 2</b>	Ubicación en la planta del sistema de monitoreo remoto.....	14
<b>Figura 4.1.1</b>	Vista frontal del regulador de energía reactiva Computer 12 .....	18
<b>Figura 4.1.2</b>	a) Etapa capacitiva de 15KVAR b) Etapa capacitiva de 60KVAR.....	19
<b>Figura 4.2</b>	Vista frontal del equipo Power Logic .....	20
<b>Figura 4.3</b>	Diagrama de bloques del sistema completo.....	22
<b>Figura 4.3.1</b>	Conexiones del microcontrolador MC68HC908GP32 con el sistema ..	23
<b>Figura 4.3.2</b>	Circuito remoto del sensor de temperatura de dos alambres. Sensor conectado a tierra .....	24
<b>Figura 4.3.3.1</b>	Circuito sensor de corriente alterna.....	24
<b>Figura 4.3.3.2</b>	Diagrama de conexiones del sistema de sensado de corrientes.....	25
<b>Figura 4.3.4</b>	Conexiones del teclado con el decodificador y de este con microcontrolador .....	26
<b>Figura 4.3.4.1</b>	Divisor de tensión para detectar la activación de etapas capacitivas	26
<b>Figura 4.3.4.2</b>	Conexiones del sistema de sensado de etapas activas .....	27
<b>Figura 4.3.5</b>	Conexiones del LCD con el microcontrolador .....	27
<b>Figura 4.3.6</b>	Circuito de alerta del sistema .....	28
<b>Figura 4.3.7</b>	Conexiones para lograr la transmisión serial full-duplex .....	28
<b>Figura 5.2.1</b>	Diagrama de flujo del módulo principal .....	31
<b>Figura 5.2.2</b>	Diagrama de flujo de la rutina de atención de interrupción del TBM ....	33
<b>Figura 5.2.3</b>	Procedimiento de atención a una entrada de teclado .....	35
<b>Figura 5.2.4.1</b>	Diagrama de flujo del algoritmo del proceso de ajuste de hora.....	36
<b>Figura 5.2.4.2</b>	Diagrama de flujo del algoritmo del proceso de ajuste de fecha .....	37

<b>Figura 5.2.5</b>	Diagrama de flujo del algoritmo del proceso lectura de variables .....	38
<b>Figura 5.2.6.1</b>	Diagrama de flujo del procedimiento que muestra la temperatura actual del sistema .....	39
<b>Figura 5.2.6.2</b>	Diagrama de flujo del procedimiento que muestra las corrientes actuales del sistema .....	40
<b>Figura 5.2.7.1</b>	Diagrama de flujo del procedimiento que muestra los datos de temperaturas almacenadas en la pila de datos.....	41
<b>Figura 5.2.7.2</b>	Diagrama de flujo del procedimiento que muestra los datos de corrientes almacenadas en la pila de datos .....	42
<b>Figura 5.2.8</b>	Diagrama de flujo del procedimiento de transmisión de datos .....	43
<b>Figura 5.3.1.1</b>	Diagrama de flujo del procedimiento de recepción de datos cuando el microcontrolador solicita la transmisión .....	45
<b>Figura 5.3.1.1</b>	Diagrama de flujo del procedimiento de recepción de datos cuando el PC solicita la transmisión .....	46
<b>Figura 5.3.2</b>	Diagrama de flujo del procedimiento que muestra los datos almacenados.....	47
<b>Figura 5.3.3.1</b>	Diagrama de flujo del procedimiento para el cálculo de alarmas por corriente .....	48
<b>Figura 5.3.3.2</b>	Diagrama de flujo del procedimiento para el cálculo de alarmas por temperatura.....	49
<b>Figura 6.1.1.1</b>	Capacitores en conexión delta en un sistema trifásico.....	50
<b>Figura 6.1.1.2</b>	Vista superior de los capacitores MERLIN GERIN, en donde se muestran sus terminales de conexión.....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Factor de potencia, tarifa total, multa y porcentaje que representa la multa del total cancelado .....	5
<b>Tabla 2</b> Temperaturas ambiente máximas donde opera el banco de capacitores.....	11
<b>Tabla 5.2.3</b> Identificación del proceso que realiza el microcontrolador mediante valor de la variable PROCESO.....	34
<b>Tabla 6.1.1.1</b> Corrientes de línea de los capacitores, para diferentes cargas de 45 KVAR cada una y FP medido. ....	52
<b>Tabla 6.1.1.2</b> Etapas requeridas de 45KVAR para compensar el FP a partir de los datos de consumo del año 2002 .....	54

## **Capítulo 1: Introducción**

### **1.1 Descripción de la empresa**

La empresa SARET METALMECÁNICA está ubicada en Río Segundo de Alajuela, 1.5 Km al este del aeropuerto Juan Santamaría, contiguo a la Zona Industrial Saret.

El Grupo SARET de Costa Rica trabaja desde el 10 de octubre de 1985, y Saret Metalmecánica como empresa independiente del grupo SARET, nació en julio del 2000, con cedula jurídica independiente, de la misma forma en la parte presupuestaria y financiera.

Es empresa líder en la construcción y montaje de estructuras de acero, entre las que se cuentan tanques, silos, recipientes a presión, tolvas y tuberías a presión. Sus trabajos finales se caracterizan por ser de alta calidad, lo que le ha valido gran reconocimiento regional, contribuyendo grandemente con el desarrollo del país. Posee la planta más grande de la región y con la mayor capacidad productiva del sector metalmecánico nacional, lo que además posibilita el desarrollo de sus proyectos en el menor tiempo posible.

El recurso humano de la empresa varía según la cantidad de trabajo por realizar, recurriendo a la contratación de personal de planta por períodos definidos, por lo que la cantidad de empleados está entre las 120 y 400 personas. Dentro del personal, se cuenta con ingenieros en Producción Industrial, Mantenimiento Industrial, Metalurgia, Mecánicos y Químicos.

El Gerente General de SARET METALMECÁNICA es el Ing. Ithel Navarro Barahona.

El proyecto pertenece al Departamento de Mantenimiento, por ser un proyecto de mantenimiento y prevención del banco de capacitores.

El jefe del Departamento de Mantenimiento es el Ing. Danny Chávez, que además es jefe de proyectos de la empresa. Se cuenta también con tres electricistas y dos personas para atender asuntos varios.

## **1.2 Definición del problema y su importancia**

### **1.2.1 Reducción del Factor de Potencia**

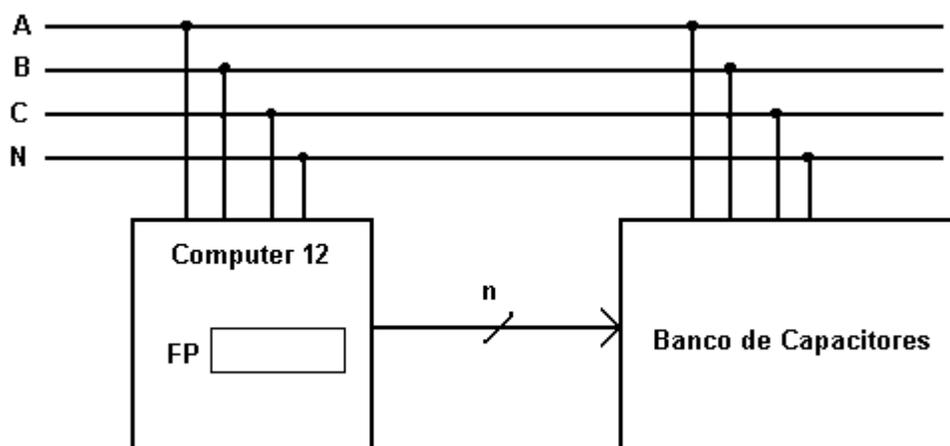
SARET METALMECÁNICA se dedica a la construcción y montaje de estructuras de acero. Todo esto lo lleva a cabo en su única planta, en la cual se procesa el material de principio a fin, es decir, se toman las láminas de acero, se cortan, moldean, unen mediante soldadura, ensamblan y pintan.

La alimentación de la planta es trifásica, de 480 V de línea. Para llevar a cabo todos los procesos son necesarias una serie de máquinas eléctricas, como 97 máquinas para soldar, una mesa de corte, una roladora con un motor de 30 HP, tres compresores de 50 HP cada uno, una turbina de 20 HP, 15 ventiladores de  $\frac{3}{4}$  de HP cada uno, entre otras. Ocasionalmente se recurre a la contratación de personal y equipo adicional, lo que significa gran cantidad de equipo trabajando simultáneamente. La demanda energética de la planta es alta.

Gran parte del consumo eléctrico es generado por máquinas de carácter inductivo, lo que lleva al factor de potencia a valores por debajo del permitido por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), que actualmente es de 0.95.

En 1997, la empresa Schneider Electric de Centroamérica Ltda, instaló un equipo para corregir el factor de potencia. Está basado en el Computer 12 de la marca Circutor, especialmente desarrollado para el control de bancos de capacitores automáticos. En la figura 1.1 se aprecia el diagrama general del sistema.

El Computer 12 lee el factor de potencia, y en base a la lectura activa las etapas necesarias para la compensación. Antes de la puesta en marcha, al equipo se le indica el número de etapas conectadas, el factor K (indicación de la potencia reactiva de los capacitores) y la conexión de capacitores (1.1.1.1 ó 1.2.2.2).



**Figura 1.1** Diagrama de bloques del sistema corrector del factor de potencia

Según los ingenieros de la empresa, en los dos últimos años la compensación del sistema ha sido insuficiente. Revisando los últimos recibos de energía eléctrica, es posible apreciar las altas multas que impuestas por el ICE. La tabla 1.1 muestra datos acerca del factor de potencia, el cobro total, la multa, y el dato porcentual que significa la multa para la empresa, esto para el año 2002.

La figura 1.2 muestra un gráfico del comportamiento del factor de potencia durante el año 2002, mientras que la figura 1.3 muestra gráficamente el costo que ha implicado para la empresa el tener un bajo factor de potencia, debido a las multas impuestas por el ICE.

Los datos presentados muestran el problema que tiene la empresa, porque ajustando el sistema actual para lograr una adecuada corrección del factor de potencia, se estaría ahorrando una gran cantidad de dinero. Por ejemplo, para el año 2002, solo en multas se pagó un total de  $\text{¢}2\ 514\ 774$ , lo que significa un promedio de un 5,05 % del total del recibo eléctrico. Además se ve que el ritmo de trabajo de SARET METALMECÁNICA no es constante a lo largo del año.

Como resultado de lo anterior, existen grandes variantes de un mes a otro, como en el caso del mes 10 y 11, donde el factor de potencia promedió 0.75 y 0.88, y las multas pasaron de ¢559 992 a ¢57 859 respectivamente. Esto obliga a mantener un banco de capacitores dinámico, donde la compensación esté en función de la demanda.

**Tabla 1.1** Factor de potencia, tarifa total, multa y porcentaje que representa la multa del total cancelado<sup>1</sup>

MES	%F.P.	TOTAL CANCELADO	MULTA	% MULTA
1	76	2 402 921	267 384,90	11,12
2	79	3 917 136	317 817,10	8,11
3	83	3 537 142	116 807,00	3,30
4	84	3 920 697	160 974,80	4,10
5	85	4 054 148	131 000,70	3,23
6	91	3 604 088	0,00	0,00
7	86	3 904 437	103 371,30	2,64
8	78	4 908 124	405 409,25	8,25
9	82	4 981 506	256 116,80	5,14
10	75	5 669 044	559 992,35	9,87
11	88	4 527 039	57 859,10	1,27
12	-----	4 044 192	138 041,10	3,41
<b>TOTAL</b>	-----	49 470 474	2 514 774,40	-----
<b>PROMEDIO</b>	75,8	4 122 539	209 564,53	5,04

<sup>1</sup> Datos tomados de los recibos eléctricos cancelados por la compañía durante el año 2002

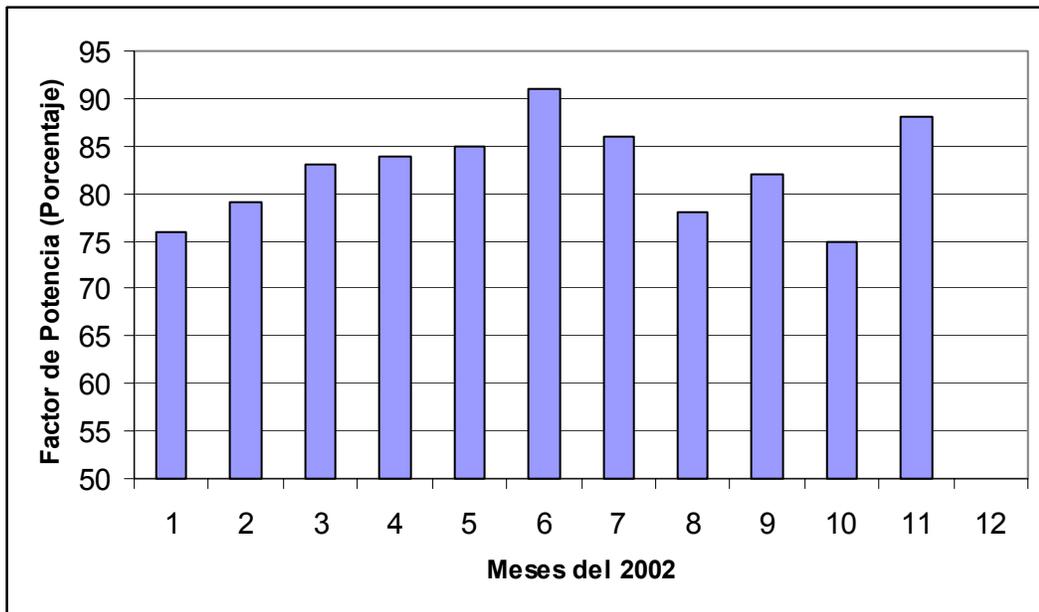


Figura 1.2 Comportamiento del factor de potencia durante el año 2002

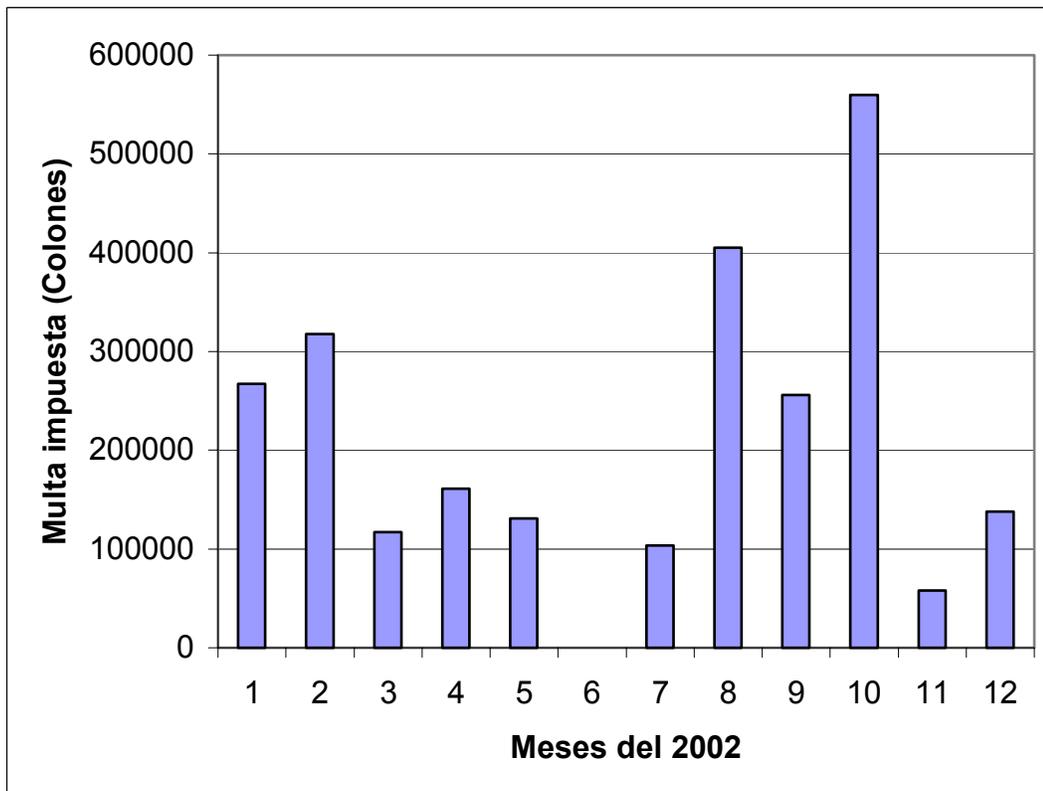
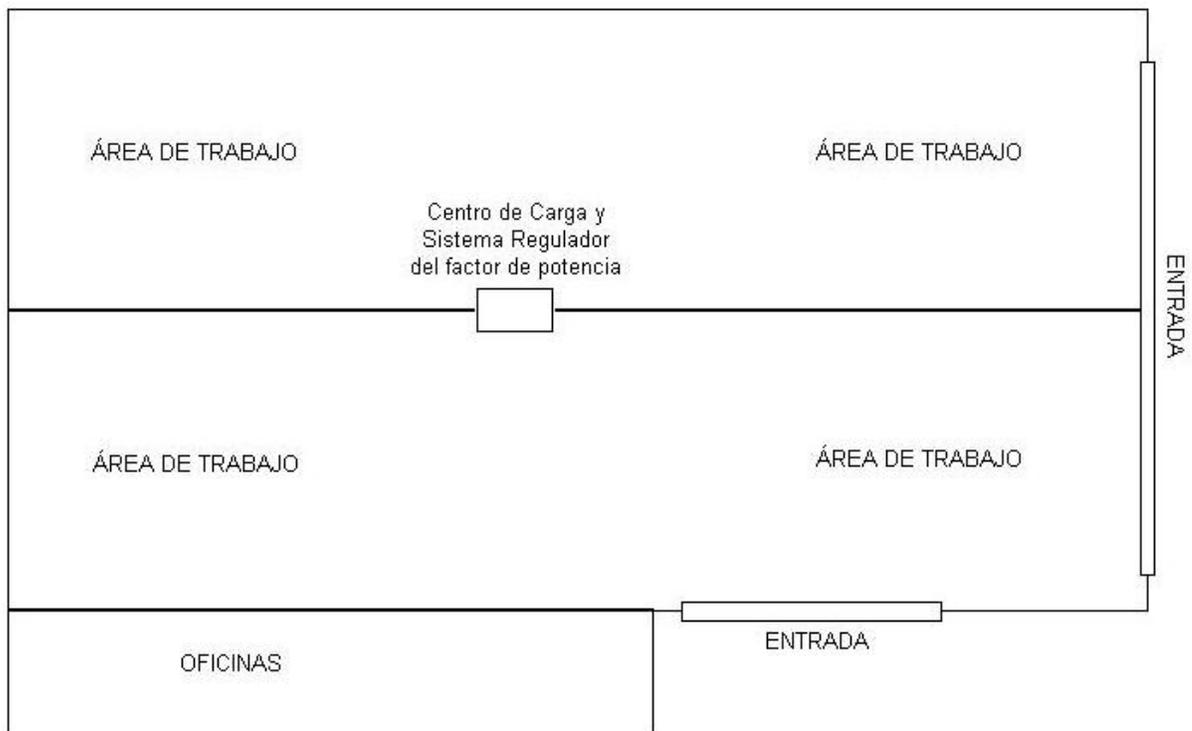


Figura 1.3 Multas pagadas por la empresa durante el año 2002 debido al bajo factor de potencia

### 1.2.2 Monitoreo Remoto

Otro problema detectado en la empresa se refiere al monitoreo del factor de potencia. El sistema actual tiene un panel que cuenta con un display de siete segmentos que reporta mediciones instantáneas. La ubicación del sistema regulador es poco conveniente para realizar un monitoreo constante, esto porque el sistema se encuentra en el centro de la planta, rodeado de maquinaria, materiales, y en épocas de gran cantidad de trabajo el acceso al sistema es difícil. La figura 1.4 muestra en forma esquemática la ubicación del sistema regulador.



