



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

SIMULADOR DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA
MEDIANTE UN CONTROLADOR LÓGICO
PROGRAMABLE (PLC)

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO
P R E S E N T A N :
MARIO ALBERTO ALONSO SILVERIO
I S R A E L M O L I N A A V I L A

DIRECTOR:
ING. JOAQUÍN JORGE TÉLLEZ LENDECH



MÉXICO, D.F.

2004

Capítulo 1

Uso de los interruptores de potencia en un sistema eléctrico

1.1 Definición y usos de los interruptores de potencia

1.2 Parámetros de los interruptores

1.3 El proceso de interrupción en corriente alterna

1.4 Fenómenos que ocurren en la cámara de arco

1.5 Tipos de interruptores

1.6 Condiciones de interrupción críticas

Capítulo 2

Uso de los relevadores de protección en un sistema eléctrico

2.1 Generalidades e historia de los relevadores

2.2 Clasificación

2.3 Comparación entre los relés electromecánicos y los microprocesados

2.4 Características requeridas

2.5 Tiempos de operación de los relevadores

2.6 Zonas de protección

2.7 Relevadores más comunes

Controladores Lógicos Programables (PLC's)

3.1 El Controlador Lógico Programable (PLC)

3.2 Desarrollo histórico

3.3 Ventajas de los PLC's

3.4 Consideraciones importantes sobre el uso de los PLC's

3.5 Partes de un PLC

3.6 Lenguajes de programación

3.7 Fundamentos de programación en diagramas *Ladder*

3.8 Ejemplos de aplicaciones

Descripción del sistema

4.1 Circuito de control

4.2 Funcionamiento del sistema

4.3 Características del relevador de protección empleado

4.4 Características del relevador de recierre utilizado

Capítulo 5

Descripción del PLC y programa del sistema

5.1 Generalidades del PLC D100

5.2 Partes del PLC D100

5.3 Conexión de las terminales de entrada y salida

5.4 Direccionamiento de los elementos del programa

5.5 Tiempo de ejecución del programa

5.6 Especificaciones del PLC D100 y su teclado-programador

5.7 Programa del sistema

Capítulo 6

Pruebas del sistema

6.1 Operación manual

6.2 Apertura por protecciones

6.3 Ejecución del recierre

6.4 Posibilidades de crecimiento

Capítulo 7

Tecnologías actuales en protecciones eléctricas

7.1 Relevadores microprocesados

7.2 Simuladores de relevadores

Capítulo 8

Conclusiones

Apéndices

A. Instrucciones más comunes de algunos fabricantes de PLC's

B. Bibliografía y referencias

Agradecimientos:

A la Universidad Nacional Autónoma de México, nuestra Alma Mater, por brindarnos el privilegio de ser parte de su comunidad.

A nuestros profesores, por compartirnos sus conocimientos y experiencias.

A los miembros del Jurado.

Al ingeniero Jorge Téllez Lendeck, por la dirección de este proyecto.

A los ingenieros José R. Coronado Campi y Juan M. Hernández Osnaya, por su valiosa ayuda y asesoría.

Al personal del Laboratorio de Ingeniería Eléctrica.

A los ingenieros Ciro Jiménez y David Martínez de Cutler-Hammer Mexicana, por el apoyo brindado.

Mario Alberto Alonso Silverio.

Israel Molina Avila.

Agradecimientos Mario Alonso:

A las personas más importantes de mi vida, mi familia, que me han apoyado incondicionalmente en las buenas y en las malas. Este logro es de ustedes también.

A mi padre quien fue y sigue siendo un ejemplo digno de seguir para mí y al que le tengo una profunda admiración y cariño.

A mi madre de la que me siento orgulloso y he aprendido mucho de sus sabios consejos, gracias por su apoyo, la quiero mucho.

A Cristian, hermano, también de ti he aprendido mucho gracias por todo.

A Tavo, brother, gracias eres parte de esto; continua así y verás los frutos de tu esfuerzo.

A mis tías Rode y Evila, que son como mis mamás, gracias por su cariño.

A los ex-compañeros de la Facultad, por todas esas vivencias que hacen única la experiencia de la Universidad.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, la mejor.

Agradecimientos Israel Molina:

A mi madre, por su amor y cariño pero sobre todo por ser un ejemplo de tenacidad y espíritu inquebrantable. Te amo mamá.

A mi hermano, por su cariño y apoyo y por sus valiosos consejos para la realización de esta obra.

A mis abuelos Justina[□] y Jesús, por respaldar a mamá cuando más los necesitaba.

A todos mis primos.

A mis tíos: Teresa, Rafael, Guillermina, Ana[□] y Julio.

Y por supuesto, a mis amigos y compañeros de mi querida Facultad de Ingeniería.

Contenido

Introducción.....	x
1 Uso de los interruptores de potencia en un sistema eléctrico.....	1
1.1 Definición y usos de los interruptores de potencia.....	2
1.2 Parámetros de los interruptores.....	3
1.3 El proceso de interrupción en corriente alterna.....	4
1.4 Fenómenos que ocurren en la cámara de arqueo.....	5
1.5 Tipos de interruptores.....	6
1.5.1 Interruptor de gran volumen de aceite.....	6
1.5.2 Interruptor de pequeño volumen de aceite.....	8
1.5.3 Interruptor neumático.....	9
1.5.4 Interruptores en hexafluoruro de azufre (SF ₆).....	11
1.5.5 Interruptor de vacío.....	12
1.5.6 Interruptor de aire magnético.....	14
1.6 Condiciones de interrupción críticas.....	15
2 Uso de los relevadores de protección en un sistema eléctrico.....	17
2.1 Generalidades e historia de los relevadores.....	18
2.2 Clasificación.....	19
2.2.1 De atracción electromagnética.....	20
2.2.2 De inducción electromagnética.....	20
2.2.3 Electrónicos.....	21
2.2.4 Microprocesados.....	22
2.3 Comparación entre los relés electromecánicos y los microprocesados.....	23
2.4 Características requeridas.....	24
2.4.1 Sensibilidad.....	24
2.4.2 Selectividad.....	25
2.4.3 Rapidez.....	25
2.4.4 Confiabilidad.....	25

2.5 Tiempos de operación de los relevadores.....	25
2.6 Zonas de protección.....	27
2.6.1 Protección primaria.....	28
2.6.2 Protección secundaria.....	28
2.6.3 Protección de respaldo remota.....	29
2.7 Relevadores más comunes.....	29
2.7.1 Relevador de sobrecorriente.....	29
2.7.2 Relevador direccional.....	30
2.7.3 Relevador diferencial.....	31
2.7.4 Relevador de distancia.....	33
2.7.5 Relevador de temperatura.....	35
2.7.6 Relevador de presión.....	35
2.7.7 Relevador de fluido y presencia de gases.....	35
2.7.8 Relevadores auxiliares.....	36
2.7.9 Relevador de recierre.....	36
2.7.10 Relevador de hilo piloto.....	37
3 Controladores Lógicos Programables (PLC's).....	39
3.1 El Controlador Lógico Programable (PLC).....	40
3.2 Desarrollo histórico.....	41
3.3 Ventajas de los PLC's.....	42
3.4 Consideraciones importantes sobre el uso de los PLC's.....	43
3.5 Partes de un PLC.....	44
3.5.1 Unidad Central de Proceso (CPU).....	44
3.5.2 Módulo de entradas y salidas (E/S).....	46
3.5.3 El programador.....	47
3.5.4 Otros accesorios.....	48
3.6 Lenguajes de programación.....	49
3.6.1 Escalera (<i>Ladder</i>).....	50
3.6.2 Diagrama de bloques funcionales (<i>Function Block Diagram</i> o FBD)	50
3.6.3 Lista de instrucciones (<i>Statement List</i> o STL).....	51