**Figura 1.4** Ubicación del Sistema regulador del factor de potencia dentro de la planta

Lo anterior hace difícil de conocer el valor instantáneo del factor de potencia, y saber así por ejemplo, si el sistema está funcionando correctamente, manteniendo el valor del factor de potencia en un valor superior a 0.95, además que no se guarda ningún registro.

La empresa cuenta con un equipo de medición llamado Power Logic, fabricado por la empresa SquareD. Este se encarga de medir factores relacionados con la alimentación eléctrica de la planta, como voltajes, corrientes, factor de potencia, distorsión armónica, energía, entre otros. Entonces surge la necesidad de monitorear los datos que brinda el equipo Power Logic desde un punto que sea más accesible al personal que pueda interpretar esos datos, además sería de utilidad tener un registro histórico acerca del comportamiento del factor de potencia y que se pueda acceder en cualquier momento.

Otro aspecto a monitorear, y que no realiza el equipo de medición Power Logic, es el estado del banco de capacitores. La importancia de esto, es contar con un sistema de alerta, el cual, en caso de que algo esté mal con el banco de capacitores, avise al personal encargado de darle mantenimiento. También sería conveniente llevar un registro histórico de los parámetros monitoreados.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Eliminar el pago de altas multas a la compañía eléctrica por concepto de recargo por bajo factor de potencia, mediante la actualización del sistema existente de banco de capacitores, e implementar un sistema de monitoreo, captura de datos y despliegue del historial del factor de potencia y estado del banco de capacitores.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Estudiar y conocer a fondo el funcionamiento del equipo de medición Power Logic.
2. Estudiar y conocer a fondo el funcionamiento del equipo corrector del factor de potencia.
3. Diseñar la actualización necesaria que necesita el equipo con el que se cuenta actualmente para alcanzar los valores de factores de potencia arriba de 0.95.
4. Implementar el diseño realizado y verificar su correcto funcionamiento.
5. Determinar la mejor manera de extraer del Power Logic la información sobre el factor de potencia, y decidir como se transmitirá.
6. Diseñar e implementar el hardware necesario para realizar la transmisión y recepción de datos.
7. Implementar el software encargado de leer, guardar y desplegar datos relacionados al factor de potencia.
8. Determinar los parámetros a sensar en el banco de capacitores que sean un reflejo de su adecuado o inadecuado funcionamiento, y además establecer los sensores a utilizar.
9. Instalar el hardware de los sensores en el gabinete del banco de capacitores.
10. Desarrollar un sistema encargado de monitorear y transmitir datos acerca del funcionamiento del banco de capacitores.
11. Desarrollar el software que en el computador, capturará datos, los almacenará y desplegará a petición del usuario, para conocer el estado de funcionamiento del banco de capacitores.

## **Capítulo 2: Antecedentes**

### **2.1 Estudio del problema a resolver**

El proyecto se divide en tres grandes etapas:

- Actualización del banco de capacitores
- Monitoreo remoto de los datos brindados por el Power Logic
- Monitoreo remoto del estado de funcionamiento del banco de capacitores

#### **2.1.1 Actualización del banco de capacitores**

Como se trata de llevar a cabo la actualización de un sistema existente, es importante citar los aspectos más relevantes de este equipo, que es el punto de partida.

El sistema es manejado por un equipo denominado Computer 12, fabricado por la empresa Circutor. Este es un regulador automático de energía reactiva, con la posibilidad de conectar hasta 12 etapas capacitivas. Mediante displays de siete segmentos es posible visualizar el dato instantáneo del factor de potencia, así como del número de etapas activas. El factor de potencia deseado es posible ajustarlo en el panel, mediante potenciómetro. La activación de etapas se hace mediante relays ubicados en la parte posterior, que a su vez activan los contactores trifásicos conectados en serie con los capacitores.

Se tienen 5 etapas trifásicas de 45 KVAR cada una, por lo que el sistema puede regular hasta 225 KVAR. Cada etapa está compuesta por tres capacitores de 15 KVAR, cuya conexión interna es en delta, de manera que cada vez que se introduce una etapa, se hace de manera balanceada.

El sistema está ubicado a la par del centro de carga principal de la planta, y es desconectado totalmente solo por el breaker principal.

### 2.1.2 Monitoreo remoto de los datos brindados por el Power Logic

El Power Logic está equipado con un puerto de transmisión serial RS-485. La distancia máxima de transmisión en este formato es de 3000m. Para lograr compatibilidad con un computador tipo PC, se deben convertir los datos a formato RS-232, por lo que es necesario un convertidor de formatos. SquareD desarrolla un software denominado *System Manager*, que está diseñado para comunicarse con el Power Logic, de manera que se pueda obtener la información de todos los parámetros que sensa y guardarla para posterior análisis. También permite la programación del equipo mediante el software remoto.

### 2.1.3 Monitoreo remoto del estado de funcionamiento del banco de capacitores

Los capacitores pueden llegar a dañarse debido a la exposición a elevadas temperaturas, lo que provoca que pierdan capacidad de compensación reactiva. La pérdida de capacidad se manifiesta en la disminución de la corriente de cada capacitor. El sistema sensorá las corrientes de línea de cada etapa capacitiva, así como la temperatura en el interior del gabinete, según los datos de la tabla 2.

**Tabla 2** Temperaturas ambiente máximas donde opera el banco de capacitores

Potencia por etapa (KVAR)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura máxima promedio por periodos de		Temperatura Mínima (°C)
		24 Horas (°C)	1 Año (°C)	
Hasta 85	55	45	35	-25
86 a 100	50	40	30	

Con el microcontrolador MC68HC908GP32 de Motorola se leen los datos de corriente y temperatura, se despliegan mediante LCD a petición del usuario utilizando un teclado de 16 teclas. Los datos se transmiten mediante puerto serial hasta un computador tipo PC, en el cual se lleva un registro de los parámetros, para poder analizarlos en cualquier momento.

## **2.2 Requerimientos de la empresa**

El proyecto nació por la necesidad de no desperdiciar dinero mediante el pago de multas por bajo factor de potencia, por lo que el primer requerimiento de la empresa fue la actualización del banco de capacitores de manera eficiente, maximizando el uso de los elementos que ya estaban instalados.

En cuanto a la transmisión de la información del factor de potencia, se exigió facilidad en cuanto a la consulta de la información, de manera que además de encontrarse en un lugar accesible fuera fácil de usar, mostrando de la manera más completa y entendible la información.

Por último, como resultado de la investigación se encontraron 11 de 15 capacitores que definitivamente estaban dañados, y los restantes 4 en condiciones aceptables aunque no óptimas. Este problema estuvo presente por un tiempo que es difícil de estimar, sin embargo en los dos últimos años se empezaron a registrar problemas de recargo por factor de potencia. Para evitar una situación en la cual los elementos del banco de condensadores funcionen ineficientemente se pidió implementar un sistema que detectara fallas, de manera que el personal respectivo fuera alertado, y encontrará en el mismo sistema la fuente de la falla, para que así sea corregida de manera pronta, antes de que los efectos de esta se hagan sentir notablemente.

## **2.3 Solución propuesta**

Se contó con una sugerencia de solución por parte del Ingeniero Eduardo Ramírez, la cual fue enriquecida durante el desarrollo del proyecto.

### **2.3.1 Actualización del banco de capacitores**

A partir del estudio del sistema existente se determinó la manera más óptima de alcanzar la compensación reactiva necesaria para evitar las multas por bajo factor de potencia. Debido a que se comprobó la existencia de capacitores dañados, se recomendó la sustitución de los mismos por otros nuevos. Por tratarse de una sustitución de elementos no hay necesidad de realizar modificaciones en el gabinete, ni en la configuración del Computer 12.

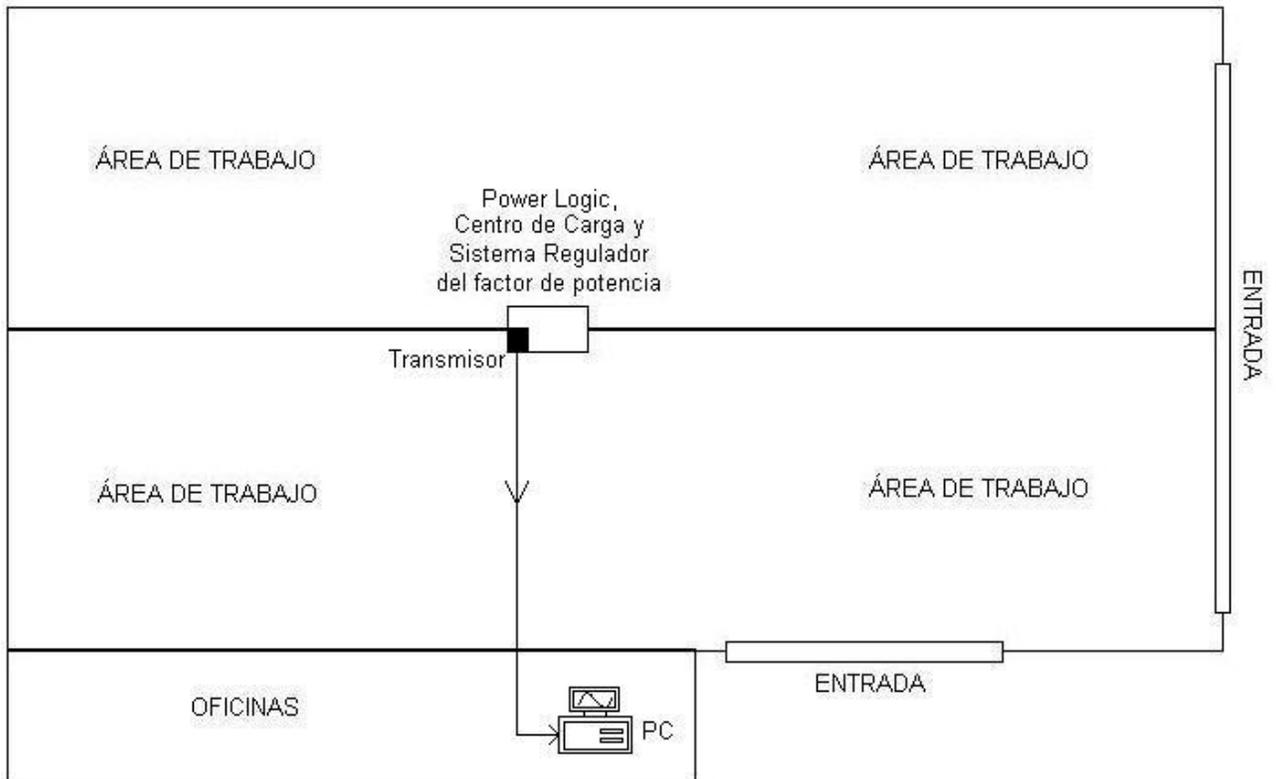
La comprobación del funcionamiento correcto del banco se realizó a partir de la observación directa de la lectura del Computer 12, sin embargo, como esta es para valores instantáneos, las pruebas más eficaces consistirán en llevar un registro histórico del comportamiento del factor de potencia mediante el Power Logic una vez instalado el monitoreo. También se revisaron los recibos eléctricos emitidos por la compañía eléctrica.

### **2.3.2 Monitoreo Remoto de los datos brindados por el Power Logic**

Este consiste en tener los datos que brinda el Power Logic en un lugar de fácil acceso a los ingenieros de la empresa. Además se deben guardar los datos que este brinda en función del tiempo. Se implementó mediante un computador, el cual está leyendo y guardando datos a disco, y que su posterior acceso presenta los datos de manera agradable, por ejemplo en forma de gráficas. La ubicación propuesta se muestra en forma esquemática en la figura 2.

Debido a que la forma en que se transmiten los datos por parte del Power Logic no es conocida, se recomendó la utilización del *System Manager Software* (SMS-121) fabricado por SquareD, diseñado específicamente para este fin. Este software presenta las facilidades requeridas, como la captura de datos, almacenamiento en disco y visualización de datos gráficamente.

Como el Power Logic transmite en formato RS-485, es necesario instalar un dispositivo que transforme de formato RS-485 a formato RS-232.



**Figura 2** Ubicación en la planta del sistema de monitoreo remoto

### **2.3.3 Monitoreo remoto del estado de funcionamiento del banco de capacitores**

El estado de funcionamiento de los capacitores se determina a partir del valor de las corrientes de línea de las etapas y partir de la temperatura en el gabinete.

Se instaló un sensor de corriente para cada línea de las etapas capacitivas, y un sensor de temperatura en el interior del gabinete. El sistema es manejado por un microcontrolador que controla la lectura de datos, su almacenamiento temporal y su transmisión serial hacia un computador tipo PC.

De encontrar una situación irregular el sistema avisará mediante un indicador visual, además de indicar en el computador que existe una falla. El detalle de la falla podrá accederse en dos lugares y mediante dos maneras.

En el gabinete, mediante un teclado, se logrará visualizar la falla concreta. Por otra parte, la falla también se reportará al computador, en el cual también podrá ser consultada, además de que quedará registrada.

Para este caso fue necesario desarrollar dos programas en software. Por un lado está el software en lenguaje ensamblador que corre en el microcontrolador. También se desarrolló un software que corre en el computador tipo PC, desarrollado en Visual Basic. El microcontrolador envía los datos al PC mediante puerto serial de 9 pines, el cual interpreta, almacena y muestra los datos.

### **Capítulo 3: Procedimiento metodológico**

En cuanto al banco de capacitores, se empezó a trabajar sobre la base de un sistema existente, por lo que en primera instancia se revisó su funcionamiento, para determinar en qué estaba fallando y así determinar la manera de aplicar la corrección del factor de potencia.

Una vez determinada la deficiencia del sistema, se emitió la recomendación de compra de nuevos capacitores. Realizada la compra se instalaron los reemplazos, y se verificó el correcto funcionamiento analizando las lecturas instantáneas del Computer 12, las cuales fueron satisfactorias. Los resultados esperan verse en el recibo eléctrico de la compañía, donde los recargos por bajo factor de potencia deben desaparecer o bien disminuir grandemente.

En cuanto al monitoreo remoto de los parámetros eléctricos de la red, se estudió el Power Logic para determinar la mejor manera de extraer de él la información que recolecta de las líneas de alimentación de la planta. El estudio se realizó a partir del manual del aparato. Se encontró que el fabricante (SquareD) desarrolla un software especialmente diseñado para la comunicación con el Power Logic, mediante el cual se puede acceder a la información y programarlo. Se plantea esta como la única opción de comunicación remota. A partir de esta información se recomendó la compra del paquete denominado *System Managner Software (SMS-121)*, la cual se realizó a la empresa Schneider de Costa Rica. Se adquirió el convertidor de formatos RS-232/485, con cual fue posible comunicar el Power Logic con el SMS-121. Una vez solucionados los problemas a nivel del hardware, se coordinó el recibir un curso estilo seminario impartido por la empresa Schneider en el cual se explica el uso del sistema y la configuración que este debe recibir para llevar a cabo un funcionamiento óptimo.

Se estudió el banco de capacitores para conocer qué parámetros son un reflejo del buen funcionamiento del banco, y en este mismo proceso se establecieron los sensores idóneos a utilizar.

En conjunto se trabajó en la escogencia del microcontrolador, para ir determinando así las facilidades de conexión entre componentes. Finalizado este proceso, se procedió a establecer con exactitud la conexión pin a pin, documentándola debidamente.

Respecto a la programación del microcontrolador, esta se hace en lenguaje ensamblador. Para conocer en detalle las facilidades que brinda este chip se cursó un entrenamiento en línea que ofrece Motorola en su página web de semiconductores, acerca de la familia de módulos CPU 68HC08 en aplicaciones típicas. Se desarrolló el software del microcontrolador, haciendo las pruebas respectivas para cada módulo terminado.

El software desarrollado para correr en la PC se desarrolló en Visual Basic. Este se comunica con el microcontrolador mediante puerto serial, a través del cual se transmiten los datos. Esos datos son guardados a disco en una base de datos de Microsoft Access, y pueden ser consultados en cualquier momento en función del tiempo. Además, de presentarse una alarma (por baja corriente en alguna línea de las etapas de capacitores o por alta temperatura en el interior del gabinete), esta también se reporta en el PC.

## Capítulo 4: Descripción del hardware utilizado

A continuación se hace una descripción del hardware utilizado en el proyecto, dividiéndolo en las tres etapas que se han discutido con anterioridad.

### 4.1 Banco de capacitores

Se alimenta del sistema trifásico, 480 V de línea, en el centro de carga de la planta, siendo desconectado únicamente por el brecker principal. El equipo está contenido en un gabinete NEMA1. El banco es controlado por el Computer 12. El diagrama eléctrico del sistema se puede ver en el anexo B.1.

#### 4.1.1 Computer 12

Regulador de energía reactiva. Se alimenta con 110V y realiza la lectura de los voltajes y corrientes de fase. Tiene 12 relays que activan contactores situados en serie con las etapas capacitivas. Despliega resultados mediante displays de siete segmentos, donde se puede visualizar el factor de potencia instantáneo. En la figura 4.1.1 se aprecia la vista frontal del Computer 12.

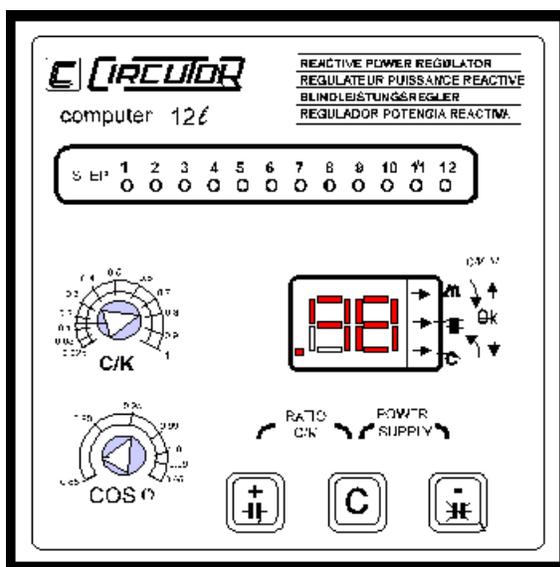
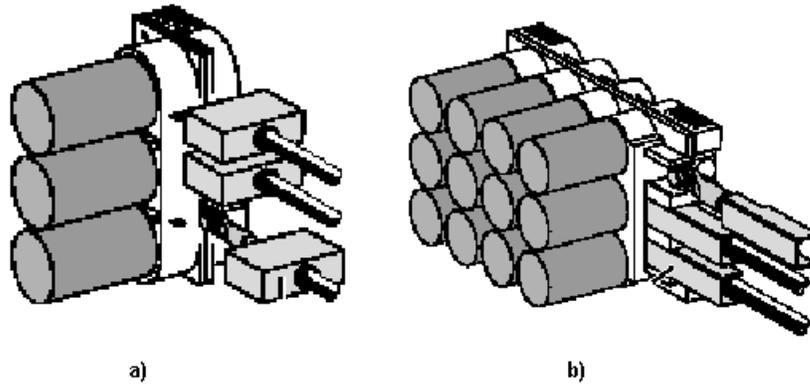


Figura 4.1.1 Vista frontal del regulador de energía reactiva Computer 12

### **4.1.2 Capacitores de 15KVAR**

Las etapas capacitivas son de 45KVAR, formadas a su vez por tres grupos de capacitores de 15KVAR. Los capacitores son trifásicos, conectados internamente en delta. En la figura 4.1.2 a) se visualiza una etapa de 15KVAR, mientras que en la figura 4.1.2 b) se logra ver un grupo de 4 etapas de 15KVAR, haciendo una etapa total de 60KVAR.



**Figura 4.1.2 a) Etapa capacitiva de 15KVAR b) Etapa capacitiva de 60KVAR**

## **4.2 Monitoreo de los datos del Power Logic**

Consiste en una conexión vía cable UTP CAT5, para transmisión serial entre el Power Logic y un computador tipo PC.

### **4.2.1 Power Logic**

Dispositivo multifunción, con instrumentación digital y adquisición de datos. Se conecta a la tensión trifásica de 480 V de línea, con transformadores de corriente en cada una. Entre otras, mide voltajes, corrientes, factor de potencia, distorsión armónica y energía. Mediante display de siete segmentos es posible acceder a todos los valores de parámetros. Equipado con puerto de comunicación serial RS-485 y un puerto óptico. En la figura 4.2 se tienen una vista frontal del Power Logic.

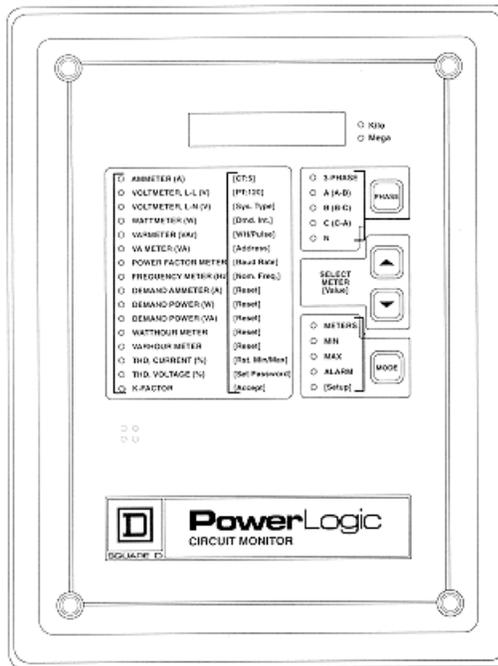


Figura 4.2 Vista frontal del equipo Power Logic

#### 4.2.2 Convertidor RS-232/485

Convertidor entre interfaces RS-232 a RS-485 o viceversa, que opera de la misma manera que un modem. Permite a un dispositivo RS-232 transmitir a distancias mucho más largas que las que normalmente maneja (hasta 6.4Km a 1200bps). Se utiliza para conectar el PC con el Power Logic, ya que este último transmite únicamente en formato RS-485, y la PC trabaja en RS-232, y la distancia entre dispositivos es de aproximadamente 60 metros.

#### 4.2.3 Computador tipo PC

El fabricante recomienda un Pentium III de 733MHz, con 256MB de RAM y puerto de comunicación serial RS-232. Se adquirió un computador Pentium IV de 1.8 GHz, con 256MB de RAM y puerto de comunicación serial.

### **4.3 Monitoreo del banco de capacitores**

El monitoreo del banco de capacitores consiste en el sensado de las corrientes de línea de las etapas de compensación, además del seguimiento que se le da a la temperatura del gabinete. Todo está controlado por un microcontrolador, que adicionalmente se comunica con un computador tipo PC, mediante transmisión serial RS-485, por lo que se necesitan convertidores de formato a RS-232. La figura 4.3 muestra el diagrama de bloques del sistema completo.

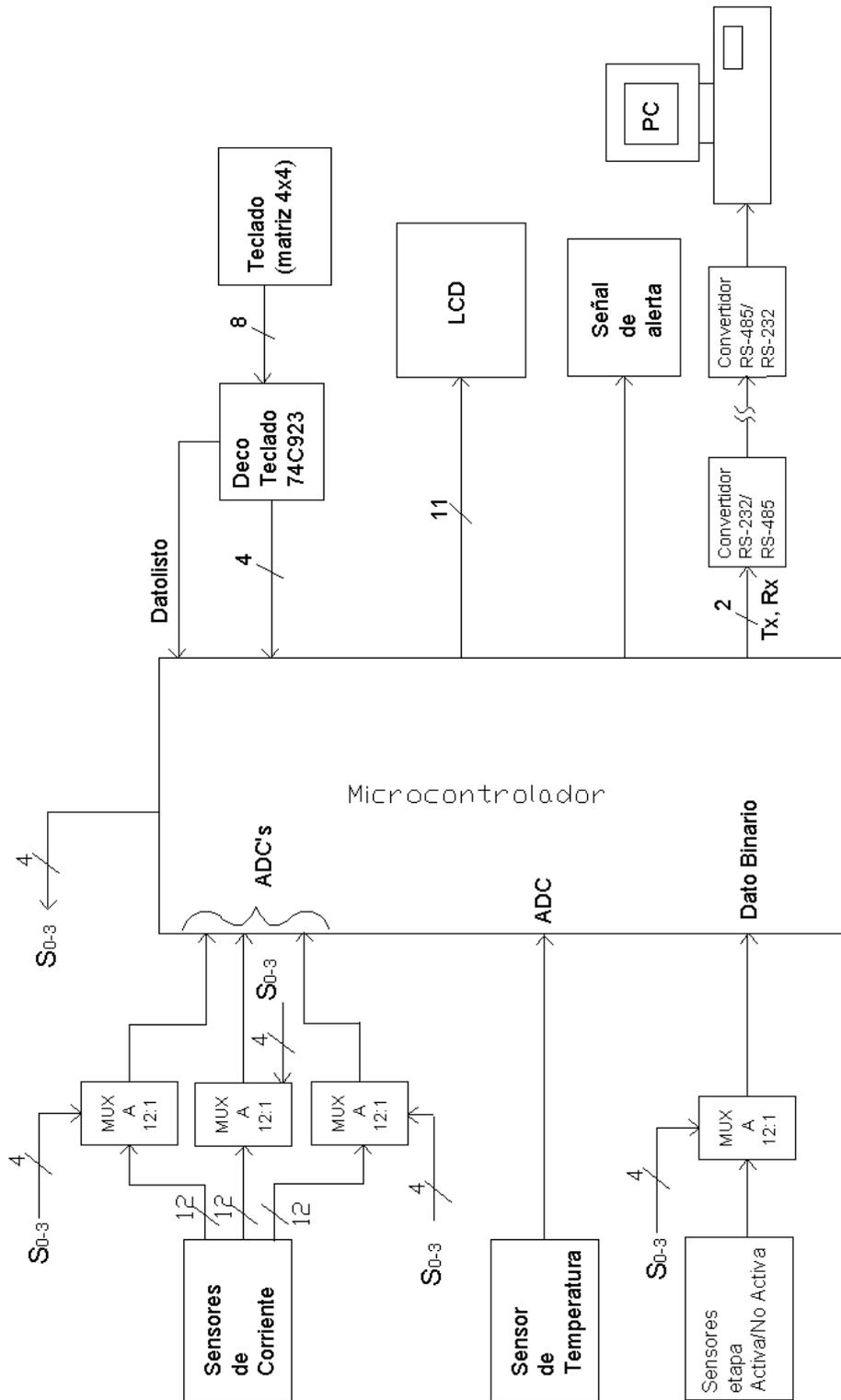


Figura 4.3 Diagrama de bloques del sistema completo

### 4.3.1 Microcontrolador

Es el MC68HC908GP32 de Motorola. Su CPU pertenece a la familia 68HC08. Tiene un bus interno de 8MHZ, 32Kbytes de memoria FLASH para almacenar datos permanentes (como el programa), 512 bytes de RAM, interfase de comunicación serie, ocho canales para ADC de resolución de 8 bits, 26 pines de entrada salida de funciones compartidas, entre otras. En la figura 4.3.1 se muestran las conexiones pin a pin del microcontrolador con el entorno, presentando además los números de pin de los otros dispositivos a los que debe conectarse el microcontrolador.

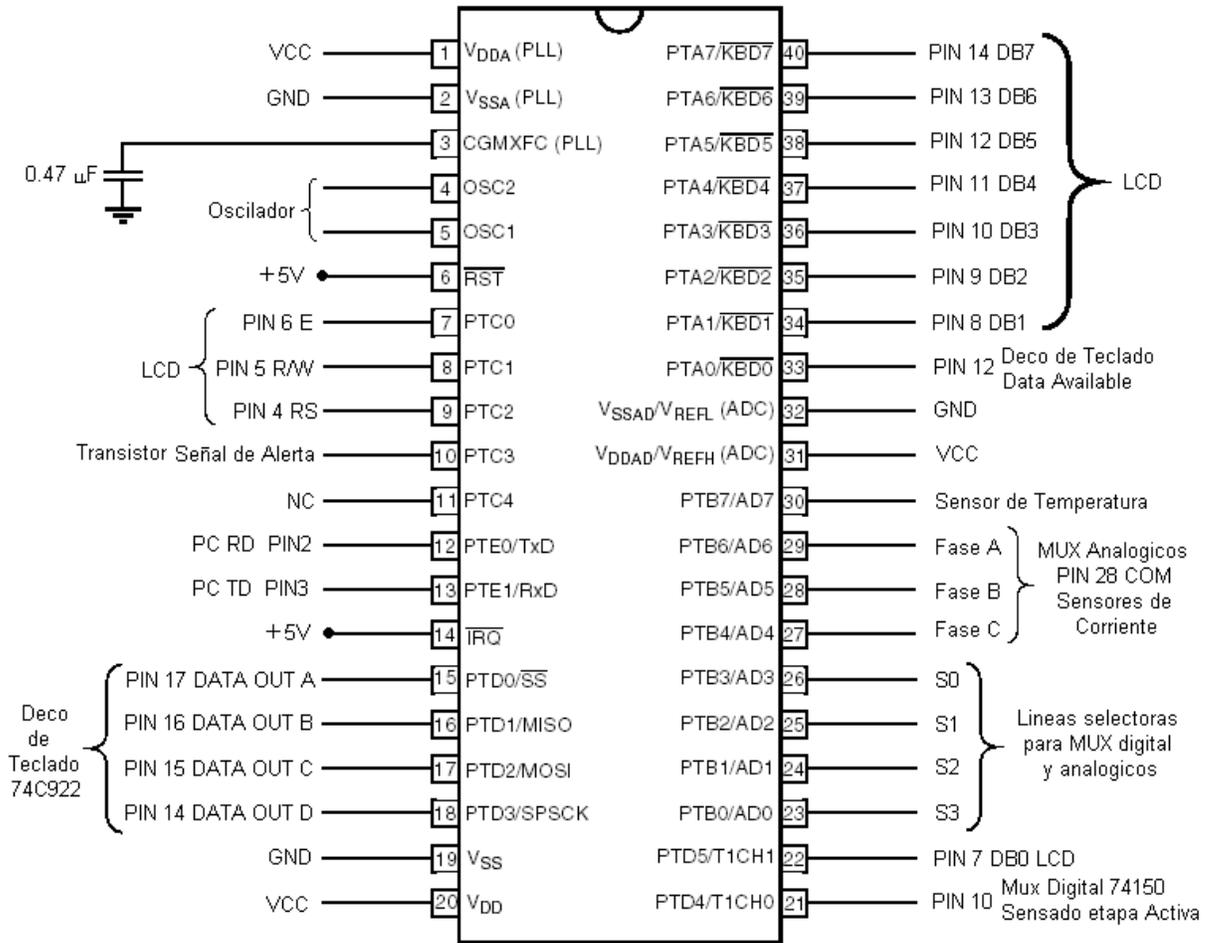
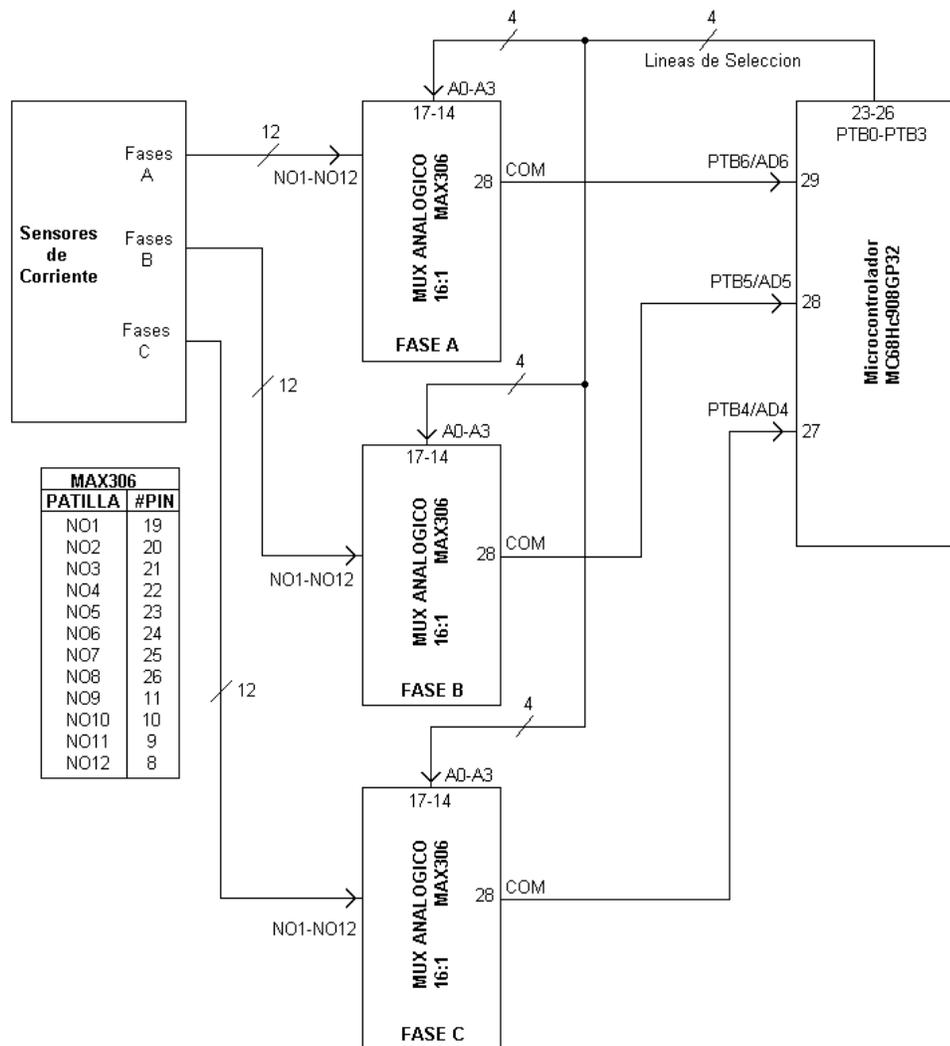


Figura 4.3.1 Conexiones del microcontrolador MC68HC908GP32 con el sistema





**Figura 4.3.3.2** Diagrama de conexiones del sistema de sensado de corrientes

### 4.3.4 Teclado

Se utiliza uno estándar de 16 teclas, ordenadas en una matriz de 4x4. Para la decodificación se utiliza el decodificador de teclado 74C922. Las conexiones se pueden ver en la figura 4.3.4.

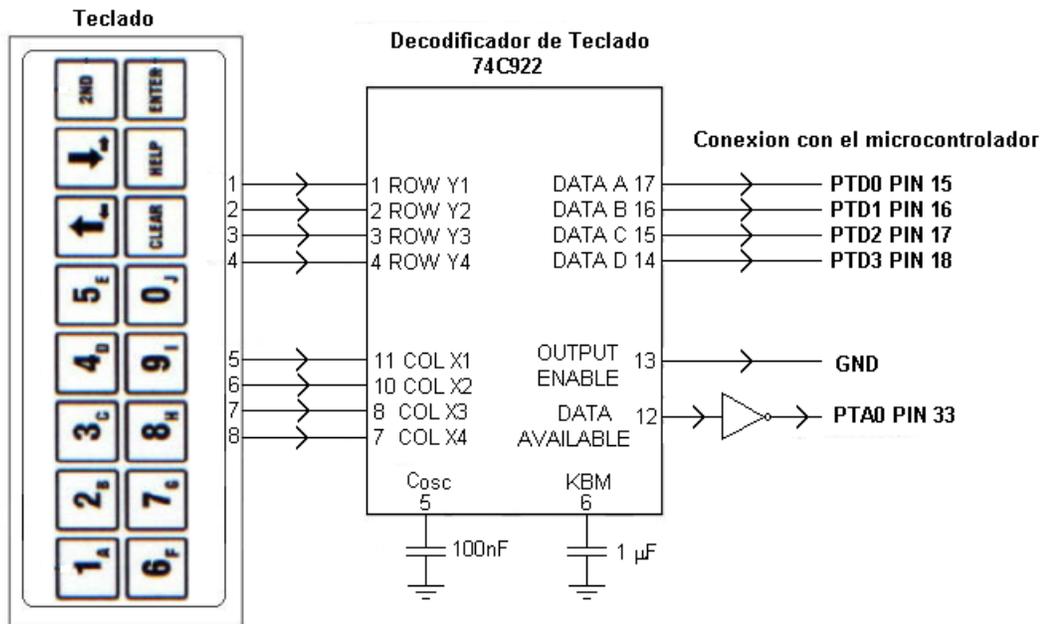


Figura 4.3.4 Conexiones del teclado con el decodificador y de este con microcontrolador

#### 4.3.4 Sensor etapa activa

Para saber si la etapa a la cual se le están midiendo las corrientes de línea han sido activadas o no por el Computer 12, se implementa un sensor de etapa activa, que consiste en un divisor de tensión que detecta cuando un relay está energizado, como el que se muestra en la figura 4.3.4.1, y en la 4.3.4.2 se muestra la conexión con el mux y el microcontrolador.

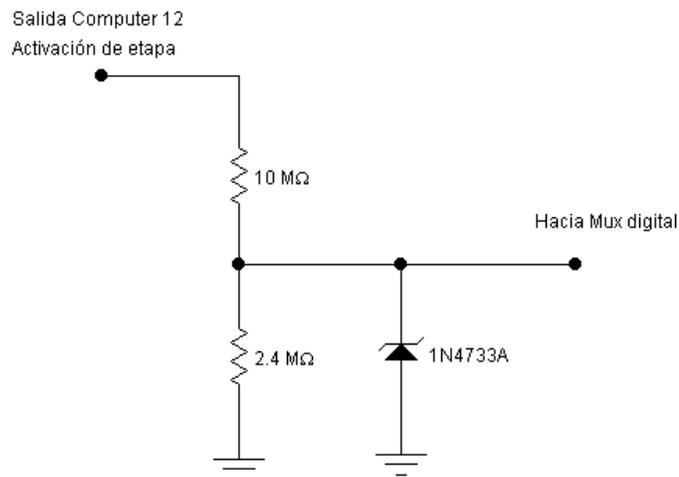


Figura 4.3.4.1 Divisor de tensión para detectar la activación de etapas capacitivas

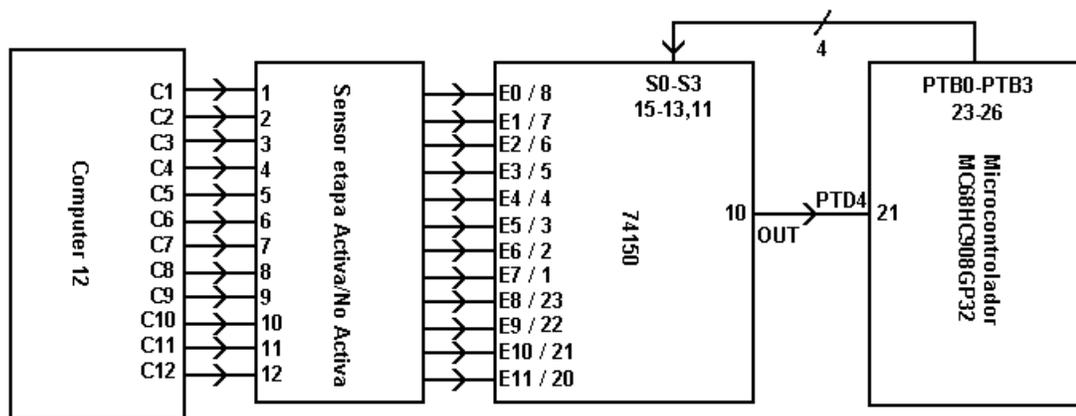


Figura 4.3.4.2 Conexiones del sistema de sensado de etapas activas

### 4.3.5 Display de Cristal Líquido (LCD)

El dispositivo utilizado es el DMC16230 de Optrex Corporation, de 16 caracteres por dos líneas, presentando un tamaño bastante agradable a la vista. El contraste del display puede controlarse mediante potenciómetro, para ajustarlo según el ángulo de visión que se tenga. Sus conexiones se muestran en la figura 4.3.5.