3.7 Fundamentos de programación en diagramas <i>Ladder</i>	52
3.7.1 Bobinas y contactos.....	52
3.7.2 Comparación entre las lógicas digital y <i>Ladder</i>	53
3.7.3 Temporizadores.....	58
3.7.4 Contadores.....	59
3.7.5 Funciones adicionales.....	60
3.8 Ejemplos de aplicaciones.....	62
4 Descripción del sistema.....	65
4.1 Circuito de control.....	66
4.2 Funcionamiento del sistema.....	68
4.2.1 Manija de control.....	69
4.2.2 Operación manual.....	71
4.2.3 Disparo por protecciones.....	71
4.2.4 Función de recierre.....	72
4.2.5 Bombeo del interruptor.....	72
4.2.6 Función antibombeo.....	73
4.3 Características del relevador de protección empleado.....	73
4.3.1 Relé de sobrecorriente de tiempo definido 50D.....	73
4.3.2 Panel frontal.....	75
4.3.3 Contactos principales.....	76
4.3.4 Especificaciones técnicas.....	77
4.4 Características del relevador de recierre utilizado.....	78
4.4.1 Generalidades del 79M.....	78
4.4.2 Fuente de poder.....	78
4.4.3 Controles frontales.....	80
4.4.4 Conexiones y contactos principales.....	81
4.4.5 Especificaciones técnicas.....	83
5 Descripción del PLC y programa del sistema.....	84
5.1 Generalidades del PLC D100.....	85

5.2 Partes del PLC D100.....	86
5.3 Conexión de las terminales de entrada y salida.....	88
5.3.1 Características de las entradas y salidas del PLC.....	89
5.4 Direccionamiento de los elementos del programa.....	90
5.5 Tiempo de ejecución del programa.....	91
5.6 Especificaciones del PLC D100 y su teclado-programador.....	92
5.7 Programa del sistema.....	93
5.7.1 Bloque 1.....	95
5.7.2 Bloque 2.....	96
5.7.3 Bloque 3.....	96
5.7.4 Bloque 4.....	97
6 Pruebas del sistema.....	100
6.1 Operación manual.....	101
6.2 Apertura por protecciones.....	101
6.2.1 Circuito de prueba.....	101
6.2.2 Ajuste de corriente del 50D.....	103
6.2.3 Ajuste de tiempo del 50D.....	103
6.3 Ejecución del recierre.....	104
6.3.1 Conexión del 79M con el PLC.....	105
6.3.2 Problemas con falla permanente.....	106
6.3.3 Pruebas realizadas.....	108
6.4 Posibilidades de crecimiento.....	111
7 Tecnologías actuales en protecciones eléctricas.....	112
7.1 Relevadores microprocesados.....	113
7.1.1 Protección y medición integradas.....	114
7.1.2 Comunicaciones y enlace con una PC.....	115
7.1.3 Comparación entre los relés electromecánicos y los microprocesados	116
7.2 Simuladores de relevadores.....	118
7.2.1 Simulador SPACOM.....	119

7.2.2 Descripción de algunos relés del simulador.....	120
7.2.3 Entorno de trabajo del simulador.....	122
7.2.4 Encendido y mandos del relevador.....	123
7.2.5 Barra de menús o menú principal.....	125
7.2.5.1 Menú de <i>File</i> (Archivo).....	126
7.2.5.2 Menú de <i>Options</i> (Opciones).....	126
7.2.5.3 Menú de <i>Preferences</i> (Preferencias).....	128
7.2.5.4 Menú de <i>Help</i> (Ayuda).....	130
7.2.6 Barra de herramientas.....	131
7.2.7 Uso del simulador.....	132
7.2.7.1 Generalidades sobre el relevador simulado.....	133
7.2.7.2 Módulo principal.....	134
7.2.7.3 Módulo de control <i>SPCJ 2C30</i>	139
7.2.7.4 Ejemplo de una simulación.....	143
8 Conclusiones.....	146
Apéndice A.....	150
Apéndice B.....	152

Introducción

Desde hace varios años se creó en el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica de nuestra Facultad una mesa-tablero de relevadores donde se montó un circuito de control que reproduce el funcionamiento de un interruptor de potencia. Con este circuito, basado en relés auxiliares, se simulan las maniobras de apertura y cierre de un auténtico interruptor de potencia como los que existen en las subestaciones eléctricas.

El sistema cuenta con: una manija que efectúa el control manual del interruptor; así como un par de luces-piloto y una alarma de disparo, que sirven como elementos de señalización.

Además, a lo largo del proyecto se le fueron incorporando diversos relevadores de protección como: de sobrecorriente, direccional, de recierre y de distancia, que se emplean para mostrar a los alumnos del "Laboratorio de Protección de Sistemas Eléctricos" cómo opera un interruptor de potencia junto con los equipos de protección.

Sin embargo, debido al rápido avance tecnológico en nuestros días, existe la sensación de que, si bien, el sistema descrito -al igual que otros equipos existentes en el Laboratorio- cumplen con su propósito pedagógico, han pasado a ser un tanto obsoletos por la tecnología que fue utilizada en su diseño y construcción.

Por otro lado, al encontrarnos cada vez con sistemas más sofisticados y complejos que se emplean en diversas industrias -la eléctrica no es la excepción- para tareas de control, instrumentación y automatización, es manifiesta la inquietud, tanto de alumnos como profesores de la carrera de Ingeniero Eléctrico-Electrónico, de tratar en las aulas temas relacionados con los conocimientos y las tecnologías que actualmente se manejan en el campo laboral.

Es por ello que, ante la necesidad de actualizar equipos y mostrar nuevas tendencias en el área de protecciones eléctricas, se propuso realizar una réplica del tablero antes mencionado, pero haciendo uso de un dispositivo de control más moderno: un Controlador Lógico Programable o PLC, en lugar de los típicos relevadores auxiliares.

De este modo, se planteó realizar, con un solo aparato, las mismas tareas de control que desempeñan un grupo de relés auxiliares, pero sin la necesidad de efectuar conexiones engorrosas. Además, se pensó desde un principio en la posibilidad de que el sistema contara con entradas adicionales (por si se desean añadir otros relevadores de protección), con el fin de que otros alumnos tengan la oportunidad de trabajar directamente con el sistema para complementarlo.

Así, la tesis es presentada en tres partes: en la primera (contenida en los tres primeros capítulos) se abordan los antecedentes teóricos referentes a interruptores de potencia, relevadores de protección y PLC's; en la segunda se detalla el funcionamiento básico del "Simulador de interruptor de potencia", la elaboración de su réplica mediante el PLC y las pruebas efectuadas para comprobar su buen funcionamiento. En la tercera se presentan tópicos de actualidad en protecciones eléctricas como información sobre relevadores microprocesados y un *software* creado por la compañía ABB para simular (y conocer) el manejo elemental de algunos de sus equipos en este rubro.

Es importante señalar que a lo largo de la obra -en las notas al pie de las páginas- sólo se menciona autor(es), título y página(s) correspondiente(s); esto se hizo por razones de espacio y para no distraer la atención del lector; sin embargo, al final de ésta se presenta la bibliografía completa de los libros y demás fuentes consultadas.

1.1 Definición y usos de los interruptores de potencia

Un interruptor es un dispositivo cuya función es interrumpir y restablecer la continuidad en un circuito eléctrico bajo carga (corriente nominal) así como en condiciones de corto circuito.¹

Básicamente un interruptor está formado por una cámara de extinción, la estructura (que proporciona soporte mecánico) y los accesorios como boquillas, conectores de tierra, equipos de control y medición, entre otros.

En un sistema de potencia, los interruptores se emplean para conectar y desconectar equipos diversos como generadores, transformadores, reactores, líneas de transmisión, etcétera.

Los interruptores trabajan de manera conjunta con los relevadores para mantener en operación al sistema bajo condiciones normales y por otro lado, en caso de presentarse una falla, aislar los equipos afectados del resto del circuito y limitar los daños que puedan producirse por el sobrecalentamiento y los esfuerzos mecánicos.

Cuando se tiene que escoger un interruptor, es importante que cumpla con los siguientes requisitos:²

- Abrir y cerrar en el menor tiempo posible bajo cualquier condición de operación.
- Mantener la continuidad de corriente nominal dentro de los límites de temperatura especificados.
- Resistir los esfuerzos térmicos y mecánicos en situaciones de corto circuito.
- No generar grandes sobretensiones durante su operación.

¹ Raúll Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 92.

² Weedy B. & Cory B. *Electric power systems*, p. 448.

- Su mantenimiento ha de ser sencillo.
- Debe ser económico.

1.2 Parámetros de los interruptores

A continuación se definen algunas magnitudes importantes que se consideran en la selección de un interruptor.³

Tensión nominal. Es el valor eficaz de la tensión entre fases del sistema en donde se instala el interruptor.

Tensión máxima. Es el valor máximo de la tensión para el cual está diseñado el interruptor y representa el límite superior de la tensión al cual debe operar, según las normas.