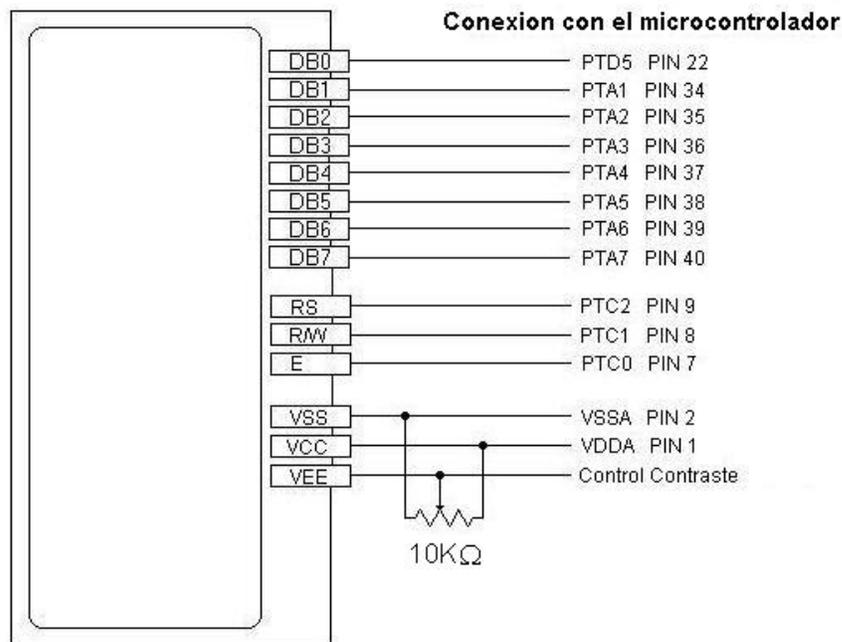


Figura 4.3.5 Conexiones del LCD con el microcontrolador

### 4.3.6 Señal de alerta

Una señal luminosa se encargará de avisar sobre la existencia de una anomalía, y como está disponible un voltaje AC de 120V, se utilizará un bombillo 120V de baja potencia activado por relay. La figura 4.3.6 muestra el circuito de alarma.

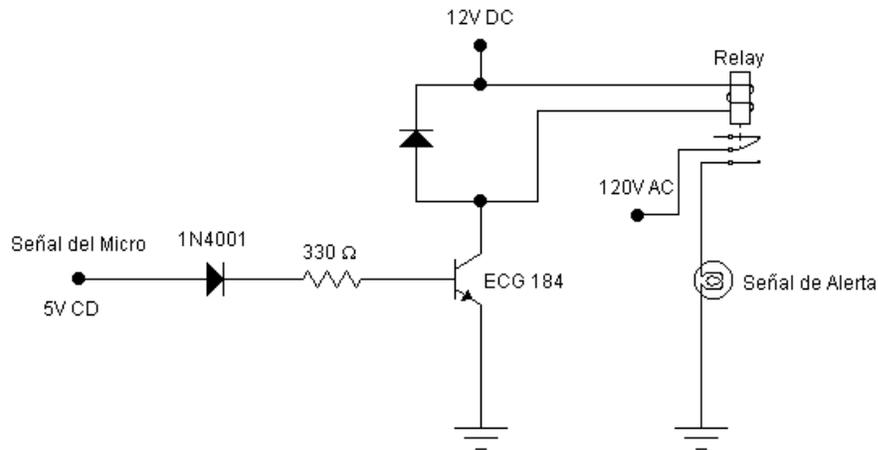


Figura 4.3.6 Circuito de alerta del sistema

### 4.3.7 Comunicación serial

Debido a las facilidades que presenta el microcontrolador, se utilizará transmisión serial en formato RS-232. Se utilizan conectores seriales de 9 pines para conectar el cable con el microcontrolador y para hacer la conexión con el PC. La distancia del cable es de 60 metros, y a una velocidad de transmisión de 300bps la comunicación no presenta inconvenientes. Ver figura 4.3.7.

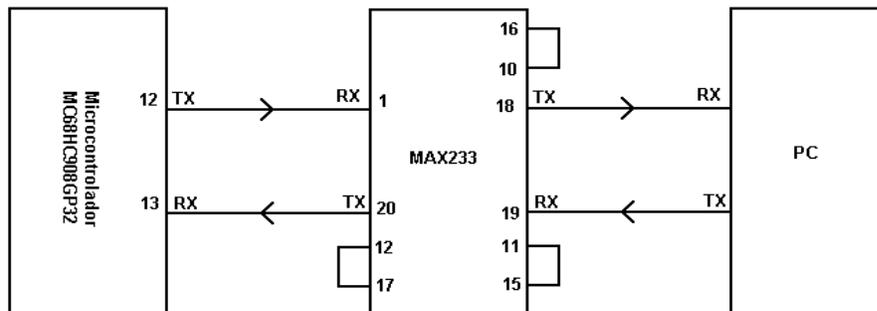


Figura 4.3.7 Conexiones para lograr la transmisión serial full-duplex

## **Capítulo 5: Descripción del software del sistema**

Para la concreción del proyecto, se necesitan implementar tres programas de software. Para la comunicación entre el Power Logic y el computador, es necesario un software que en el PC reciba y maneje los datos que son enviados por el aparato de medición. Todas las rutinas que debe seguir el microcontrolador están programadas en su memoria FLASH, lo que requirió el desarrollo del software en lenguaje ensamblador. Por último, la información que genere el microcontrolador será enviada a un computador, para lo cual también fue necesario el desarrollo de un software de recepción y administración de datos. A continuación se da una descripción de los programas implementados para el adecuado funcionamiento del sistema.

### **5.1 Software para la recepción de datos del Power Logic**

Durante la investigación realizada sobre el funcionamiento del Power Logic, se encontró que el formato en que los datos son transmitidos hacia el computador por este dispositivo, es totalmente cerrado, es decir que el fabricante se lo reserva. Para llevar a cabo la comunicación el fabricante vende un software denominado *System Manager Software (SMS-121)*.

Este es un software de monitoreo de potencia eléctrica y un sistema de control de los dispositivos Power Logic. El sistema se encarga de la recolección de los datos enviados remotamente, los cuales va guardando automáticamente en una base de datos. Los datos pueden visualizarse en tiempo real, o bien se pueden acceder como registros históricos; para ambos casos se cuenta con opciones predefinidas o personalizables para lograr el despliegue. Tiene opciones de activación de alarmas ante eventos en múltiples niveles y ejecución de tareas como respuesta a ellas. Presenta facilidad para el despliegue de formas de onda, con un diseño patentado para ello.

Presenta opciones de seguridad, con cantidades ilimitadas de cuentas de usuario, para establecer claramente quienes pueden acceder a los datos de la energía que recibe la planta.

Estas opciones hacen de la elección *del System Manager software* la mejor opción posible, tanto por tiempo como por calidad de los resultados.

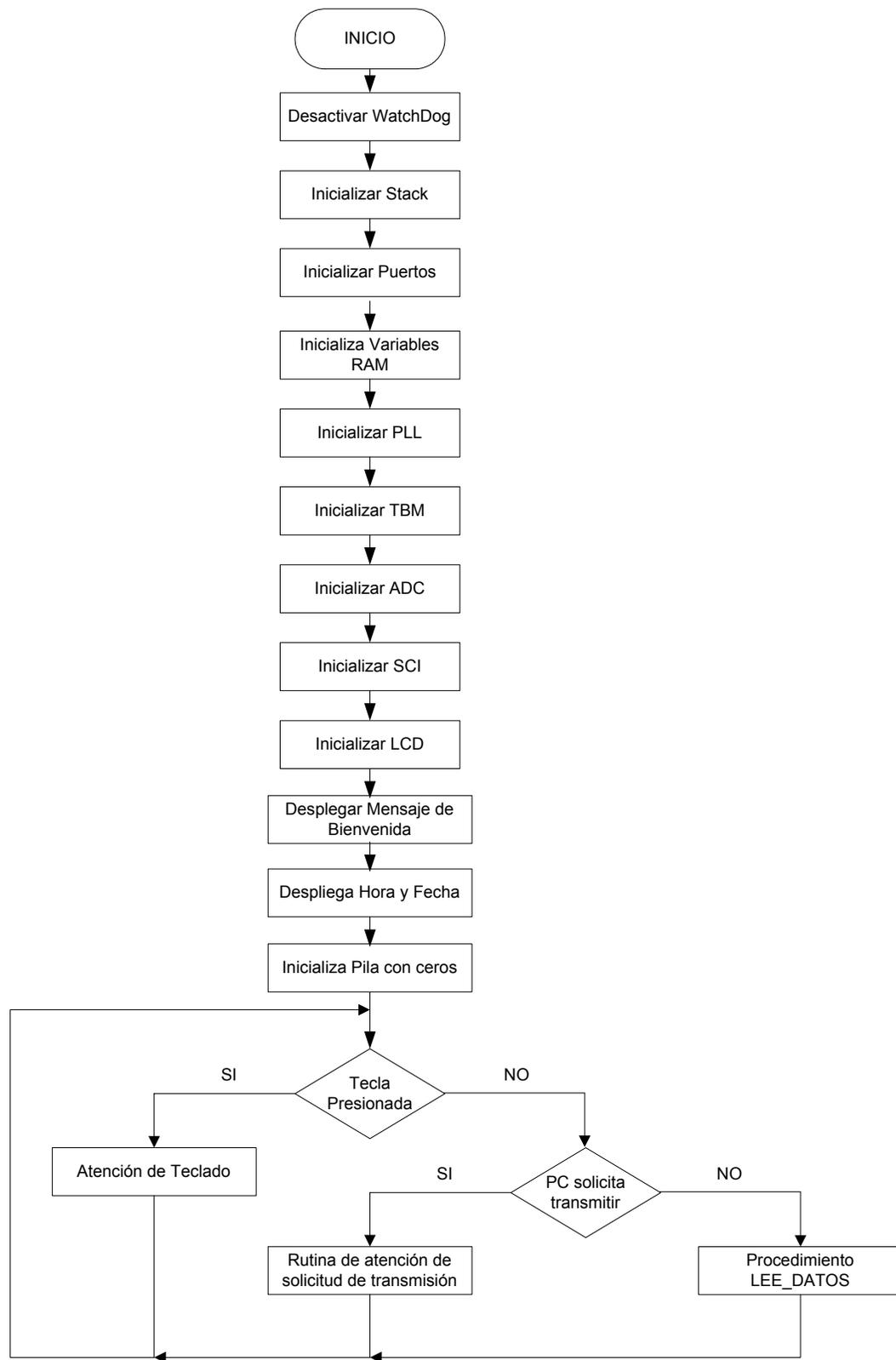
## **5.2 Software del microcontrolador**

Todas las funciones que realiza el microcontrolador están programadas en su memoria FLASH. La programación se realizó en lenguaje ensamblador de la familia HC08 de Motorola. El código programado básicamente se encarga de recolectar lecturas de corrientes y temperatura a través de convertidores analógico – digital. Como toda lectura debe estar ubicada en el tiempo, también se lleva un reloj interno que mantiene actualizada la hora y fecha del sistema. Los datos son guardados en una pila de 300bytes, que aunque es pequeña, es suficiente, ya que para cada nueva lectura que se haga, será enviada inmediatamente al computador tipo PC mediante transmisión serial. El microcontrolador también es capaz de responder a una petición de ver los datos actuales desde el computador. Cuando se detecta una situación de alerta se reporta una alarma, y se siguen los algoritmos descritos en la sección 5.3.3, que corresponden al cálculo de alarma en PC, ya sea por corrientes o por temperaturas.

A continuación se presenta una descripción del software por módulos.

### **5.2.1 Módulo Principal**

Es la rutina de servicio a ejecutarse después de un reset, por lo que es la rutina que se ejecuta al encenderse el sistema. Se encarga de cargar los registros de configuración e inicializar cada uno de los módulos utilizados por el sistema, como lo son el PLL, el TBM, el ADC, el SCI, el LCD, la pila de datos y las variables. Luego de realizadas estas funciones entra en un lazo infinito que se encarga verificar si se ha presionado una tecla o bien si existe una solicitud desde PC para transmisión de datos. Su diagrama de flujo puede apreciarse en la figura 5.2.1.



**Figura 5.2.1** Diagrama de flujo del módulo principal

### **5.2.2 Time Base Module**

Para la implementación del reloj del sistema se recurrió al módulo de base de tiempo que posee el microcontrolador. Con la debida configuración de registros, este módulo es capaz de generar una interrupción cada segundo, a la cual corresponde una rutina de servicio de interrupción encargada de llevar la hora. La lógica de esta rutina se muestra en la figura 5.2.2. Este control de hora y fecha es preciso, no necesitando ajustes a menos de que ocurra un reset, para lo cual sería necesario definir nuevamente la hora y fecha del sistema.

### **5.2.3 Atención de teclado**

Cada vez que se presiona una tecla el programa principal lo detecta y llama a esta rutina la cual se encarga de identificar la última tecla que se presionó, y dependiendo de la que sea llama a la rutina que corresponda. Una vez que se entra en una rutina se inicia un proceso, como lo puede ser el ajuste de hora o de la fecha. En algunos procesos es necesario hacer varias entradas a teclado para completar la tarea. Si esta última está incompleta se le asigna a la variable PROCESO un número que sirve de identificador del punto en que se está dentro de la tarea. En la tabla 5.2.3 se encuentra una descripción de los valores que puede tomar la variable PROCESO acompañado del punto en que se encuentra en una acción. En la figura 5.2.3 se puede observar el diagrama de flujo de atención del teclado.

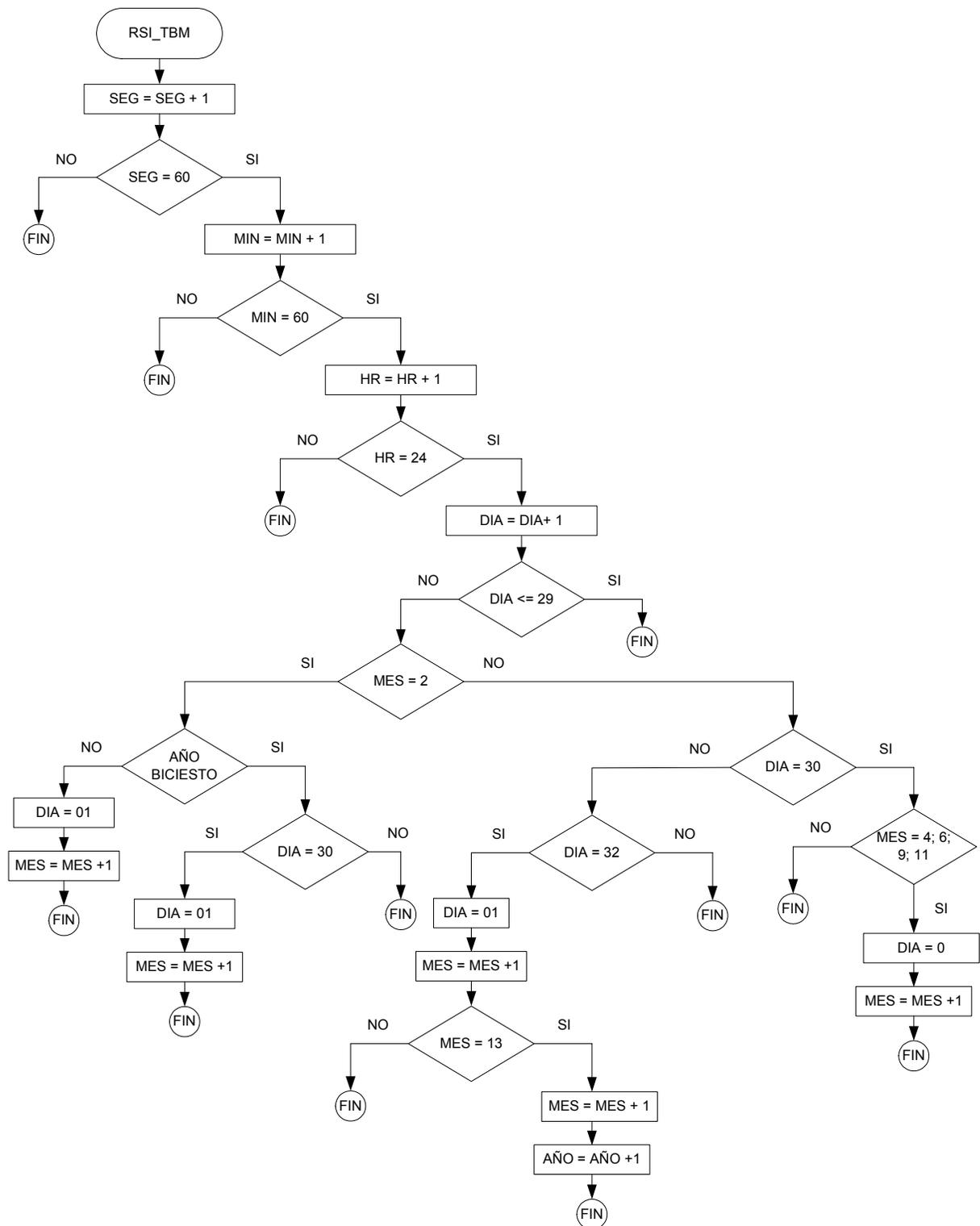
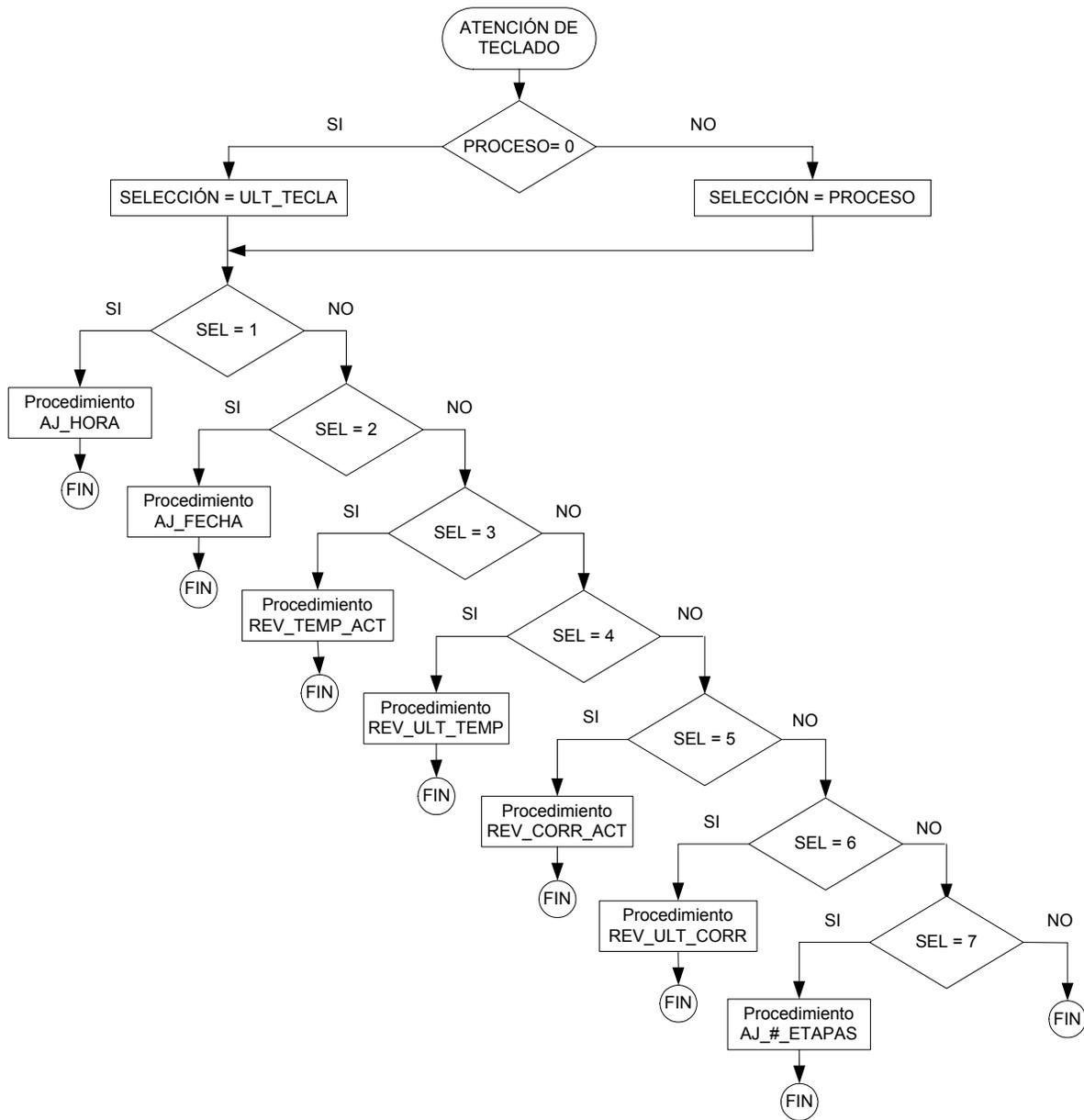