Corriente nominal. Es el valor eficaz de la corriente normal máxima que puede circular continuamente a través del interruptor sin exceder los límites recomendables de elevación de temperatura.

Corriente de cortocircuito inicial. Es el valor pico de la primera semionda de corriente, comprendida en ella la componente transitoria.

Corriente de cortocircuito. Es el valor eficaz de la corriente máxima de cortocircuito que pueden abrir las cámaras de extinción del arco. Las unidades son kiloamperes (kA) aunque comúnmente se dan en megavolts-ampères (MVA) de cortocircuito.

Tensión de restablecimiento. También llamado voltaje de recuperación, es el valor eficaz de la tensión máxima de la primera semionda de la componente alterna, que aparece entre los contactos del interruptor después de la extinción de la corriente. Tiene una

³ Raúll Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 93-94.

influencia muy importante en la capacidad de apertura del interruptor y presenta una frecuencia que es del orden de miles de hertz, de acuerdo con los parámetros eléctricos del sistema en la zona de operación.

1.3 El proceso de interrupción en corriente alterna

De los diferentes elementos que componen un interruptor, la cámara de extinción (regularmente conocida como cámara de arqueo) es la parte más importante pues en ella se realiza la interrupción de la corriente eléctrica. (Figura 1.1).

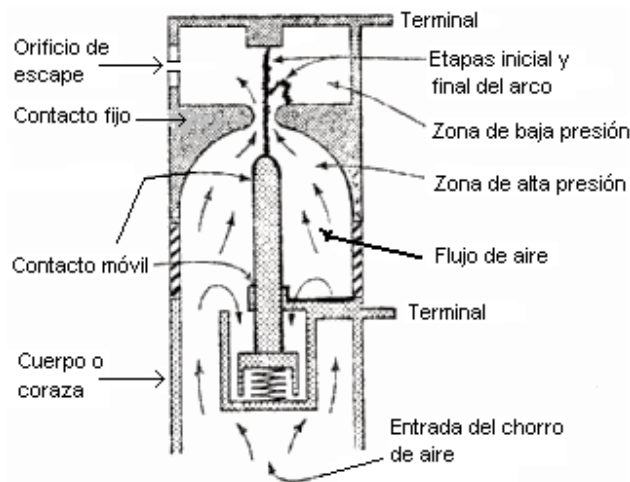


Fig. 1.1 Cámara de arqueo de un interruptor neumático.⁴

El fenómeno de interrupción se presenta al iniciarse la separación de los contactos generándose un arco (durante un tiempo limitado) a través de un fluido, éste lo transforma en plasma y provoca esfuerzos en la cámara debido a las altas presiones y temperaturas. La interrupción de la corriente ocurre cuando la onda cruza por cero y durante el siguiente medio ciclo se presenta la tensión de restablecimiento cuya apariencia difiere según el tipo de circuito como se describe a continuación.⁵

⁴ Bayliss, C. *Transmission and distribution electrical engineering*, p. 467.

⁵ Fink D. y Beaty W. *Manual de ingeniería eléctrica*, cap. 10, p. 79-80.

Circuito inductivo. Como en este caso la corriente se encuentra retrasada 90° respecto del voltaje, cuando ocurre la interrupción, la tensión de restablecimiento se elevará súbitamente porque en ese mismo instante la onda de voltaje se halla en su punto máximo. Por lo tanto, para extinguir el arco es necesario que exista una gran resistencia dieléctrica dentro de la cámara.

Circuito resistivo. En este caso la corriente y el voltaje están en fase y por lo tanto cruzan por cero al mismo tiempo. Como el voltaje de recuperación se incrementa con rapidez moderada no presenta mayores problemas al interruptor.

Circuito capacitivo. En este último arreglo la corriente adelanta por 90° al voltaje y dado que el condensador está completamente cargado al momento del corte de corriente, la tensión de recuperación se eleva lentamente durante la primera mitad del ciclo, pero continúa creciendo hasta alcanzar un valor del doble del voltaje nominal. Esto acarreará problemas de reincidencia del arco, perturbaciones en la red y sobrevoltajes.

1.4 Fenómenos que ocurren en la cámara de arco

Durante la interrupción del arco, se presentan los siguientes fenómenos:⁶

- Altas temperaturas debido al plasma creado por el arco. Las temperaturas del plasma sobrepasan los 20,000 K.
- Altas-presiones debido a la elevada temperatura del plasma.
- Flujos turbulentos del gas que adquieren velocidades variables de 100 y 1,000 metros por segundo en una geometría de flujo cambiante y que producen el soplado del arco, su alargamiento y, por lo tanto, su extinción.
- Masas metálicas en movimiento (contacto móvil) que se aceleran en pocos milésimos de segundo hasta adquirir velocidades del orden de 10 metros por segundo a la vez que comprimen simultáneamente el gas de enfriamiento.

⁶ Raúll Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 95.

- Esfuerzos mecánicos causados por la corriente de cortocircuito.
- Esfuerzos dieléctricos originados por la tensión de restablecimiento.

1.5 Tipos de interruptores

De acuerdo con la forma en que se elimina el arco en la cámara de extinción, los interruptores de potencia se clasifican de la siguiente manera:

- De gran volumen de aceite.
- De pequeño volumen de aceite.
- Neumáticos.
- En hexafluoruro de azufre (SF₆).
- De vacío.
- De aire magnético.

1.5.1 Interruptor de gran volumen de aceite

Fueron los primeros interruptores empleados en alta tensión y que utilizan aceite para la extinción del arco, son utilizados todavía en Estados Unidos. En este tipo de extinción el arco producido calienta el aceite causando una formación de gases muy intensa que, aprovechando el diseño de la cámara, empuja un chorro de aceite a través del arco lo cual provoca su alargamiento y enfriamiento hasta llegar a su extinción al pasar la onda de corriente por cero. Una ventila con mecanismo de separación del aceite permite el escape de los gases generados por el arco.

Consiste en un tanque de acero parcialmente lleno de aceite a través de cuya tapa se hacen pasar bujes de porcelana o compuestos. Unos contactos situados en la parte inferior de los bujes se conectan por medio de una cruceta conductora soportada en una barra de levante de madera o de alguna composición la cual, en los modelos comunes, cae por gravedad enseguida de la apertura de los contactos (que se efectúa por la acción de resortes)

abriendo al interruptor. También se llegan a emplear resortes de aceleración para incrementar la velocidad de apertura. (Figura 1.2).

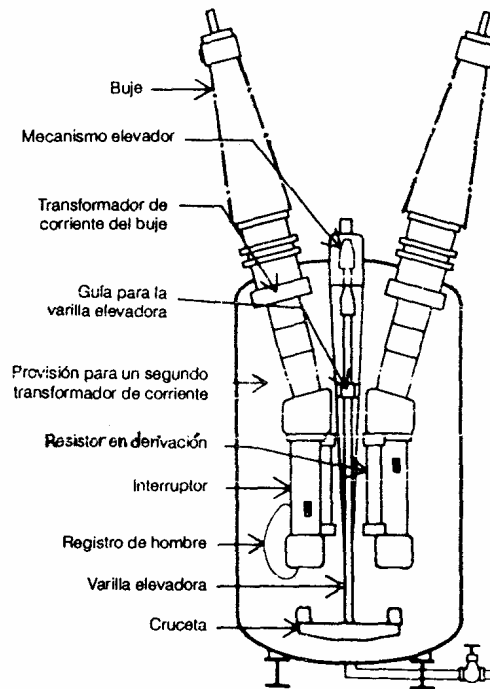


Fig. 1.2 Interruptor de gran volumen de aceite para redes de 161 kV.⁷

Para grandes tensiones y capacidades de ruptura cada polo del interruptor va dentro de un tanque separado, aunque el accionamiento de los tres polos es simultáneo por medio de un mando común.

Cada polo tiene doble cámara interruptiva conectadas en serie, lo cual facilita la ruptura del arco al repartir la caída de tensión según el número de cámaras.

En este tipo de interruptores, el mando puede ser eléctrico con resortes o compresora unitaria, según su capacidad interruptiva.

⁷ Fink D. y Beaty W. *Manual de ingeniería eléctrica*, cap. 10, p. 94.

1.5.2 Interruptor de pequeño volumen de aceite

Este dispositivo fue inventado en Suiza por J. Landry. Por el pequeño consumo de aceite, son muy utilizados en Europa, en tensiones de hasta 230 kV y de 2,500 MVA de capacidad interruptiva. En general se usan en tensiones y potencias medianas. Este interruptor utiliza aproximadamente un 5 % del volumen de aceite del caso anterior.⁸

Pueden ser fijos, para integración con interruptores recubiertos de metal, o montados juntos en plataformas con dispositivos apropiados para desconexión y enlace eléctrico.

Las cámaras de arqueo tienen la propiedad de que el efecto de extinción aumenta a medida que la corriente que se va a interrumpir crece. Por eso al extinguir las corrientes de baja intensidad, las sobretensiones generadas son pequeñas.

La mayoría de los interruptores tienen un mecanismo de operación con almacenamiento de energía que se carga manualmente. Si se requiere, este mecanismo también puede ser accionado por un motor, dotado de facilidades para el recierre y con diversas clases de dispositivos de liberación.

Para potencias interruptivas altas, el soplo de los gases sobre el arco se hace perpendicularmente al eje de los contactos, mientras que para potencias bajas, el soplo de los gases se inyecta en forma axial.

El desarrollo de los gases de extinción depende más de la corriente que de la tensión, lo que origina que la potencia de cortocircuito aumente constantemente con la tensión.

⁸ Raúll Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 96.

1.5.3 Interruptor neumático

En este interruptor (también conocido como de sople de aire comprimido) la extinción del arco eléctrico se realiza por medio de un chorro de aire a presión que barre el aire ionizado y por otro lado, sirve como medio de enfriamiento. (Figura 1.3).

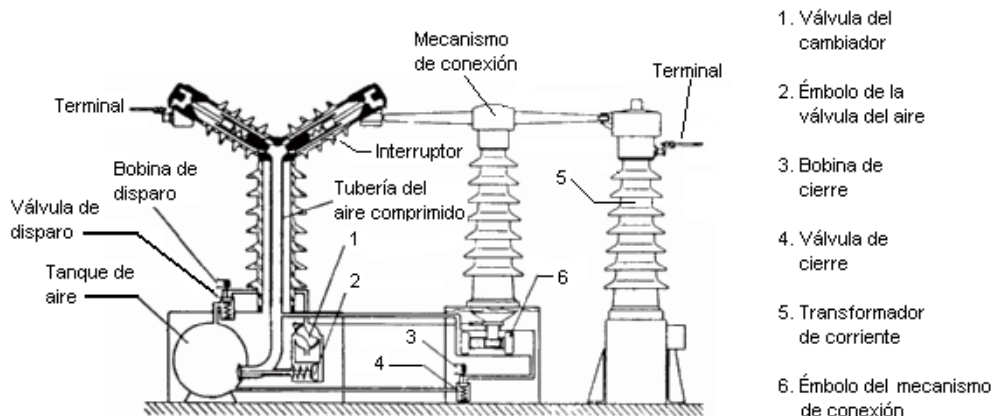


Fig. 1.3 Interruptor de aire comprimido.⁹

Sin embargo, el término de interruptor de aire comprimido se refiere a un aparato en específico ya que los interruptores neumáticos también pueden operar con otros gases como hidrógeno, dióxido de carbono y nitrógeno.¹⁰

Debido a que estos equipos se emplean en sistemas de potencia de hasta 800 kV es necesario conectar en serie varias cámaras de extinción con el fin de repartir la tensión entre el número de ellas y reducir la tensión de reencendido entre los contactos.

Los interruptores neumáticos pueden operar en forma modular (con su tanque de almacenamiento del gas y compresora propios) o en forma de estación central, en la que por medio de una compresora y una red de tuberías se inyecta el aire a cada uno de los interruptores conectados a dicha red. Sin embargo, este último arreglo presenta el

⁹ Weedy B. & Cory B. *Electric power systems*, p. 445.

¹⁰ Garzon, R. *High voltage circuit breakers*, p. 141.

inconveniente de que si hay una falla en el sistema neumático, todos los interruptores que dependen de él no operan.

A continuación se enumeran algunas de las ventajas e inconvenientes de estos interruptores:

Ventajas

- Operan en tiempos muy cortos (dos o tres ciclos) lo que reduce el desgaste de los contactos.
- Manejan potencias de corto circuito elevadas.
- No tienen el riesgo de incendio ni explosión que presentan los interruptores de aceite.

Inconvenientes

- Al tener menor rigidez dieléctrica que los interruptores de SF₆ necesitan presurizar el aire a valores más elevados.
- Debido a su rapidez de operación se producen grandes sobretensiones.
- Generan altos niveles de ruido.

Para reducir el problema de las sobretensiones, los fabricantes conectan en paralelo resistencias amortiguadoras y capacitores que producen altas impedancias y reparten las tensiones de las cámaras.

En años recientes se han hecho mejoras para reducir el consumo de aire y los niveles de ruido además de incrementar la capacidad de ruptura de estos equipos. Estas innovaciones consisten en mantener las cámaras de extinción presurizadas al máximo y por otro lado, durante la apertura operan las válvulas de escape unos milisegundos antes de la

separación de los contactos; después se cierran dichas válvulas mientras los contactos permanecen todavía abiertos.¹¹

1.5.4 Interruptores en hexafluoruro de azufre (SF₆)

Son aparatos que se desarrollaron al final de la década de los sesenta y cuyas cámaras de extinción operan dentro de un gas llamado hexafluoruro de azufre (SF₆) que tiene una capacidad dieléctrica superior a la de otros fluidos dieléctricos conocidos. Esto los hace más compactos y más durables.

En este tipo de interruptor, la cámara tiene un émbolo unido al contacto móvil que al abrir comprime el gas y lo inyecta sobre el arco, que es alargado, enfriado y apagado al pasar la corriente por cero. Su mecanismo de mando es generalmente un sistema de aire comprimido.

El SF₆ es un gas químicamente estable e inerte. Alcanza unas tres veces la rigidez dieléctrica del aire a la misma presión. A temperatura de 2,000 K conserva todavía alta conductividad térmica que ayuda a enfriar el plasma creado por el arco eléctrico facilitando su extinción. Físicamente tiene características electronegativas, o sea la cualidad de capturar electrones libres transformando los átomos en iones negativos, lo cual le confiere propiedades adecuadas para la ruptura del arco eléctrico y por lo tanto gran velocidad de recuperación dieléctrica entre los contactos después de la extinción.¹²

En los primeros interruptores se usaron dos presiones: la menor de 3 bar, llenando los tanques y la mayor de 18 bar, dentro de las cámaras de extinción. Esto se hizo con el fin de evitar que al momento de la apertura, el soplo del gas produjera enfriamiento y pasara al estado líquido. Posteriormente se ha usado una sola presión, con lo cual se disminuye el tamaño de los interruptores en un 40 %.¹³

¹¹ Garzon, R. *High voltage circuit breakers*, p. 146.

¹² Raúl Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 99.

¹³ Idem, p. 99.

Los interruptores pueden ser de polos separados, con cada fase en su tanque, o trifásicos en donde las tres fases utilizan una misma envolvente. Se fabrican para tensiones de 115 kV hasta 800 kV y las capacidades de interrupción varían de acuerdo con el fabricante, llegando hasta magnitudes de 80 kA.

Este tipo de dispositivos puede librar las fallas hasta en dos ciclos y para limitar las sobretensiones producidas por su velocidad de operación, los contactos vienen con resistencias limitadoras.

Las principales averías de estos interruptores son las fugas de gas que requieren aparatos especiales para detectar el punto de la fuga. En un interruptor bien instalado, las pérdidas de gas deben ser inferiores al 2 % anual del volumen total de gas encerrado dentro de la cámara.

En caso de pérdida total de la presión del gas y debido a la alta rigidez dieléctrica del SF₆, la tensión que pueden soportar los contactos cuando están abiertos es igual al doble de la tensión de fase a tierra. De cualquier forma, no es conveniente operar un interruptor de SF₆ cuando ha bajado su presión por una fuga y debe de ser bloqueado para evitar un accidente.

En los interruptores trifásicos la apertura de los contactos es simultánea, aunque conviene que haya *dispersión* de un milisegundo entre los tres polos; se entiende por *dispersión* a la diferencia en tiempo que existe entre los instantes de cierre del primero y el último polo del interruptor. El uso de la *dispersión* es importante, ya que sirve para reducir las sobretensiones debidas a impulsos por maniobra.