Figura 5.2.2 Diagrama de flujo de la rutina de atención de interrupción del TBM

**Tabla 5.2.3** Identificación del proceso que realiza el microcontrolador mediante valor de la variable PROCESO

Variable PROCESO Forma hexadecimal		Proceso a Realizar	SUBPROCESO
0	X	Ninguno	Ninguno
1	0	Ajuste de hora actual	Despliega indicaciones
	1		Ajuste de decenas de hora
	2		Ajuste de unidades de hora
	3		Ajuste de decenas de minuto
	4		Ajuste de unidades de minuto
	5		Espera ENTER
2	0	Ajuste de fecha actual	Despliega indicaciones
	1		Ajuste de decenas de día
	2		Ajuste de unidades de día
	3		Ajuste de decenas de mes
	4		Ajuste de unidades de mes
	5		Ajuste de decenas de año
	6		Ajuste de unidades de año
	7		Espera ENTER
3	0	Revisar temperatura actual	Desplegando datos
4	0	Revisar temperaturas almacenadas	Despliega indicaciones
	1		Despliega datos por primera vez
	2		Desplegando datos
5	0	Revisar corrientes actuales	Despliega indicaciones
	1		Ajustar decenas de etapa
	2		Ajustar unidades de etapa
	4		Espera ENTER
	5		Desplegando datos
6	0	Revisar corrientes almacenadas	Despliega indicaciones
	1		Ajustar decenas de etapa
	2		Ajustar unidades de etapa
	3		Espera ENTER
	4		Despliega datos por primera vez
	5		Desplegando datos
7	0	Definir número de etapas	Despliega indicaciones
	1		Ajustar decenas de etapa
	2		Ajustar unidades de etapa
	3		Espera ENTER



**Figura 5.2.3** Procedimiento de atención a una entrada de teclado

### **5.2.4 Ajuste de hora y fecha**

Estos son procedimientos muy parecidos en cuanto a su estructura. Solicitan al usuario que digite los nuevos valores de hora y fecha, y una vez entrados todos, al presionar la tecla ENTER, se actualizan los datos, ya sea de hora o de fecha. En cualquier momento se puede salir del proceso presionando la tecla CLEAR. Las figuras 5.2.4.1 y la figura 5.2.4.2 muestran los algoritmos.

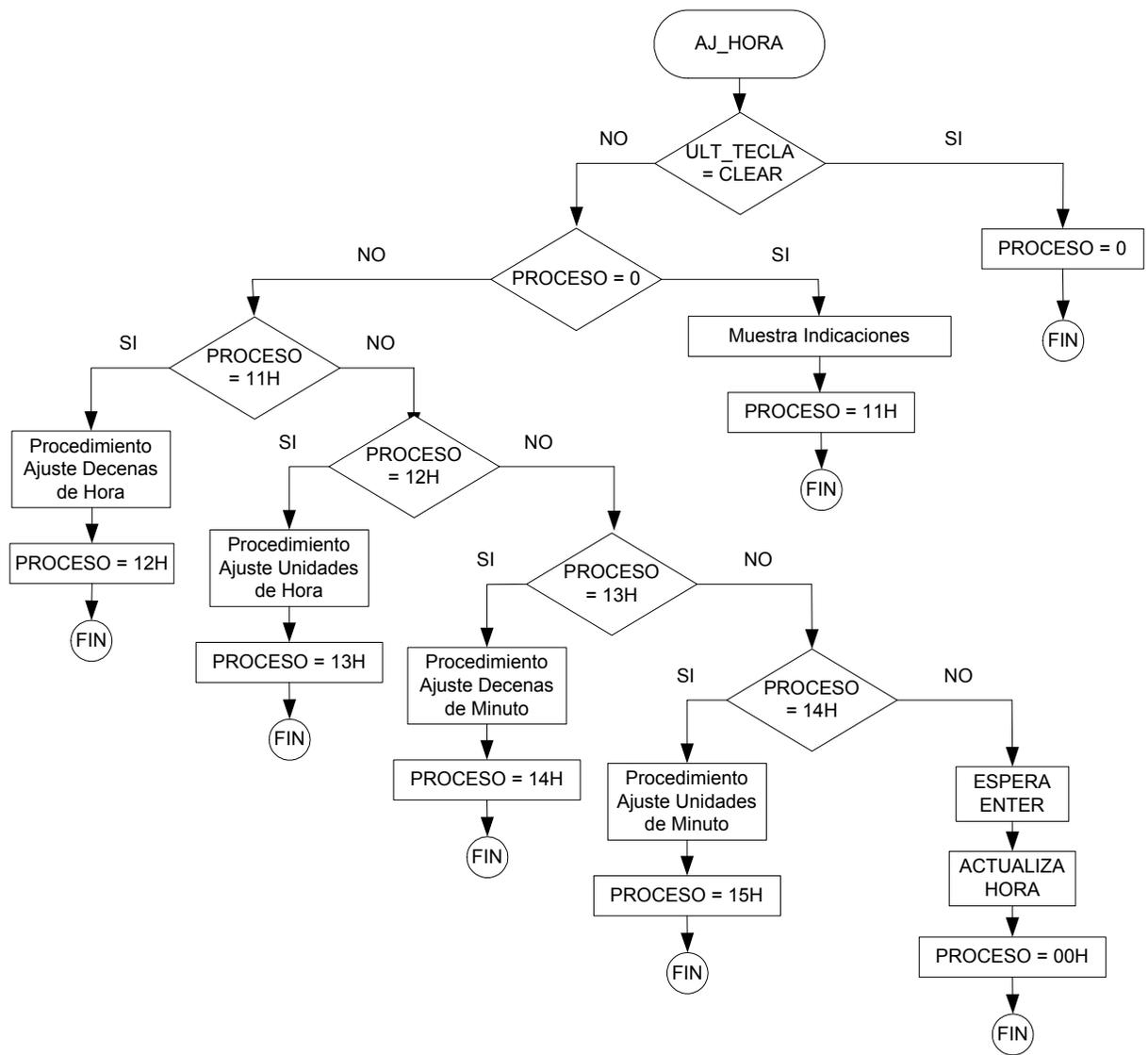


Figura 5.2.4.1 Diagrama de flujo del algoritmo del proceso de ajuste de hora

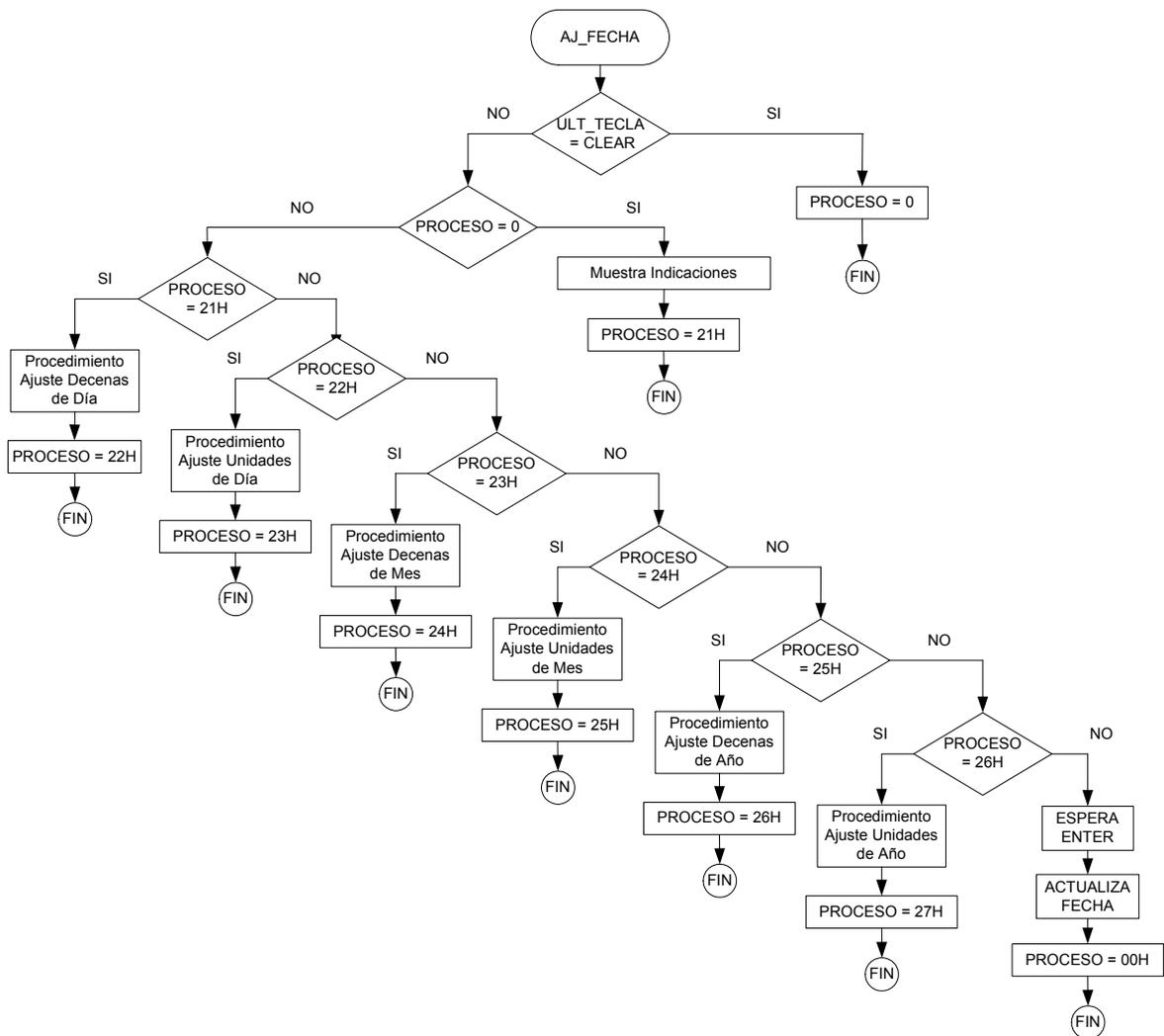


Figura 5.2.4.2 Diagrama de flujo del algoritmo del proceso de ajuste de fecha

### 5.2.5 Lectura de datos

Debido a que las variables que se estarán monitoreando presentan un cambio lento respecto al tiempo, se eligió un tiempo de muestreo dado por intervalos de una hora. Cada hora se tomará una muestra de todas las variables del sistema. Una vez que se leen todos los datos, estos se guardan en las pila del micro, acompañados de la respectiva fecha de medición, y luego son transmitidos al computador para que sean almacenados permanentemente. Al llegar al tope de la pila se sobrescriben datos. La figura 5.2.5 muestra el diagrama de flujo correspondiente.

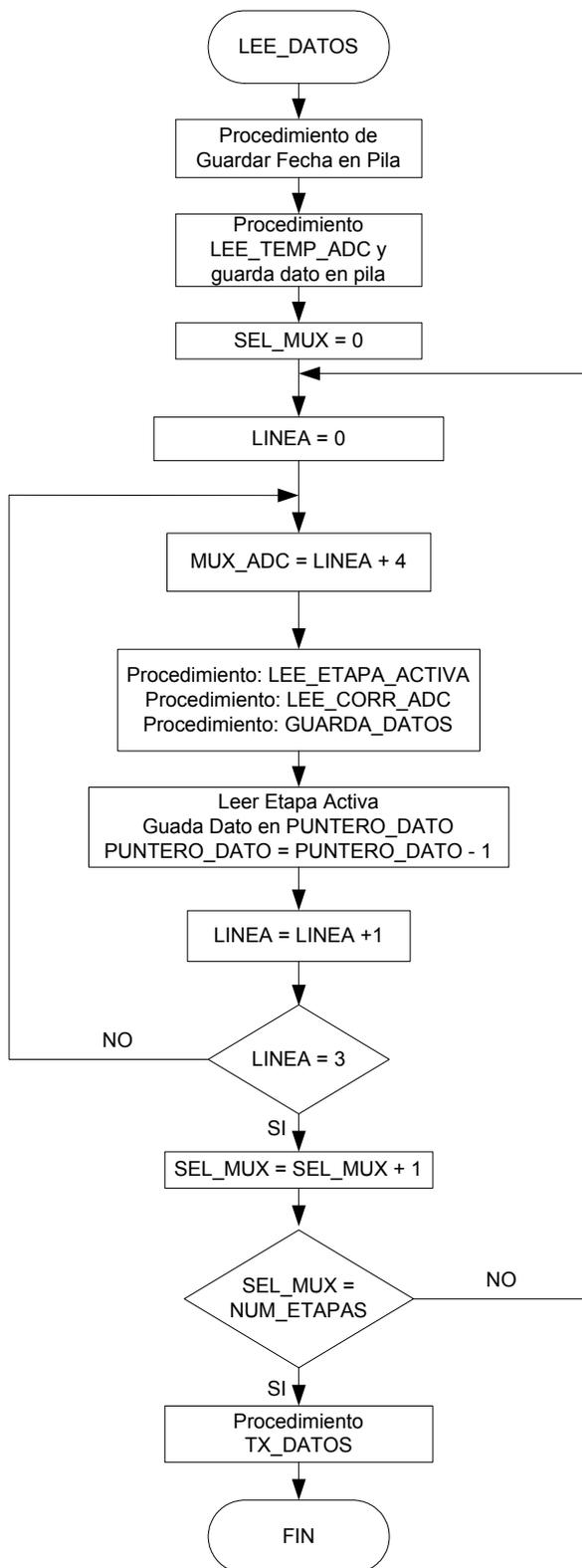
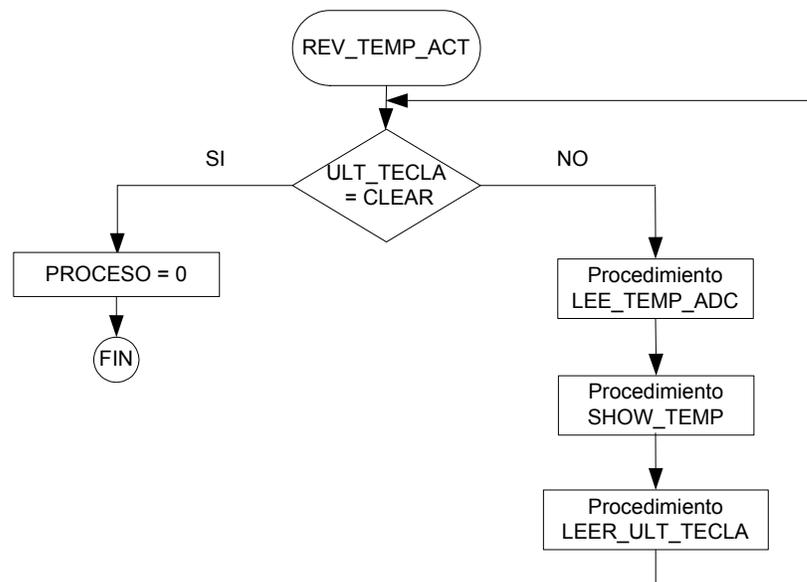


Figura 5.2.5 Diagrama de flujo del algoritmo del proceso lectura de variables

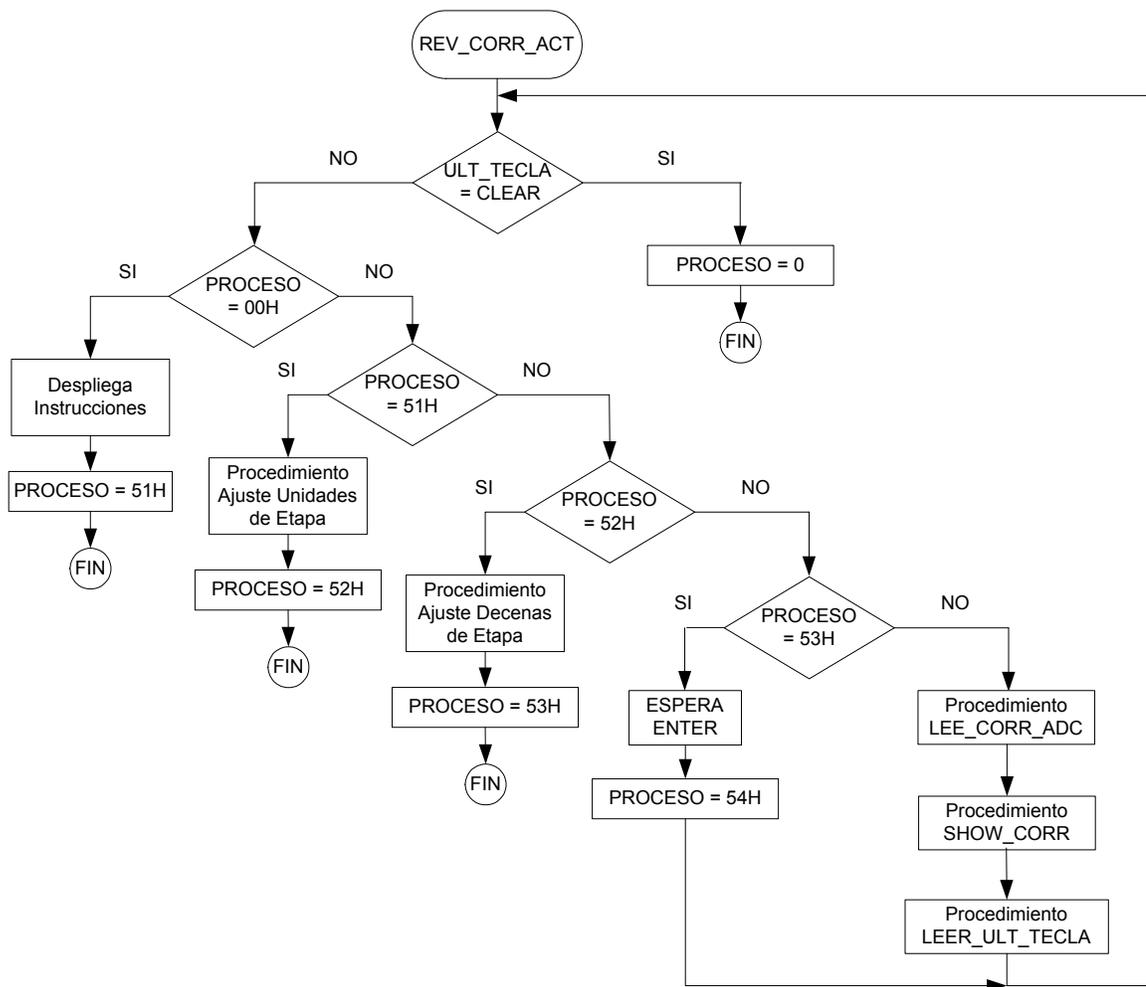
### 5.2.6 Revisión de la temperatura y corriente actual

En el momento que el usuario lo desee, puede consultar la temperatura actual del sistema. Mediante la presión de una tecla se despliega la lectura directa que hace el microcontrolador del sensor de temperatura. La lectura es desplegada en grados centígrados, y se acompaña de la fecha y hora actual del sistema. La salida del procedimiento se hace mediante la presión de la tecla CLEAR. En la figura 5.2.6.1 se aprecia el algoritmo que describe el proceso.