1.5.5 Interruptor de vacío

El principio de interrupción de este dispositivo se basa en que la cámara de extinción emplea un medio dieléctrico casi perfecto: el vacío; lo cual no permite el proceso

de ionización y por lo tanto no es necesario el soplado del arco ya que la corriente se extingue prácticamente a su paso por cero después del primer ciclo.¹⁴

Estos dispositivos tienen dos contactos (uno fijo y otro móvil) dentro de un recipiente hermético del cual se ha evacuado prácticamente todo el aire, manteniendo una presión de vacío de entre 10^{-6} y 10^{-9} bar. Debido a la presencia de partículas de metal ionizado en forma de vapor que se concentran en los contactos, cuando éstos se abren se produce un arco eléctrico a través del vapor metálico que se extiende a lo largo de la cámara hasta condensarse en las paredes de vidrio, rompiendo así el puente entre los electrodos y por lo tanto se interrumpe la corriente. (Figura 1.4).

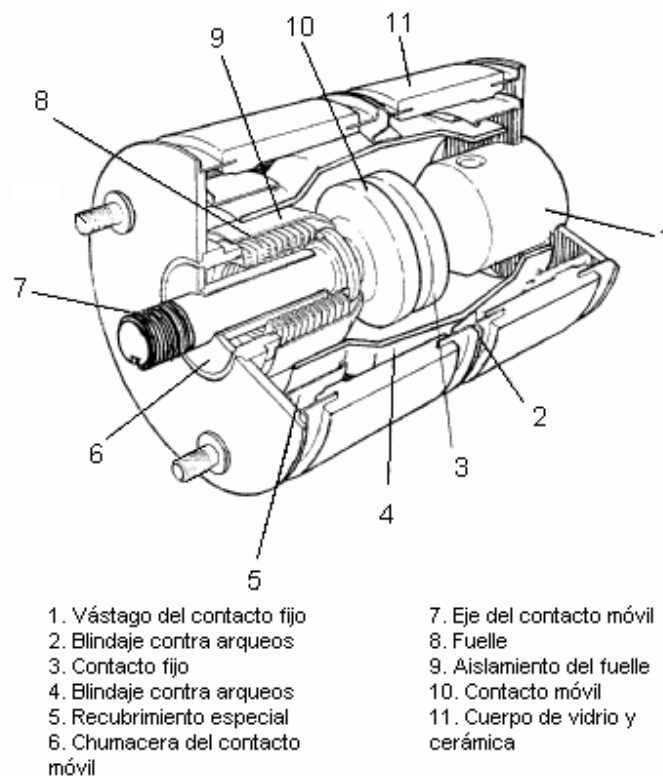


Fig. 1.4 Esquema de un interruptor de vacío.¹⁵

¹⁴ Raúl Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 100.

¹⁵ Weedy B. & Cory B. *Electric power systems*, p. 450.

Los interruptores de vacío se usan en instalaciones de hasta 38 kV y dependiendo de los fabricantes su duración es de unas 200,000 operaciones en vacío y alrededor de 10,000 con corrientes de hasta 600 A, lo cual se traduce en una vida útil de unos 20 años.¹⁶

Sus principales desventajas son la ligera emisión de rayos X durante su operación, la generación de sobretensiones (debido a su rapidez), y que por algún defecto o accidente no pueda mantenerse el vacío en la cámara.

A causa de sus tiempos cortos de operación, son adecuados para la interrupción y reconexión de líneas, además de emplearse para servicio de sincronización.¹⁷

1.5.6 Interruptor de aire magnético

Este dispositivo emplea un campo magnético intenso (generado por una bobina) para alargar y enfriar el arco eléctrico dentro de una canal especial hasta el punto en que ya no pueda ser mantenido por los voltajes del sistema y entonces se produce la interrupción.

Para un mejor desempeño y debido a que el efecto magnético es menor cuando el interruptor abre circuitos con corriente nominal, se emplea un sistema neumático el cual emite una ráfaga de aire comprimido hacia el arco forzándolo a entrar en la canal.¹⁸

Las capacidades de estos equipos son de hasta 15 kV y aunque se usan principalmente para interiores también se han llegado a emplear para servicio en exteriores conteniéndolos dentro de gabinetes a prueba de intemperie y acompañados por un sistema de calefacción para evitar la condensación interna de la humedad.

¹⁶ Raúl Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 101.

¹⁷ Fink D. y Beaty W. *Manual de ingeniería eléctrica*, cap. 10, p. 97.

¹⁸ Idem, cap. 10, p. 98.

1.6 Condiciones de interrupción críticas

Existen diversos casos en los cuales los interruptores de potencia son sometidos a pruebas muy severas que pueden ocasionar daños considerables e incluso la destrucción del dispositivo. Algunos de estos casos son los siguientes:¹⁹

a) *Falla en terminales.* En este rango se clasifican a las fallas que ocurren cercanas al interruptor. En este caso la oscilación del voltaje se amortigua por la resistencia propia del circuito y su frecuencia depende de las magnitudes de la inductancia y de la capacitancia del lado de la fuente.

b) *Falla en una línea corta.* En esta falla, la tensión de restablecimiento está dada por la diferencia de voltaje entre el lado de la fuente y el lado de la línea, con una frecuencia de oscilación del doble de la fundamental. Los primeros ciclos de la tensión transitoria tienen forma de diente de sierra lo que origina esfuerzos muy grandes en el dieléctrico del interruptor. La también llamada falla kilométrica es más intensa cuando ocurre entre los 3 y 5 km de distancia del equipo.

c) *Apertura en oposición de fases.* Esta situación se presenta cuando se realiza una conexión de fase equivocada pues el interruptor trata de cerrar contra un corto circuito. El resultado es una apertura violenta y se genera una sobretensión de hasta tres veces el voltaje de fase a neutro con una frecuencia de oscilación del doble de la fundamental.

d) *Apertura de corrientes inductivas.* Cuando se pretende desconectar un transformador excitado o un banco de reactores, las corrientes inductivas son reducidas por el interruptor antes de cruzar por cero; sin embargo, la energía almacenada en la inductancia del transformador genera sobretensiones que a su vez originan el reencendido del arco. El interruptor se ve afectado principalmente por los picos de sobretensión que surgen antes de la reaparición del arco.

¹⁹ Raúll Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 109-110.

e) *Falla evolutiva*. En este otro caso de apertura de corrientes inductivas, se presenta una sobretensión que puede provocar el arqueo de los aisladores exteriores produciendo un cortocircuito en la inductancia del transformador. Esto genera una onda viajera entre el transformador y el interruptor reencendiéndose este último, con la consecuente reaparición de la corriente de cortocircuito. Cuando se reinicia el arco, con la corriente de cortocircuito, la presión dentro del interruptor alcanza tal magnitud que puede ocasionar la explosión del mismo.

2.1 Generalidades e historia de los relevadores

Los relevadores son dispositivos electromagnéticos o electrónicos que se emplean para detectar anomalías en una red eléctrica y efectuar la apertura automática de los interruptores. El propósito de tales acciones es aislar (de manera rápida y confiable) a los equipos afectados del resto del sistema y limitar los daños que pudieran producirse por los esfuerzos eléctricos y mecánicos ligados a un cortocircuito.²⁰

Con los avances de la tecnología, los relevadores han evolucionado desde los robustos equipos electromecánicos (que generalmente podían realizar sólo una tarea específica) hasta los actuales dispositivos que emplean microprocesadores electrónicos lo cual ha permitido integrar diferentes relevadores en un gabinete único para ejecutar múltiples funciones. Esto ha facilitado la construcción de tableros más compactos que desempeñan operaciones no sólo de control y protección sino también de medición, comunicaciones y mando a distancia.

Según Raúl Martín, en su libro “Diseño de Subestaciones Eléctricas”, se pueden identificar cinco generaciones importantes en el desarrollo histórico de los relevadores.²¹

Primera generación: Fueron los primeros relevadores electromagnéticos y todavía se siguen utilizando en algunas subestaciones, principalmente por; razones económicas, el que hayan sido los primeros en aparecer, y el miedo al cambio, por el que los operadores les tienen una confianza mayor.

Segunda generación: Relevadores estáticos desarrollados en la década de 1960, son una analogía electrónica de los electromagnéticos. Se consideran de poca confiabilidad debido a que se ven afectados por interferencias electromagnéticas transitorias provocando operaciones erróneas; en su época su precio era superior al de los electromecánicos.

²⁰ Elmore, W. *Protective relaying theory and applications*, p. 1.

²¹ Raúl Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 416-417.

Tercera generación: Desarrollada a mediados de la década de 1960, se basó en circuitos integrados utilizando hasta 100,000 elementos por ficha. Son de mayor confiabilidad.

Cuarta generación: Se presentó en el decenio de 1980; se produjeron amplias mejoras funcionales y de seguridad por medio de circuitos electrónicos digitales.

Quinta generación: A finales del Siglo XX y con los avances en el desarrollo de los microprocesadores, se consiguió integrar en módulos compactos una gran variedad de funciones aprovechando las señales captadas de diferentes relevadores.

2.2 Clasificación

Existen diferentes formas para clasificar a los relevadores, por ejemplo, hay quienes los agrupan de acuerdo al tipo de señal que detectan: corriente, voltaje, impedancia, frecuencia, temperatura, etcétera.

Otros autores los clasifican según las funciones que desempeñan: relevadores de sobrecorriente, de distancia, de tiempo inverso, direccional, entre otros.

En cuanto a sus características constructivas y principio de operación se tienen los siguientes tipos:

- De atracción electromagnética.
- De inducción electromagnética.
- Electrónicos.
- Microprocesados.

Por ser ésta una clasificación más general, a continuación se describe el funcionamiento de cada uno de ellos.

2.2.1 De atracción electromagnética

Este relevador está formado por una bobina con núcleo magnético que produce una fuerza electromagnética cuando circula una corriente a través de ella; en uno de sus extremos tiene un contacto móvil que al ser atraído por dicha fuerza cierra el circuito de disparo al tocar al contacto fijo. Pueden ser de dos tipos: de bisagra y de émbolo. (Figura 2.1).

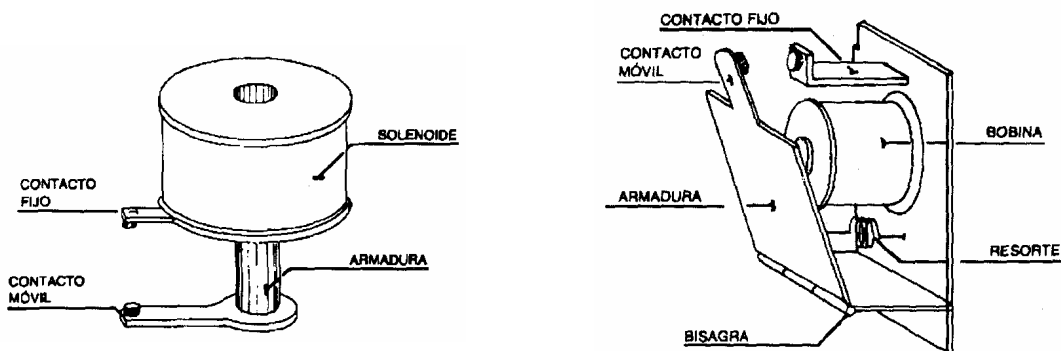


Fig. 2.1 Relevadores tipo émbolo y bisagra.²²

Suelen tener derivaciones en la bobina para permitir el ajuste de la corriente mínima de operación (*pick-up*) que es el valor preciso de corriente a partir del cual el relevador empieza a moverse. Pueden operar con corriente directa o alterna.

2.2.2 De inducción electromagnética

Este relevador se basa en el principio de operación del motor de inducción donde el estator tiene bobinas de corriente, o de corriente y potencial. Los flujos creados por las corrientes de tales bobinas inducen corrientes en el rotor (que sostiene al contacto móvil) produciéndose un par que lo hace girar hasta alcanzar al contacto fijo. El rotor se mueve contra un resorte calibrado que lo regresa al cesar la fuerza del par. (Figura 2.2).

²² Raúll Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 417-418.

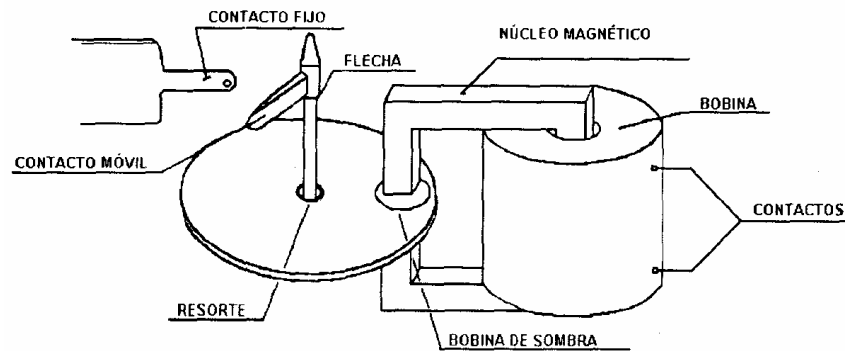


Fig. 2.2 Relevador de disco de inducción.²³

Los modelos más comunes de estos dispositivos son los de polos sombreados y los de tipo wáttmetro. Son muy utilizados en los esquemas que emplean alimentación en corriente alterna para el circuito de control.

2.2.3 Electrónicos

Es un relevador formado por unidades lógicas de estado sólido, que son componentes de baja corriente y trabajan con señales de voltaje de corriente directa. La unidad lógica sólo tiene dos estados: cero y uno, generalmente trabaja con una tensión de operación de 20 volts.

Los relés electrónicos (con relación a los electromagnéticos equivalentes) son más pequeños, más rápidos y tienen menor carga (*burden*); la mayor parte de ésta se debe a la fuente de poder. Los elementos principales de estos equipos son los siguientes:

- Fuente de tensión de corriente directa, con regulador, que hace autosuficiente la alimentación de energía.
- Rectificador de onda completa o fuente de la señal de disparo.
- Bobina que actúa sobre el contacto de disparo instantáneo y de la bandera de advertencia.

²³ Raúl Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 418.

2.2.4 Microprocesados

Son relevadores que utilizan microprocesadores para analizar, por medio de técnicas digitales, las señales provenientes de diferentes detectores. Tienen la ventaja de integrar múltiples funciones en un solo módulo (incluyendo sistemas de comunicación) esto permite que se puedan conectar con otros equipos para desempeñar tareas de supervisión, protección y mando a distancia. (Figura 2.3).



Fig. 2.3 Relevadores microprocesados.²⁴

Un relevador basado en microprocesadores está compuesto por una unidad de monitoreo enlazada con un sistema de adquisición de datos y elementos de mando situados junto a los equipos que se van a controlar; se conectan entre sí por medio de fibra óptica.²⁵

La unidad de monitoreo recibe información de manera constante y cuando se detecta una falla, analiza las variables del sistema, verifica los eslabones de comunicación y envía señales para ejecutar diferentes órdenes.

²⁴ Siemens. *Catalog of relays*, 2002, p. 4.

²⁵ Raúl Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 459.

Con la tecnología que ofrecen estos relevadores, no sólo se protegen los diversos equipos que integran un sistema de potencia, sino que además permiten ejecutar operaciones de control y monitoreo permanente de cada uno de ellos. Por ejemplo, cuando se presenta un problema, se registran los eventos producidos como variaciones de voltajes y corrientes de cada fase, cambios de frecuencia, excesos de temperatura en los devanados de transformadores y máquinas rotatorias, entre otros. Adicionalmente, se especifica el tipo de falla, su duración y localización; cuáles fueron los relevadores que operaron y se archivan la fecha y hora del suceso. Todo lo anterior puede ser almacenado en la memoria de las computadoras enlazadas con los equipos de protección y también es posible imprimir la información o guardarla en discos de respaldo.

2.3 Comparación entre los relés electromecánicos y los microprocesados

Conforme los sistemas de potencia han crecido en capacidad y tensión, las protecciones se han ido complicando tanto en su lógica como en la cantidad y calidad de sus componentes. Hay sistemas que por un lado, tienen líneas cortas densamente cargadas y con varios circuitos en paralelo; por el otro, poseen líneas muy largas que enlazan a plantas de gran capacidad de generación con centros de alta densidad de consumo. Por ello, se requieren relevadores cada vez más rápidos, precisos y confiables para mantener la continuidad del fluido eléctrico cuando se presentan diversos problemas como sobrecargas, variaciones de frecuencia, corrientes de corto circuito, etcétera. Los relevadores microprocesados ofrecen múltiples ventajas sobre los electromecánicos y con el desarrollo de la electrónica de potencia y las comunicaciones, se están usando con mayor frecuencia en diversas subestaciones y plantas generadoras.²⁶

Por ejemplo, los equipos con microprocesadores producen menor saturación en los transformadores de corriente, principalmente en esquemas en los que el cableado y el equipo de control representan una carga (*burden*) importante.