Por otra parte también se puede consultar los valores instantáneos correspondientes a las corrientes presentes en las líneas que alimentan a los capacitores. El usuario debe introducir el número de etapa que desea consultar, y el sistema le mostrará los valores instantáneos de las tres corrientes que componen una etapa. Este dato es acompañado de la fecha y hora actual del sistema, y se puede abandonar en cualquier momento mediante la presión de la tecla CLEAR. La figura 5.2.6.2 muestra el diagrama de flujo de la operación descrita.



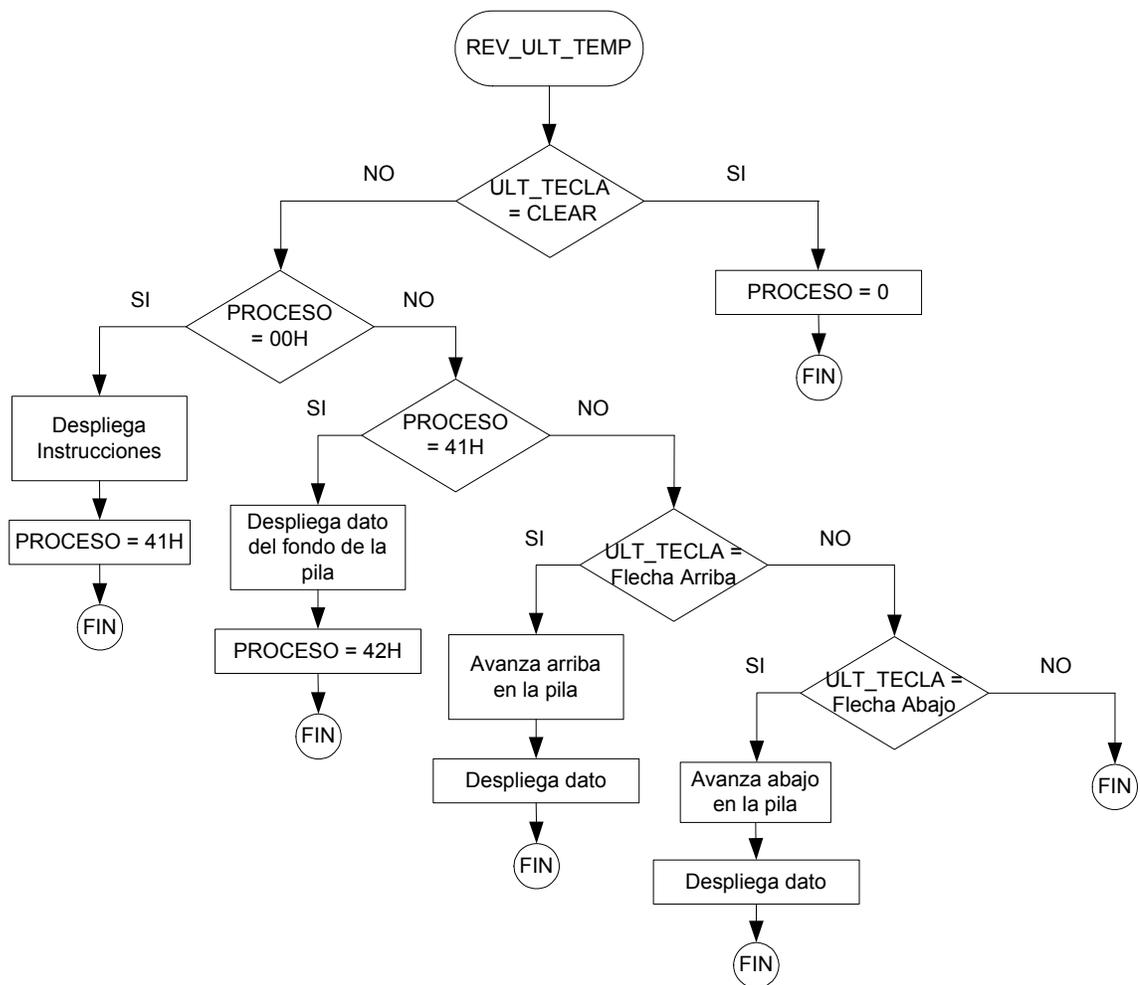
**Figura 5.2.6.1** Diagrama de flujo del procedimiento que muestra la temperatura actual del sistema



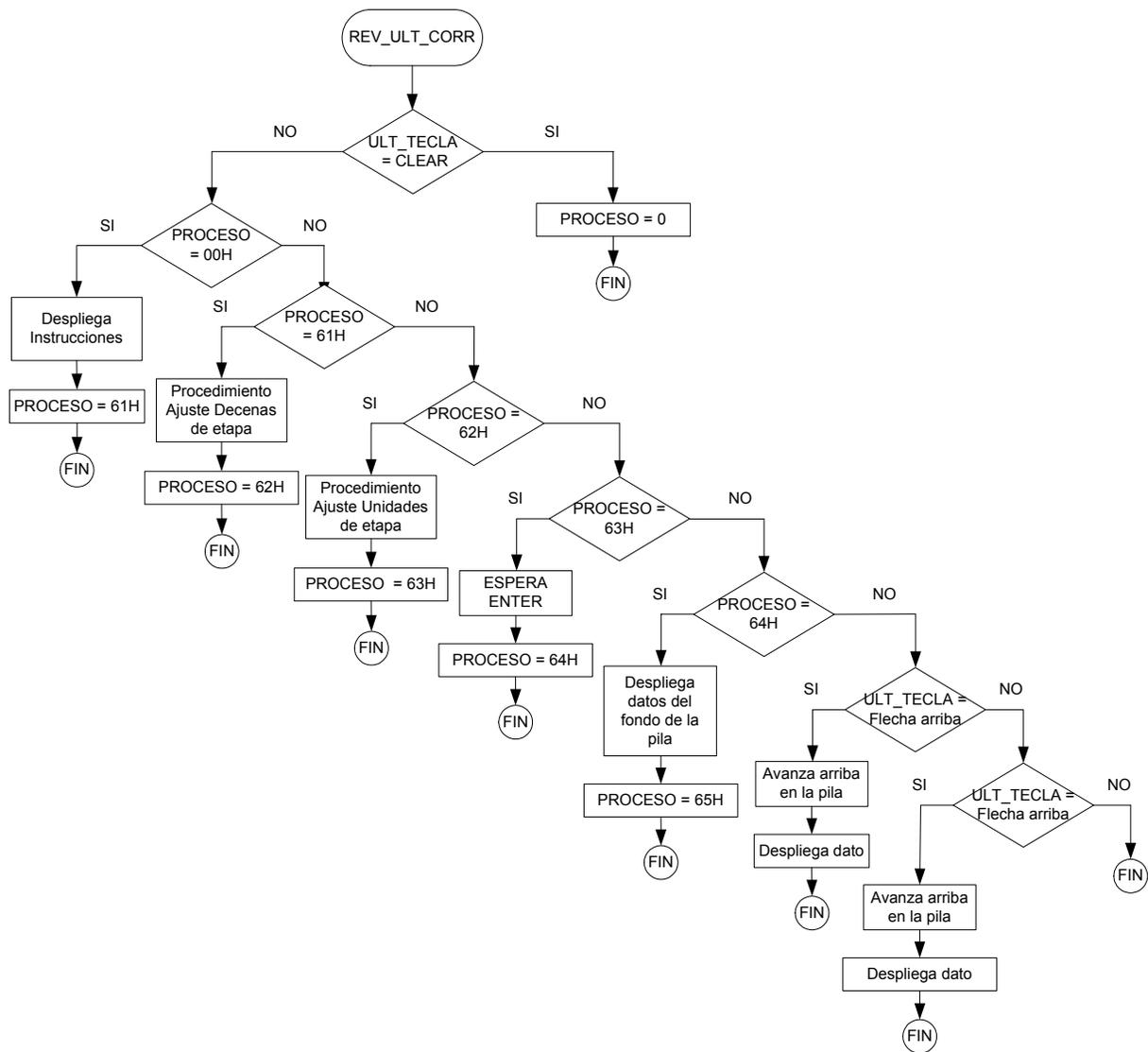
**Figura 5.2.6.2** Diagrama de flujo del procedimiento que muestra las corrientes actuales del sistema

### **5.2.7 Revisión de datos almacenados en la pila de datos**

Es posible consultar los últimos datos almacenados por el sistema mediante petición hecha en el teclado del mismo. Tanto los datos de temperatura como los de corriente se muestran acompañados de la respectiva fecha y hora de medición. Una vez entrado en alguno de los procesos se pueden recorrer los distintos valores de datos presionando las teclas de flecha arriba o flecha abajo, para recorrer la pila de datos en forma ascendente o en forma descendente respectivamente. En cualquier momento se puede salir del proceso presionando la tecla CLEAR. Los procedimientos se muestran esquemáticamente mediante diagramas de flujo en las figuras 5.2.7.1 y en la 5.2.7.2



**Figura 5.2.7.1** Diagrama de flujo del procedimiento que muestra los datos de temperaturas almacenadas en la pila de datos

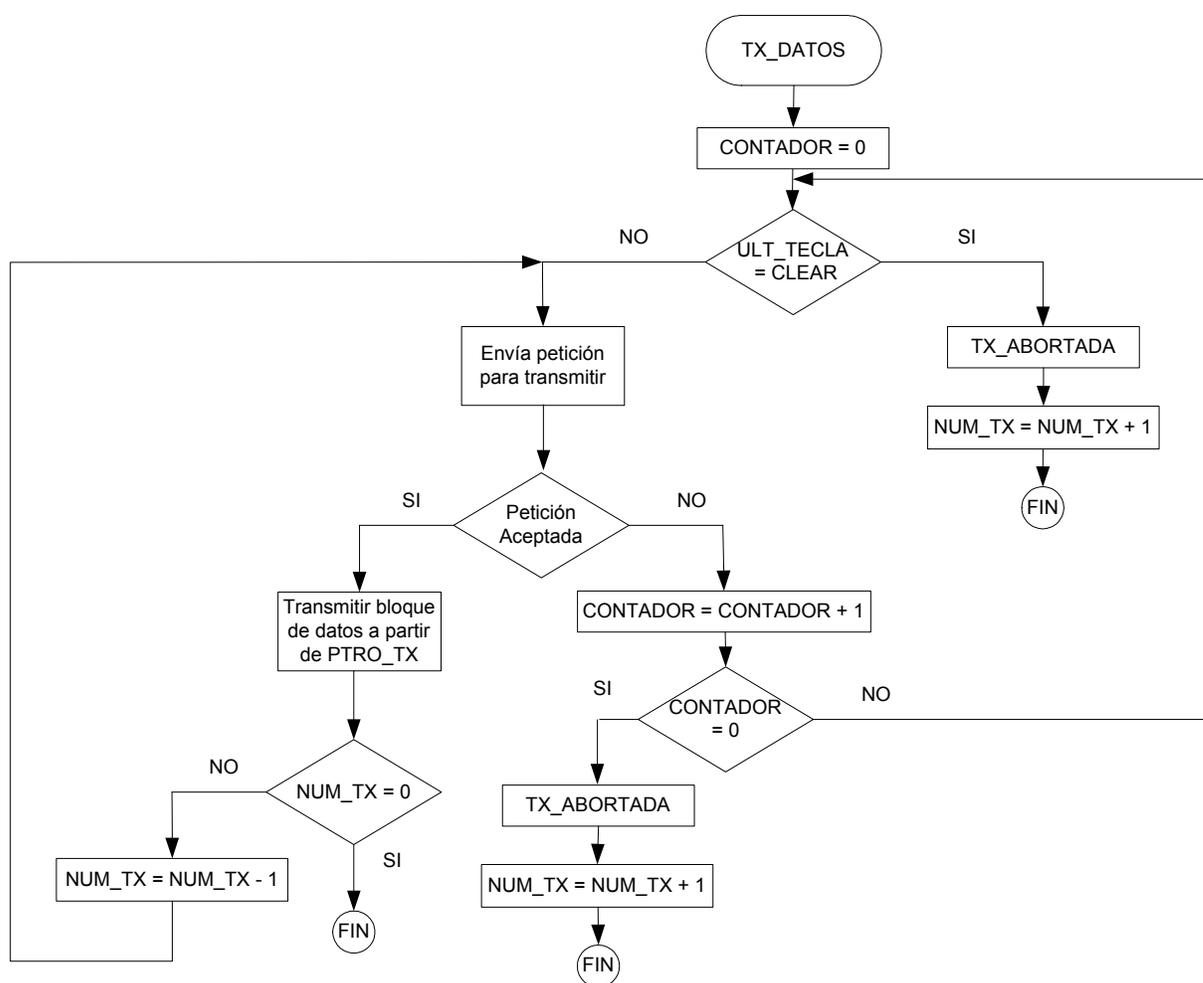


**Figura 5.2.7.2** Diagrama de flujo del procedimiento que muestra los datos de corrientes almacenadas en la pila de datos

### 5.2.8 Transmisión de datos

Cada vez que se almacena un grupo de datos correspondiente a una medición el sistema hace una petición para transmitirlos al PC. Cuando la petición es respondida adecuadamente, se transfieren los datos almacenados en la pila de la última medición. La solicitud de transmisión es emitida un máximo de 256 veces, y si para esto no es respondida se aborta la transmisión. La transmisión también puede ser abortada si en el proceso de solicitud se presiona la tecla CLEAR.

En cualquiera de estos casos, se crea un registro de que no se envió un dato, para que en el momento en que la transmisión se restablezca se transfieran los datos no enviados. Como la pila puede ser sobrescrita, existe la posibilidad, si se han abortado muchas mediciones, de que se envíen datos repetidos, por lo que el software receptor será el encargado de verificar esto, y descartar datos repetidos. En la figura 5.2.8 se observa el diagrama de flujo del algoritmo de transmisión de datos.



**Figura 5.2.8** Diagrama de flujo del procedimiento de transmisión de datos

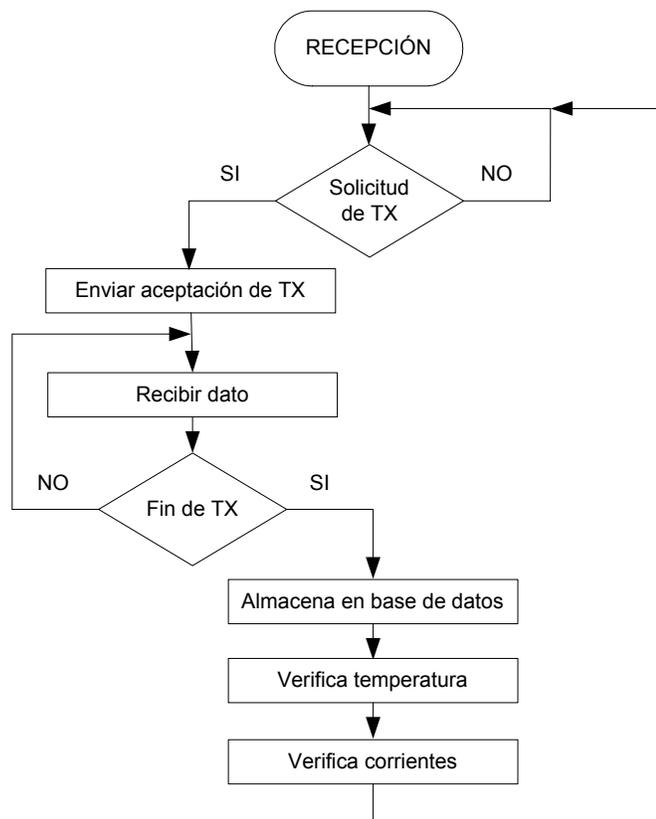
### **5.3 Software receptor de datos provenientes del microcontrolador**

Este software tiene como función ser la parte del computador PC encargada de establecer comunicación con el microcontrolador, recibir datos y administrarlos. Recibe los datos que envía el microcontrolador acerca del banco de capacitores, almacenándolos en disco duro. También es capaz de desplegar los datos ante el pedido del usuario, esto de manera agradable a la vista, por lo que se prefiere visualización gráfica. La petición de despliegue puede ser de datos instantáneos o bien cómo registro histórico. La programación se realizó en Visual Basic, y a continuación se muestran los principales módulos que componen el software.

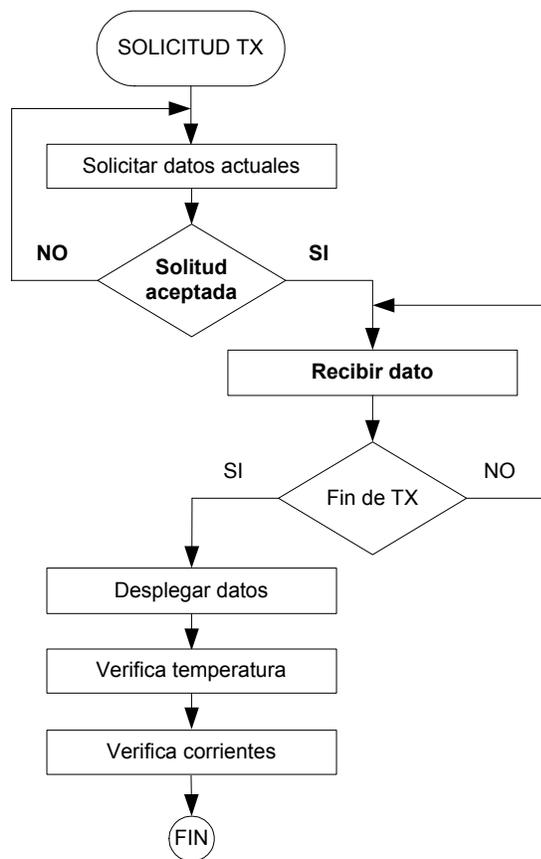
#### ***5.3.1 Recepción de datos***

El principal flujo de datos será del microcontrolador hacia el PC. Esta transmisión de datos se puede dar por dos motivos, ya sea porque el microcontrolador solicita transmitir datos o bien porque desde el software se solicita ver los datos actuales del banco. Siempre existe una petición para iniciar la transmisión, la cual está identificada por un símbolo en especial, ante la cual existe un reconocimiento que consiste en enviar un dato que indica que la transmisión puede realizarse. Los datos son números ASCII separados por comas, y el final de transmisión se denota por el envío de un símbolo especial. En las figuras 5.3.1.1 y 5.3.1.2 se aprecian los diagramas de flujo que describen estas operaciones.

Para el caso de la transmisión iniciada por el microcontrolador los datos simplemente se guardan en la base de datos y se revisan para verificar la existencia de una alarma. En el caso de la lectura de valores instantáneos los datos tan solo son desplegados en pantalla, pero no se procede a guardarlos a disco.



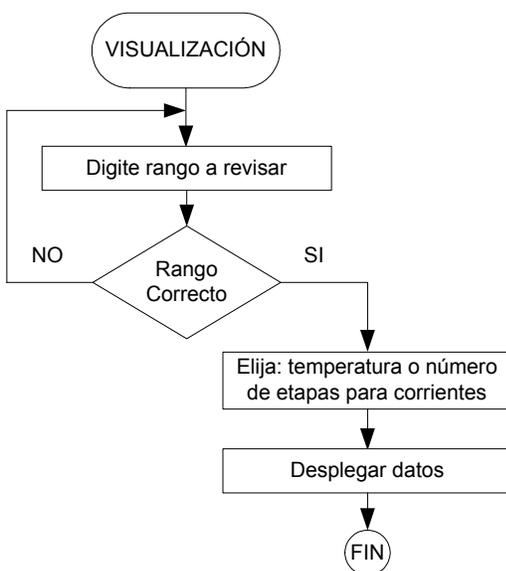
**Figura 5.3.1.1** Diagrama de flujo del procedimiento de recepción de datos cuando el microcontrolador solicita la transmisión



**Figura 5.3.1.1** Diagrama de flujo del procedimiento de recepción de datos cuando el PC solicita la transmisión

### **5.3.2 Despliegue de datos**

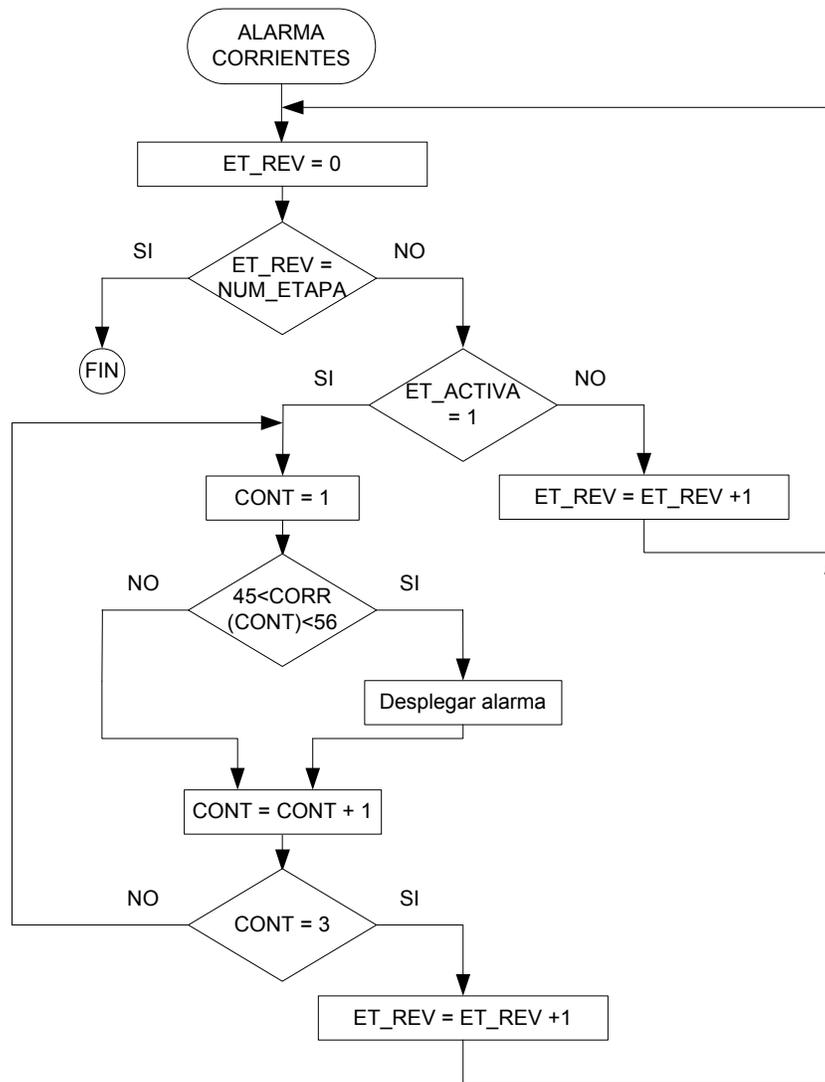
El despliegue de datos se hace de manera sencilla. Utilizando la función que tiene Visual Basic para graficar datos, lo que se hace especificar el rango de datos que se desean ver representados. Se verifica que este rango pueda representarse, es decir, que existan datos para las fechas especificadas. Luego se pregunta por el parámetro de interés, ya sea temperatura o corrientes. En el caso de estas últimas, lo que se hace es especificar la etapa a ver, y el software desplegará automáticamente las tres corrientes correspondientes a esa etapa para el rango solicitado. La figura 5.3.2 muestra el algoritmo en cuestión.



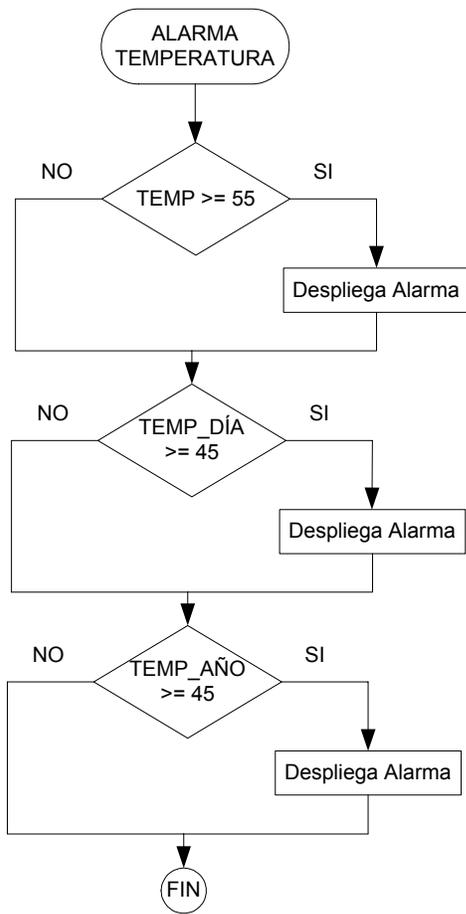
**Figura 5.3.2** Diagrama de flujo del procedimiento que muestra los datos almacenados.

### 5.3.3 Alarmas

Cuando se presenta una condición que advierte un mal funcionamiento del banco de capacitores, el sistema debe reportar una alarma para alertar al usuario de que existe un problema. Estas se pueden dar por elevada temperatura dentro del gabinete o bien por bajas corrientes de línea en las etapas capacitivas. Si se registra una corriente con un valor menor a 45 A se activará la alarma, para indicar que existe un problema en la etapa a la que pertenece la medición. En el caso de la temperatura la alarma se puede dar por datos instantáneos o promedios. Si la temperatura instantánea sobrepasa los 55° C, si el promedio en un día es mayor 45° C o si el promedio en un año es mayor a 35° C, la alarma se hará efectiva. Para esto el software hará los cálculos debidos cada vez que se hagan entradas en la base de datos. Las figuras 5.3.3.1 y 5.3.3.2 muestran los algoritmos para la activación de alarmas por corrientes y por temperaturas respectivamente.



**Figura 5.3.3.1** Diagrama de flujo del procedimiento para el cálculo de alarmas por corriente



**Figura 5.3.3.2** Diagrama de flujo del procedimiento para el cálculo de alarmas por temperatura

## Capítulo 6: Análisis y resultados

### 6.1 Explicación del diseño

A continuación se explican y justifican los diseños de los circuitos propuestos para la implementación de las diferentes etapas del proyecto, además de la adquisición de componentes.

#### 6.1.1 Banco de capacitores

Al trabajar sobre un sistema existente, primero se procedió a determinar si el equipo funcionaba correctamente. Para probar el estado de los capacitores, marca MERLIN GERIN, se recomienda hacer el cálculo de la corriente de línea que éstos deben manejar para condiciones nominales de trabajo. Luego se miden las corrientes de línea, y por comparación con la teórica se determina si el capacitor está funcionando correctamente, o si por el contrario está dañado.

La conexión de cada etapa del banco de capacitores está dada en delta, tal y como lo muestra la figura 6.1.1.1. Cada etapa es de 45KVAR, y se tienen 5 etapas.

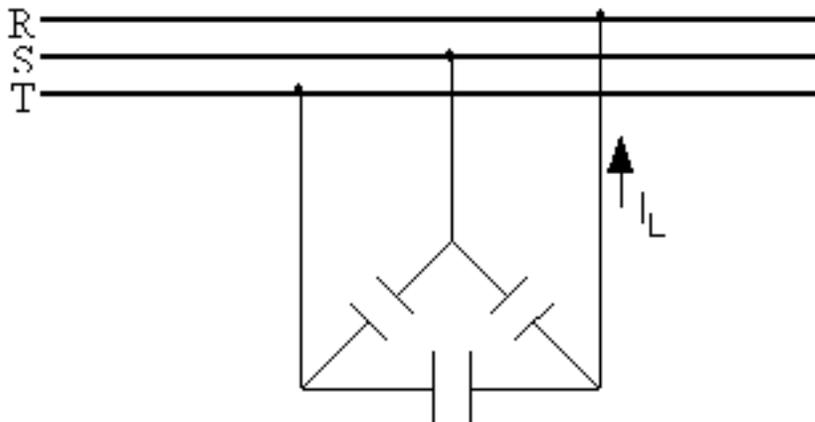
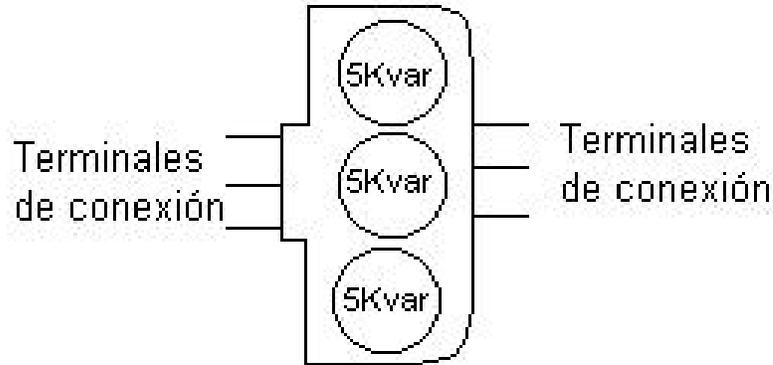


Figura 6.1.1.1 Capacitores en conexión delta en un sistema trifásico

Cada etapa de 45 KVAR consiste en tres capacitores de 15 KVAR conectados en cascada, los cuales están internamente dispuestos en delta, con esto se logra que por cada grupo de capacitores que se conecten, se estarán introduciendo cargas balanceadas a la red. La figura 6.1.1.2 muestra esquemáticamente los capacitores en mención.



**Figura 6.1.1.2** Vista superior de los capacitores MERLIN GERIN, en donde se muestran sus terminales de conexión.

La mínima unidad a probar son los capacitores de 15KVAR. Si bien se está trabajando con potencia reactiva, al hacerse los cálculos en un capacitor, el seno de  $90^\circ$  es igual a uno, por lo que al final se averigua la corriente de línea mediante potencia aparente.

$$S_{3\phi TOTAL} = 3 \cdot S_{FASE} \quad (1)$$

$$S_{FASE} = V_{FASE} \cdot I_{FASE} \quad (2)$$

$$V_{FASE} = V_{LINEA} \quad , \quad I_{LINEA} = \sqrt{3} \cdot I_{FASE} \quad (\text{Para conexión delta}) \quad (3)$$

$$S_{3\phi TOTAL} = 3 \cdot V_{FASE} \cdot I_{FASE} = \sqrt{3} \cdot V_{LINEA} \cdot I_{LINEA} \quad \text{de donde se tiene} \quad (4)$$

$$I_{LINEA} = \frac{S_{3\phi TOTAL}}{\sqrt{3} \cdot V_{LINEA}} \quad (5)$$

La potencia aparente total es de 15KVAR y el voltaje de línea de 480 V, por lo que:

$$I_{LINEA} = \frac{S_{3\phi TOTAL}}{\sqrt{3} \cdot V_{LINEA}} = \frac{15KVAR}{\sqrt{3} \cdot 480V} \Rightarrow I_{LINEA} = 18A$$

Según lo anterior, conectando un grupo de estos condensadores de 15 KVAR a una red de 480 V de línea, debe medirse una corriente de 18 A en cada una de las líneas que los alimenta. Si la corriente difiere en más de 2 A de la calculada, se considera como que el capacitor está dañado. Este criterio fue brindado por personal de Schneider, quienes distribuyen e instalan estos bancos.

Para calcular la corriente correspondiente para más de una etapa de 15KVAR funcionando simultáneamente, se multiplican los 18 A por el número de etapas. Por ejemplo, para el caso de tener una etapa de 45KVAR funcionando, se debe medir una corriente de  $18 \times 3 = 54$  A.

Las pruebas realizadas se hicieron para grupos de carga de 45KVAR, cuyas mediciones se muestran en la tabla 6.1.1.1. También se muestra el factor de potencia medido cuando solo una etapa estaba funcionando. El FP sin compensación fue de 0.49.

**Tabla 6.1.1.1** Corrientes de línea de los capacitores, para diferentes cargas de 45 KVAR cada una y FP medido.

FASE	I <sub>Q1</sub> (A)	I <sub>Q2</sub> (A)	I <sub>Q3</sub> (A)	I <sub>Q4</sub> (A)	I <sub>Q5</sub> (A)
<b>A</b>	15	30	29	37	44
<b>B</b>	35	32	36	33	44
<b>C</b>	36	53	28	10	35
<b>FP</b>	0.56	0.74	0.59	0.56	0.66

Según los datos de la tabla 6.1.1.1, se ve que solo en la línea C de la etapa 2 (Q2) se alcanza la corriente nominal, mientras las demás están muy por debajo de esta. Esto, sumado al hecho de que esta es la etapa que mejor compensa (llegó a 0.74), hace suponer que Q2 es la etapa que está en mejores condiciones, y a su vez asegura que en las demás etapas existen capacitores dañados. Hay que recordar que cada etapa de activación es de 45KVAR, y a su vez estas se componen de tres etapas de 15KVAR, por lo que para probar cada unidad capacitiva es necesario desarmar las etapas.

Para manipular el banco de condensadores es necesario suspender totalmente la alimentación de la planta, debido a que están conectados inmediatamente después del breaker principal. Como el trabajo de la planta es continuo, es necesario hacer las pruebas en el mismo momento del reemplazo de los dañados. Esto obliga a realizar una estimación de la energía reactiva a compensar.

El cálculo de la potencia necesaria del capacitor para compensar el factor de potencia (potencia reactiva a compensar) se realizó a partir de la siguiente fórmula:

$$Q_c = P \cdot (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (6)$$

$Q_c$ : Potencia reactiva del capacitor

$P$ : Potencia real de consumo

$\theta_1$ : Ángulo del Factor de Potencia actual

$\theta_2$ : Ángulo del Factor de Potencia deseado

Los cálculos se resumen en la tabla 6.1.1.2.

**Tabla 6.1.1.2** Etapas requeridas de 45KVAR para compensar el FP a partir de los datos de consumo del año 2002

Mes	Potencia Activa (KW)	FP Actual	FP Deseado	Qc Requerido (KVAR)	Etapas Requeridas
1	236,23	0,76	0,95	124,3698583	2,763774629
2	292,53	0,79	0,95	130,8780698	2,908401551
3	269,28	0,83	0,95	92,44920421	2,05442676
4	328,52	0,84	0,95	104,2236545	2,316081212
5	299,63	0,85	0,95	87,21037768	1,938008393
6	288,37	0,91	0,95	36,60261812	0,813391514
7	307,95	0,86	0,95	81,50852914	1,811300648
8	314,07	0,78	0,95	148,7427112	3,305393582
9	317,5	0,82	0,95	117,2591599	2,605759108
10	362,54	0,75	0,95	200,5690913	4,457090917
11	337,82	0,88	0,95	71,29985576	1,584441239
<b>Prom</b>	304,94	0,82	0,95	108,6466482	2,414369959

La potencia reactiva total a compensar es de 200KVAR, lo que corresponde a 4.45 etapas, de 45 KVAR cada una. Para lograr una compensación total se recomienda incluir 5 etapas nuevas. La elección del número de etapas a incluir está basada en criterios económicos a considerar por parte de la empresa. Se aprobó la compra de 4 etapas, las cuales fueron instaladas. Hay que tener en cuenta, que el calculo realizado fue hecho con datos obtenidos con el banco en funcionamiento. El cálculo teórico indicó la necesidad de agregar 5 etapas nuevas a las ya existentes para lograr una compensación efectiva. Pero como lo que se hizo fue reemplazar capacitores dañados, se perdió la compensación que ellos brindaban. Con esto es probable que en un pico muy elevado de trabajo, que produzca un consumo similar al del mes 10 de la tabla 6.1.1.2, no sea compensado en su totalidad. Sin embargo, con la nueva capacidad instalada el FP estará compensado la mayor parte del año, y las multas que se puedan presentar en un momento dado serán bajas, en comparación con las tenidas anteriormente.

### **6.1.2 Monitoreo con el Power Logic**

Se prefirió llevar a cabo la adquisición del *System Manager Software* (SMS-121) de SquareD porque resulta la opción más fiable, económica y profesional que se puede hacer. El desarrollo de un software propio hubiera requerido muchas horas de investigación, programación y depuración, que al final harían que el producto final sea más caro. Además no son comparables los resultados a obtener contra los que brinda un software diseñado por los fabricantes del producto, porque conocen a plenitud los alcances y limitaciones del mismo.

### **6.1.3 Monitoreo del banco de capacitores**

Se hará el análisis de cada módulo lógico que forma parte de este sistema.

#### **6.1.3.1 Microcontrolador**

El control de las operaciones del sistema está dado por el microcontrolador MC68HC908GP32 de Motorola. Este se encarga de los procesos de lectura de datos analógicos (corrientes y temperatura) mediante los ADC que tiene incorporados, y de datos lógicos como teclado y sensor de etapa activa. Despliega datos mediante el LCD, se comunica en formato serie con un computador tipo PC y activa la señal de alerta. Tiene un puerto especial para atención de teclado. Su lenguaje de programación es ensamblador, muy similar al lenguaje ensamblador X86 para PC, lo cual facilita el desarrollo del software. Estas condiciones hacen que el dispositivo se adapte perfectamente a la tarea.

#### **6.1.3.2 Sensor de temperatura**

Se implementará el monitoreo de la temperatura en el interior del gabinete que contiene el banco de capacitores, con el fin de alertar sobre un calentamiento excesivo de los mismos, ya que esto reduce notablemente su vida útil.

Las especificaciones del fabricante para la temperatura del aire ambiente donde se encuentre el banco de capacitores se resumen en la tabla 2.

Las etapas que maneja el actual sistema son de 45KVAR, por lo tanto la temperatura máxima a que debe llegar el aire dentro del gabinete es de 55°C, pero manteniendo promedios de 45°C en un día y de 35°C en un año.

La temperatura mínima de -25°C no es crítica, ya que el ambiente en la planta es cálido. Se tendrá especial cuidado en los límites superiores que no deben sobrepasarse. La temperatura dentro del gabinete siempre es superior o igual a la de la planta, por lo que bastará que el sensor detecte temperaturas en un rango de 10°C a 70°C, para dejar márgenes amplios respecto a la temperatura de la planta, sin embargo el sensor a utilizar, el LM35AH, está diseñado para rangos de temperatura de -55°C hasta 150°C, cuyo rango puede variar dependiendo del circuito en que se monte el sensor.

El software a desarrollar, tendrá que llevar un control estadístico sobre el comportamiento de la temperatura presente en el banco de capacitores, de manera que en el momento en que se sobrepasen los límites promedio dados en la tabla 6.3, se active la señal de alerta.

La ubicación del sensor de temperatura respecto del ADC contenido en el microcontrolador, es de unos tres metros (considerando los caminos que debe seguir el cable). Por lo tanto, se utiliza el circuito de la figura 4.3.2, que es el recomendado en la nota de aplicación del fabricante para casos en que la distancia del sensor al equipo de medición es amplia. Se utiliza twisted pair cable para disminuir los efectos del ruido electromagnético presentes en el gabinete.

### **6.1.3.3 Sensor de corriente**

Para llevar a cabo el diseño se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Se estará monitoreando una corriente alterna nominal de 54 A, cuyo valor con el tiempo descenderá, y esa será la señal de alarma.
- Se prefiere un método de medición inductivo, de manera que no se tenga la necesidad de interferir en las líneas de alimentación de los capacitores.
- El sensor se alimentará de la energía inducida, para reducir circuitería.
- La salida del sensor será analógica, de manera que pueda ser leída por un convertidor analógico-digital, con un rango de 0V a 5V.
- El sensor deberá ser pequeño, de manera que interfiera lo menos posible con el equipo actual.
- Se requiere instalar 15 sensores, por lo que el costo de cada uno de ellos debe ser reducido.

Dentro del mercado existen sensores analógicos de corriente que brindan salidas en el rango de 0V a 5V, y aunque el costo individual de estos es relativamente pequeño, debido a la cantidad requerida el costo final es considerable, por lo que se debe recurrir a una opción más económica.