²⁶ Raúl Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 456.

Igualmente están diseñados para operar con las curvas básicas de corriente-tiempo, es decir, trabajan instantáneamente o con tiempo inverso, muy inverso y extremadamente inverso. Son más resistentes a los impactos y sacudidas. Son más precisos debido a la mayor resolución en sus derivaciones. Como tienen un mínimo de partes móviles, sus márgenes de coordinación son menores y en consecuencia el tiempo de libramiento de una falla se reduce. Su costo es mayor que el de los convencionales, por eso su uso depende del análisis técnico y económico más adecuado.

Sin embargo, también presentan algunas desventajas como son la susceptibilidad a interferencias electromagnéticas causadas por la maniobra de interruptores de potencia, uso de radiotransmisores y descargas atmosféricas; esto hace necesario acompañarlos con filtros para acondicionar las señales de entrada y evitar operaciones erróneas. Su fuente de poder debe proporcionar una buena regulación de tensión porque los circuitos electrónicos suelen ser afectados por los cambios bruscos de voltaje. También deben estar adecuadamente aterrizados y protegidos contra picos de corriente y voltaje.

2.4 Características requeridas

Las características necesarias para que los relevadores de protección lleven a cabo su función en forma apropiada son: sensibilidad, selectividad, rapidez y confiabilidad.

2.4.1 Sensibilidad

La sensibilidad es la habilidad de un relevador para trabajar en forma confiable bajo la condición real que produce la mínima tendencia a operar. Por ejemplo, un relevador de sobrecorriente debe ser lo suficientemente sensible para actuar ante el valor de corriente de falla mínima esperada.²⁷

²⁷ Hintze, A. *Apuntes de protección de sistemas eléctricos*, p. 24.

2.4.2 Selectividad

Es la característica de un relevador para diferenciar entre las condiciones que requieren acción inmediata y aquellas otras para las cuales no se requiere ninguna o bien, se necesita con retraso de tiempo. Los relevadores deben de ser capaces de reconocer las fallas que ocurren dentro de su zona de influencia e ignorar, en ciertos casos, a aquellas que están fuera. El propósito de dichas acciones es que para una condición de falla, el número de equipos desconectados sea mínimo y en consecuencia se le interrumpa el servicio al menor número de clientes posible.

2.4.3 Rapidez

Es la cualidad que tienen los relés para operar en el periodo de tiempo requerido ya que entre más pronto se despeje una falla, se reducen los daños que pudiera ocasionar la corriente de corto circuito. Esto significa limitar los esfuerzos térmicos y dinámicos en transformadores, líneas y otros equipos en el menor tiempo posible; además se impide que el sistema salga de sincronismo. La rapidez depende de la magnitud de la falla y de la coordinación con otras protecciones.²⁸

2.4.4 Confiabilidad

La confiabilidad es la característica que nos asegura que cualquier relevador operará cuando más se le necesita. La confiabilidad no sólo depende de la experiencia que tengan los fabricantes, también influyen los estudios, la selección e instalación de las diversas protecciones que se hagan de un sistema de potencia en particular.

2.5 Tiempos de operación de los relevadores

De acuerdo con la rapidez de operación, los relevadores se pueden agrupar en los siguientes tipos:

²⁸ Hintze, A. *Apuntes de protección de sistemas eléctricos*, p. 25.

- *Instantáneos.* Aquellos que actúan en tiempos menores de 0.1 segundos.
- *De alta velocidad.* Son los que operan en menos de 0.05 segundos.
- *Con retraso de tiempo.* Son los que tienen un mecanismo para ajustar el tiempo de disparo. Las curvas corriente-tiempo que presentan estos equipos suelen ser clasificadas como de tiempo inverso, muy inverso y extremadamente inverso. (Figura 2.4).

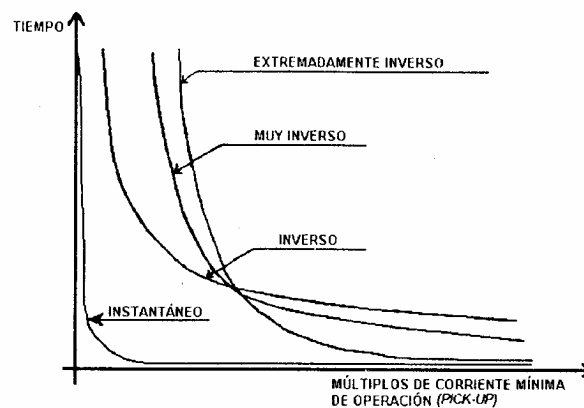


Fig. 2.4 Curvas corriente-tiempo para relevadores.²⁹

Los relés de tiempo inverso tienen una curva un tanto lineal que les confiere una operación relativamente rápida ya sea con una o varias fuentes de alimentación simultáneas. Se usan en sistemas con amplias variaciones en las corrientes de corto circuito que dependen principalmente de la capacidad de generación del sistema.

Los de tiempo muy inverso poseen una curva con pendiente muy pronunciada lo cual los hace lentos para corrientes bajas y rápidos para corrientes altas. Se utilizan donde el valor de la corriente de cortocircuito depende de la posición relativa al lugar de la falla y no de la cercanía al sistema de generación.

²⁹ Raúll Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 421.

Los de tiempo extremadamente inverso tienen una curva con una pendiente aún más pronunciada que los anteriores. Se utilizan en circuitos de distribución primaria (que presentan grandes corrientes iniciales producidas por los recierres) y no obstante ello, suministran un disparo rápido cuando se necesita la operación ante cortocircuito.

2.6 Zonas de protección

Los sistemas de protección se basan en diferentes diagramas esquemáticos con relevadores que salvaguardan un conjunto de equipos en distintas zonas o regiones de un circuito de potencia; en cada una de ellas conviene contar con dos juegos de protecciones que en lo posible, deben ser lo más independientes de modo que si uno falla el otro lo respalda. Para aumentar la protección de los sistemas eléctricos también se acostumbra traslapar dichas zonas, pues en caso contrario, al presentarse un problema en la frontera entre ellas ningún interruptor operaría. (Figura 2.5).

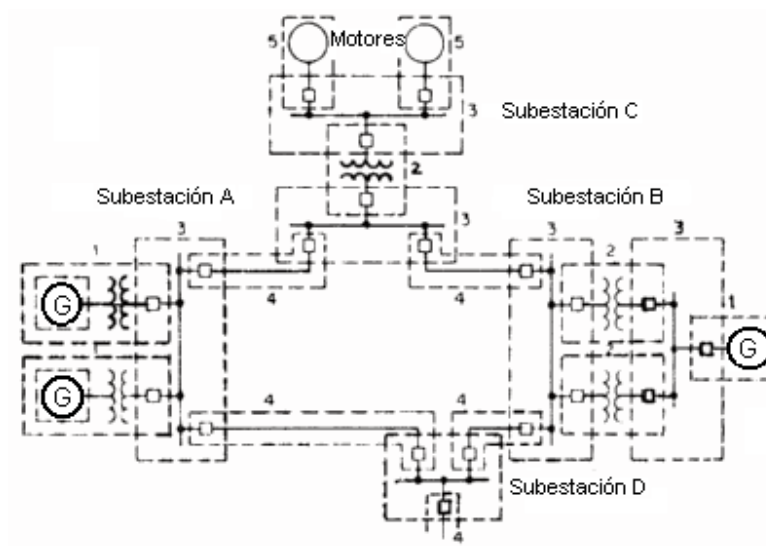


Fig. 2.5 Zonas de protección.³⁰

³⁰ Weedy B. & Cory B. *Electric power systems*, p. 452.

Los transformadores de corriente son los elementos que físicamente delimitan las zonas de protección y se localizan en ambos lados de cada uno de los interruptores formando juegos de tres unidades monofásicas.

Dependiendo de la zona en que actúan y los equipos que resguardan, los relés pueden ser clasificados como sistemas de protección:

- Primaria o principal.
- Secundaria o de respaldo.
- De respaldo remoto.

2.6.1 Protección primaria

Es la que debe operar en primer lugar y con la mayor rapidez posible. Se diseña de tal manera que aisle al elemento que falló y desconecte la menor porción de equipos de un sistema de potencia tomando en consideración lo siguiente:

Cualquier falla que ocurra dentro de una zona determinada deberá disparar todos los interruptores que envían energía a esa región.