Se optó por utilizar transformadores de corriente de baja potencia, a los cuales se les rectificará su salida para convertirla en un nivel CD proporcional a la corriente sensada. Se optó por un transformador de corriente de una relación de transformación de 400:5A, sin embargo la disponibilidad del producto obligó a la adquisición de un transformador de 200:5A. El circuito de medición para el sensor de corriente se presenta en la figura 4.3.3.1.

El transformador entrega una corriente estrictamente proporcional a la sensada, por lo que si se hace pasar por una resistencia, se tendrá en sus terminales un voltaje estrictamente proporcional a la corriente de salida del transformador.

El voltaje máximo de salida es de 5VDC, que corresponde al voltaje del capacitor de la figura 4.3.31. El capacitor se carga al valor del voltaje pico de la onda rectificadora, que sería el voltaje pico dado en la resistencia de medición menos los voltajes de polarización de los dos diodos en conducción.

$$V_{Rm} = V_C + 2V_D = 5 + 2 \cdot 0.7 = 6.4V_p \quad (7)$$

$I_{Rm}$  = Corriente de salida del transformador

$$R_m = \frac{V_{Rm}}{I_{Rm}} \quad (8)$$

Para establecer el valor de  $R_m$  se determinan los valores de parámetros para escala máxima, cuando se esté sensando la corriente máxima. Para dejar un rango de tolerancia, se establece  $I_{SMAX} = 60A_{RMS}$ , que produce  $I_{OUT} = \frac{60}{40} = 1.5A_{RMS}$

$$R_m = \frac{V_{Rm}}{I_{Rm}} = \frac{6.4}{\sqrt{2} \cdot 1.5} = 3.0169\Omega$$

Con esto, se establece  $R_m = 3\Omega$ , que es el valor comercial más cercano al calculado.

La corriente máxima a medir se calcula de la siguiente manera:

$$I_{OUTMAX} = \frac{V_{MAX}}{R_m} = \frac{6.4V_p}{3\Omega} = 2.133A_p \quad \Rightarrow \quad I_{OUTMAX} = 1.508A_{RMS} \quad (9)$$

$$I_{SMAX} = 40 \cdot I_{OUTMAX} = 40 \cdot 1.508 \quad \Rightarrow \quad I_{SMAX} = 60.32A_{RMS}$$

Por otro lado, la corriente mínima a medir está determinada por la resolución del convertidor analógico digital, que es de 8 bits, o sea 256 pasos. Este será el voltaje mínimo del capacitor que indicará una corriente.

$$\text{Resolución ADC} = \frac{5V}{256} = 19.53mV \quad (10)$$

Se determina a cuanto corresponde este voltaje en la resistencia de medición.

$$V_{RmMIN} = V_{CMIN} + 2V_D = 0.01953 + 2 \cdot 0.7 = 1.41953V_P \quad (11)$$

Ahora puede establecerse la corriente de salida mínima que registrará el sistema.

$$I_{OUTMIN} = \frac{V_{RmMIN}}{R_m} = \frac{1.41953V_P}{3\Omega} = 0.47317A_P \quad \Rightarrow \quad I_{OUTMIN} = 0.3345A_{RMS} \quad (12)$$

$$I_{SMIN} = 40 \cdot I_{OUTMIN} \quad \Rightarrow \quad \boxed{I_{SMIN} = 13.38A_{RMS}}$$

La potencia en la resistencia de medición debe calcularse para el caso de máxima disipación de potencia, que corresponde al caso de la máxima corriente circulando por la resistencia.

$$P_{Rm} = R_m \cdot I_{RmMAX}^2 = 3 \cdot (1.508)^2 \quad \Rightarrow \quad \boxed{P_{Rm} = 6.822W} \quad (13)$$

La potencia calculada corresponde al caso extremo de disipación (tomando en cuenta el rango superior al cual no se llegará a medir), por lo que una resistencia de 10W será suficiente para trabajar en condiciones nominales.

La resolución del sensor está determinada por la resolución del ADC del microcontrolador. La resolución del ADC es  $\Delta_V = 19.53mV_P$ .

En la resistencia de medición el intervalo de voltaje se expresa como:

$$\Delta_{Rm} = \Delta_V = 19.53mV_P$$

$$\Delta I_{OUT} = \frac{\Delta_{Rm}}{R_m} = \frac{19.53mV_P}{3\Omega} = 6.51mA_P \quad \Rightarrow \quad \Delta I_{OUT} = 4.603mA_{RMS} \quad (14)$$

$$\Delta I_S = 40 \cdot \Delta I_{OUT} = 40 \cdot 4.603mA_{RMS} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\text{Resolución del sensor} = \Delta I_S = 184mA_{RMS}}$$

El cálculo anterior indica que el microcontrolador detectará cambios en incrementos o decrementos de  $184mA_{RMS}$ .

La señal proporcionada al convertidor analógico digital debe ser lo más estable posible, por lo que se opta por la utilización de un capacitor en la salida. Para la detección de disminuciones de corriente sensada, es preciso que el capacitor se descargue, por lo que se ubica una resistencia de descarga. Al calcular los valores de capacitancia y resistencia, debe mantenerse el equilibrio entre rizado y tiempo de descarga, lo que determinará la confiabilidad y rapidez del sistema.

Se utiliza un capacitor de  $220\mu F$  y una resistencia de  $5.1K\Omega$ . La corriente que se demandará del rectificador será de un máximo de  $15mA$  (corriente máxima de consumo del ADC del microcontrolador).

$$V_{rizo} = \frac{2.4 \cdot I_{dc}}{C} = \frac{2.4 \cdot 15}{220} = 0.164V \quad (15)$$

$$T_{descarga} = 5\tau = 5RC = 5 \cdot 5.1K\Omega \cdot 220\mu F = 5.61segundos \quad (16)$$

El voltaje de rizo obtenido representa  $\frac{0.164}{0.019} = 8.6 \Rightarrow 9$  pasos en el ADC, lo que provoca una incertidumbre de  $\pm(0.126A_{RMS} \cdot 9) = \pm 1.134A_{RMS}$  en el instrumento de medición. Sin embargo, como la aplicación no requiere alta precisión, esto es aceptable.

Por otro lado, el tiempo de descarga del capacitor es de  $5.61segundos$ , lo que tampoco representa un inconveniente, ya que la aplicación no es de alta velocidad.

Por último, la adición del diodo zener en la salida del circuito tiene como objetivo proteger al ADC de un sobrevoltaje que pudiera presentarse.

Las señales proporcionadas por los sensores de corriente de cada una de las fases serán multiplexadas con el objetivo de ahorrar pines en el microcontrolador.

Para esto se utilizan tres multiplexores analógicos MAX306 (uno para cada fase), de manera que el sensado de corrientes sea periódico. Las señales de selección serán las mismas para cada multiplexor, para que al revisar valores de corrientes, se tenga la seguridad de leer datos correspondientes a una misma etapa.

La figura 4.3.3.2 muestra el diagrama de conexiones completo para el sensado de corrientes.

#### **6.1.3.4 Teclado**

El medio de comunicación del usuario con el sistema en el propio gabinete es el teclado, mediante el cual se puede solicitar el despliegue de datos, ya sea para realizar una revisión de rutina o bien para investigar una señal de alarma.

Se utiliza un teclado de  $8 \times 2$  teclas, en el que se identifican las teclas combinando letras, números y funciones especiales.

Internamente el teclado trabaja con una matriz de  $4 \times 4$ , por lo que tiene ocho salidas, las cuales se ingresan a un decodificador de teclado, que convierte el dato de tecla presionada a un dato binario de 4 bits. El decodificador utilizado es el 74C922, que presenta una señal que le indica al microcontrolador cuando debe leer un dato. Los capacitores proporcionados producen una señal de monitoreo de tecla presionada de aproximadamente 600Hz. En la figura 4.3.4 se puede apreciar la conexión teclado, decodificador y microcontrolador.

#### **6.1.3.5 Sensor etapa activa**

Es necesario conocer las etapas que el Computer 12 ha activado, porque de no ser así, cuando una de las etapas esté desactivada, los sensores de corriente medirán 0A, y la alarma se activaría. En cambio, conociendo si una etapa está desactivada, la lectura de corriente correspondiente será ignorada.

La señal que activa a los contactores, es de 18 VDC, medición hecha del contactor a tierra. Con un divisor de tensión, se puede obtener una señal digital derivada de la señal de activación del contactor. La figura 4.3.4.1 muestra el circuito con el que se detectará la activación de etapas.

Es esencial no cargar demasiado la salida del Computer 12 para evitar problemas de carga, es por esto que la resistencias utilizadas tienen un valor alto, con el fin de exigir poca corriente y disipar poca potencia en este punto. Se utilizan dos resistencias en serie, una de  $10M\Omega$  y otra de  $2.2M\Omega$ .

Con estos valores se obtiene una corriente total de:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{18}{12.2M\Omega} = 1.47\mu A$$

Con esta corriente tan baja, se ve como básicamente se tiene un circuito detector de tensión.

Cuando las etapas estén desactivas, el voltaje en las resistencias será de 0V.

Cuando las etapas se activen, el voltaje en  $R_1$  y  $R_2$  será de:

$$V_{R_1} = (10 \times 10^6)(1.47 \times 10^{-6}) \quad \Rightarrow \quad V_{R_1} = 14.70V$$

$$V_{R_2} = (2.2 \times 10^6)(1.47 \times 10^{-6}) \quad \Rightarrow \quad V_{R_2} = 3.23V$$

El voltaje  $V_{R_2}$  cumple con el nivel requerido para ser reconocido como un uno lógico.

Por otro lado, la potencia disipada en los resistores será de:

$$P_T = RI^2 = (12.2 \times 10^6)(1.47 \times 10^{-6})^2 \quad \Rightarrow \quad P_T = 26.36 \mu W$$

Con esto, se tiene seguro el hecho de que no se va a cargar la salida del Computer 12, y así no ocasionar problemas de demanda de corriente. Se puede trabajar con resistores de carbón de  $1/4 W$ . El diagrama de bloques de la figura 4.3.4.2 muestra el sistema completo de sensado de las etapas activas.

#### **6.1.3.6 Display de Cristal Líquido**

La pantalla de cristal líquido LCD es la encargada de comunicar, en el mismo gabinete, datos precisos sobre el funcionamiento del banco de capacitores. Cuando la señal de alarma se active, el usuario puede observar el problema en detalle mediante la utilización del teclado y los resultados desplegados en pantalla.

El dispositivo utilizado es el DMC16230 de Optrex Corporation, de 16 caracteres por dos líneas, presentando un tamaño bastante agradable a la vista. El contraste del display puede controlarse mediante potenciómetro, para ajustarlo según el ángulo de visión que se tenga. La figura 4.3.5 señala la conexión del LCD con el microcontrolador.

#### **6.1.3.7 Señal de alarma**

El propósito de tener una señal de alerta, es indicar que algo no está bien en el sistema. La alarma puede deberse básicamente a tres factores:

- Disminución en la corriente de línea de alguna de las etapas de capacitores.
- Temperatura más alta que la recomendada por el fabricante, ya sea instantánea o promedio en el día o en el año.
- Interruptor térmico (breaker) disparado.

La alarma no especifica el problema, solo indica la existencia de uno, para conocer el detalle debe recurrirse al display ubicado en el gabinete o bien al software instalado en el computador remoto.

Una señal luminosa se encargará de avisar sobre la anomalía, y como está disponible un voltaje AC de 120V, se utilizará un bombillo 120V de baja potencia activado por relay. La figura 4.3.6 muestra el circuito de señal de alarma.

#### **6.1.3.8 Comunicación serial**

Para lograr un manejo adecuado de los datos recolectados por el sistema, éstos serán transmitidos a un computador tipo PC, en el cual se almacenarán para su posterior análisis. Además, las señales de alerta también podrán ser consultadas en detalle en el computador.

Debido a las facilidades que presenta el microcontrolador, se utilizará transmisión serial en formato RS-232. La figura 4.3.7 muestra el esquema de conexiones desde el microcontrolador hasta el computador.

## **6.2 Alcances y limitaciones**

Respecto al banco de capacitores, los resultados que se han obtenido hasta el momento son satisfactorios. Las lecturas instantáneas que brinda el equipo de medición Computer 12 muestran que la regulación es efectiva, sin embargo, el objetivo final es eliminar las multas debidas a bajo factor de potencia, y para ello se deben analizar los recibos que emita la compañía eléctrica.

Otro aspecto a considerar es que al sustituir capacitores, se eliminaron cargas capacitivas que, aunque no estaban regulando óptimamente, si ayudaban a compensar, y los cálculos no consideran cuanta compensación se eliminó. Esto, sumado al hecho de que al momento de la sustitución el trabajo de la planta no representa una máxima carga, puede hacer que cuando el trabajo se incremente, y por lo tanto la cantidad de equipo trabajando simultáneamente también, la regulación sea insuficiente. Dado el momento habrá que analizar la posibilidad de expandir el banco.

El monitoreo de los datos que brinda el Power Logic presenta la facilidad de que con el software se puede llevar un registro histórico de los parámetros energéticos que alimentan a la planta, además de poder leer datos instantáneos. También es posible programar el Power Logic desde el computador, con lo que se puede controlar la manera en que este realiza las mediciones, así como programar alarmas que puedan alertar sobre determinada situación, y todo esto sin tener que acudir a la planta, realizándolo desde la oficina.

Respecto al sistema de monitoreo del estado de funcionamiento del banco de capacitores los resultados han sido satisfactorios. Las mediciones de temperatura y corrientes son acertadas. El sistema es capaz de mostrar las lecturas instantáneas de las mediciones en el LCD, además de hacerlo en el computador. Los registros históricos de las mediciones también son almacenados correctamente, tanto en el microcontrolador como en el PC, y pueden ser consultados en cualquier momento. La transmisión serial funciona correctamente, no obstante la distancia del cable, que es de aproximadamente 60 metros. En múltiples pruebas realizadas no se detectaron errores de transmisión. Además, el sistema de alarmas que avisa en caso de encontrar una anomalía en el funcionamiento también funciona correctamente.

Con esto se logra la gran ventaja de obtener mayor control sobre el equipo regulador del factor de potencia. Ahora no es necesario estar pendiente de hacer revisiones del funcionamiento del banco de capacitores, ya que se cuenta con un equipo que avisará en el caso de que algo esté funcionando mal, y se requiera realizar algún tipo de mantenimiento correctivo. Además los datos recolectados se pueden almacenar para consulta posterior, con lo que se logra saber como ha estado funcionando el equipo a lo largo del tiempo.

La principal limitación que tiene la integración de los sistemas a desarrollar, es el hecho de que no es posible conocer, desde el computador remoto, que se convierte en el principal punto de lectura de todo el sistema, las lecturas exactas brindadas por el Computer 12. Las lecturas del factor de potencia serán brindadas por el Power Logic, que a pesar de ser un equipo muy confiable, no es quien controla directamente la activación de las etapas de compensación

## Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

- Una señal que indica cuando los capacitores de compensación del factor de potencia pierden capacidad, es la disminución de la intensidad de sus corrientes de línea.
- Un banco de capacitores marca MERLÍN GERIN de 480V pierde vida útil cuando está expuesto a temperaturas con un promedio arriba de 35° en un año.
- Un bajo factor de potencia implica un gasto adicional muy alto para una empresa.
- La adición de compensaciones capacitivas se realiza en conexión delta para no desbalancear a la red trifásica.
- La multiplexación de señales analógicas es confiable a partir del uso de los chips MAX306CPI de MAXIM, ya que la señal no se distorsiona.
- La transmisión de datos en formato RS-232 es confiable en una distancia de 60 metros de cable para una velocidad de transmisión de 300 baudios.
- El banco de capacitores puede ampliarse hasta un máximo de 12 etapas, para lo cual el sistema de monitoreo está capacitado a trabajar, tan solo debe indicársele el número de etapas que debe sensor.
- El *System Manager Software (SMS-121)* es una muy buena herramienta para el análisis de los parámetros eléctricos de la planta.

## 7.2 Recomendaciones

- Instalar interruptores exclusivos para la desconexión del banco de capacitores. Actualmente solo es posible desconectar el banco de capacitores suspendiendo el suministro de energía eléctrica en toda la planta, incluyendo oficinas. Esto es un inconveniente porque para realizar trabajos de mantenimiento o ampliación del banco es necesario detener la producción de la planta. La búsqueda de estos espacios es muy difícil, por lo que la atención al sistema no es posible realizarla rápidamente.
- Es probable que la capacidad del banco de capacitores actual sea insuficiente en determinadas temporadas de trabajo, cuando el consumo eléctrico es muy elevado. Se recomienda ampliarlo en por lo menos una etapa más de 45KVAR, para contar con una capacidad total de 270KVAR.
- Utilizar un único computador para establecer la comunicación con el Power Logic y con el sistema de monitoreo del banco de capacitores. Para hacer más eficiente el sistema, utilizar una máquina rápida, que permita su uso en otras tareas mientras corren los programas de monitoreo. Además debe tener gran capacidad de almacenamiento en disco. Las pruebas realizadas se hicieron en un computador con procesador Intel Pentium IV de 1.8GHz, 256MB de RAM y 20GB de disco duro. Se recomienda mantener la configuración actual del sistema o bien aumentarla a futuro.
- Utilizar un convertidor de puerto serial RS-232 a USB, ya sea para conectar el Power Logic o el sistema de monitoreo con la PC. Esto porque las computadoras actuales generalmente ofrecen un solo puerto RS-232, por lo que se debe buscar otra opción para el segundo dispositivo. Según pruebas realizadas, ambas comunicaciones son posibles a través de puerto serial o bien utilizando el convertidor RS-232/USB.

## 7.3 Bibliografía

- SquareD. PowerLogic Circuit Monitor Series 2000, Instruction Bolletin. Smyrna, TN, U.S.A.
- Grupo Schneider; SquareD. Manual Banco de Condensadores Automático, 225KVAR, 5 Etapas. 03 de Junio 1997.
- Circutor S.A. Regulador de energía reactiva, Manual de instrucciones.
- CONAE – Comisión Nacional para el Ahorro de Energía. (México). [En línea]: *Factor de Potencia.* <<http://www.conae.gob.mx/wb/distribuidor.jsp?seccion=416>> [Consulta: febrero 2003]
- De la Riva, Gabriel A. Ingeniero Electricista. (Argentina). [En línea]: *Factor de Potencia.* < <http://www.ingelectricista.com.ar/cosfi.htm>> [Consulta: febrero 2003]
- Anser; Automatización Robótica Informática. (Argentina). [En línea] *Cálculo del capacitor para la regulación del factor de potencia.* <[http://www.anser.com.ar/factor\\_de\\_potencia.htm](http://www.anser.com.ar/factor_de_potencia.htm)> [Consulta: febrero 2003]
- Página de semiconductores de Motorola. (Estados Unidos). [En línea]. *Documentación y trainings.* <<http://e-www.motorola.com/>> [Consulta: marzo 2003]

## Apéndices

### Apéndice A.1: Glosario

- **ADC:** del inglés *analogic to digital converter*, que significa convertidor analógico digital. Dispositivo que discretiza una señal analógica, representándola como un dato binario.
- **ASCII:** código estándar americano para intercambio de información (American Standard Code for Information Interchange). Es el formato más común utilizado para la comunicación entre computadoras y dispositivos.
- **Computer 12:** regulador de energía reactiva automático.
- **Distorsión armónica:** distorsión debida a las características de no linealidad de un elemento y que se traduce en la aparición de componentes parásitos de frecuencias armónicas, de la corriente senoidal con que se trabaja.
- **Factor de potencia:** coseno del ángulo del desfase entre la onda del voltaje y la corriente en una línea eléctrica. Es un indicador de la cantidad de energía reactiva que se consume.
- **NC:** indica *no conexión* de un pin lógico.
- **PC:** del inglés *personal computer*, que significa computador personal.
- **Roladora:** máquina industrial utilizada para dar forma curva a láminas de acero.

- **RX:** recepción de datos.
- **Tolva:** recipiente en forma de cono o pirámide invertida, abierto por su parte inferior para dar salida a las sustancias que se vierten en él.
- **TX:** transmisión de datos.