Se deben considerar las zonas de traslape de tal manera que en caso de producirse una falla en cualquiera de ellas se abran todos los interruptores que alimentan a ambas.

2.6.2 Protección secundaria

Es la protección que actúa cuando la principal no responde o no funciona correctamente; generalmente inhabilita una mayor porción del sistema. Opera mediante componentes independientes de las que se utilizan en la protección primaria, de manera que no se vea afectada por las mismas causas que produjeron la falla en esta última.

Los relevadores que se emplean como protección secundaria operan con cierto retraso respecto a las protecciones primarias para dar tiempo a que éstas realicen su trabajo.

2.6.3 Protección de respaldo remota

Es una protección que se activa cuando han fallado las protecciones principal y secundaria. Se considera como un tercer grado de protección que opera por medio de las primarias y abre los interruptores que alimentan la falla.

Es independiente del suministro local de energía y para implementarla suelen emplearse relevadores de sobrecorriente, de distancia y de alta velocidad; su señal de disparo se envía a través de hilo-piloto (para distancias menores a 20 km) o por medio de onda-portadora (*carrier*) para longitudes mayores.

2.7 Relevadores más comunes

Debido a que el tema de relevadores de protección es muy amplio y excede los alcances de esta tesis, a continuación se describen solamente algunos de los más empleados en las redes de potencia eléctrica.

2.7.1 Relevador de sobrecorriente

Es el tipo más sencillo de protección. Como lo indica su nombre, se trata de un dispositivo diseñado para operar cuando se presenta un excesivo valor de corriente en el equipo o circuito protegido. Existen dos formas básicas de estos relés: instantáneo y con retraso de tiempo.

El relevador de sobrecorriente instantáneo opera de manera inmediata cuando la corriente excede el valor de ajuste. Dependiendo del modelo y marca, su tiempo de operación puede variar entre 0.016 segundos y 0.4 segundos. De acuerdo con las normas ANSI, su número de función es el 50.

El relevador de sobrecorriente con retraso de tiempo funciona de tal modo que su tiempo de maniobra varía con la intensidad de la corriente, a mayor corriente menor es el tiempo de operación. Su número de función es el 51.

En la Figura 2.6 se muestra un esquema sencillo de un relé de sobrecorriente.

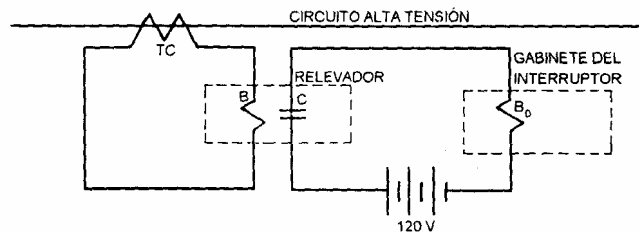


Fig. 2.6 Relevador de sobrecorriente.³¹

2.7.2 Relevador direccional

Es un relevador que tiene la característica de comparar magnitudes o ángulos de fase y además distingue la dirección de la corriente ante una falla, pues detecta su flujo en un sentido y omite el de la dirección contraria. Está compuesto por dos bobinas: una de operación y otra de polarización. De acuerdo a las señales que emplea, existen tres modelos:

Tipo corriente-corriente. Compara dos señales de corriente provenientes de diferentes alimentaciones.

Tipo tensión-corriente. Coteja una señal de tensión con otra de corriente.

Tipo tensión-tensión. Compara dos señales de voltaje de distintas fuentes.

³¹ Raúl Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 413.

Para el primer caso, el relevador maneja una corriente de polarización (I_p) y otra de operación (I_o) que provienen de dos juegos diferentes de transformadores de corriente. La de polarización sirve como referencia para comparar respecto a ella el ángulo de fase de la de operación; esto es debido a que el ángulo de fase de I_p es un valor fijo mientras que el de I_o es variable.³² Su número de función es el 67.

2.7.3 Relevador diferencial

Como su nombre lo indica, es un relevador que trabaja mediante una diferencia de corrientes. Es el dispositivo que brinda la protección más selectiva ya que su zona de protección está definida por los transformadores de corriente (TC) ubicados en los extremos del equipo protegido, por lo tanto sólo compara las corrientes de entrada y salida sin involucrar condiciones externas. Su número de función es el 87 y la letra usada como sufijo indica el equipo que resguarda: B-Barras, T-Transformador o G-Generador.³³

El relevador diferencial más usado es el de porcentaje, que está integrado en su forma más elemental por tres bobinas: una de operación O y dos de restricción R según se observa en la Figura 2.7.

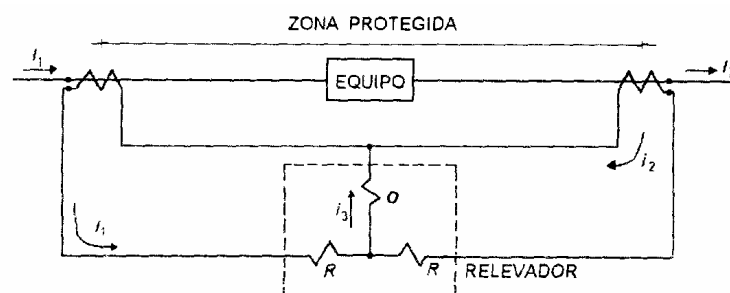


Fig. 2.7 Relevador diferencial.³⁴

³² IEEE. *The red book*, p. 198.

³³ CFE. *Procedimiento para coordinación de protecciones de sobrecorriente en sistemas de distribución*, p. 32.

³⁴ Raúll Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 437.

La corriente resultante en la bobina de operación será proporcional a la resta vectorial entre la corriente que entra (I_1) y la que sale del circuito protegido (I_2), es decir

$$I_3 = I_1 - I_2$$

y la corriente en cualquiera de las bobinas de restricción es

$$\frac{I_1 + I_2}{2}$$

Cuando no hay falla o bien, si ésta ocurre fuera de la zona de protección, la corriente I_3 vale cero porque $I_1 = I_2$; por el contrario, cuando $I_3 \neq 0$ se acciona el relevador y manda a abrir los interruptores conectados a él.

La relación entre la corriente diferencial de operación y el promedio de la corriente de restricción se conoce como la "pendiente del relevador" en por ciento:

$$Pendiente = K = \frac{I_1 - I_2}{\frac{I_1 + I_2}{2}}$$

Los relevadores tienen diferente por ciento de pendiente. Esta característica se utiliza para evitar falsas operaciones causadas por desequilibrios en las corrientes de los TC cuando ocurren fallas externas. Los desequilibrios se pueden presentar por:

- Operar el cambiador de derivaciones.
- Falta de correspondencia entre las relaciones de los TC y las derivaciones del relevador.
- Diferencia de error entre los TC de alta y baja tensión.

Para ajustar con mayor precisión las corrientes que entran y salen de la zona protegida, y si en ésta se considera un banco de transformadores, es necesario compensar la corriente de excitación por medio de una serie de derivaciones que tiene el relevador. También es importante verificar que todos los TC tengan la misma relación de transformación.

2.7.4 Relevador de distancia

Se basa en la comparación de la corriente de falla, detectada por el relevador, contra la tensión proporcionada por un transformador de potencial con lo cual se hace posible medir la impedancia de la línea al punto de falla. Normalmente, la impedancia es una medida eléctrica de la distancia (a lo largo de una línea de transmisión) desde la subestación hasta el lugar donde ocurre el problema. Tiene asignado el número de función 21.

Los relevadores de distancia tienen su mayor aplicación en la protección de líneas, en donde se requiere la operación selectiva de interruptores en cascada, y también en los casos en que las corrientes de carga pueden ser mayores que las de cortocircuito. Asimismo, se emplean en la protección de motores y generadores. Los más utilizados son los siguientes:

Tipo impedancia. En este caso la medición de la impedancia ($Z = V \div I$) se realiza por medio de la comparación de una señal de voltaje contra una de corriente. El aparato se pondrá en operación para cualquier magnitud de Z menor que un valor previamente establecido. La pendiente de la característica de funcionamiento puede ajustarse de tal modo que el relevador responderá a todos los valores de impedancia menores a un límite superior predeterminado.

La característica de funcionamiento del relevador de impedancia se muestra en el siguiente diagrama R-X. (Figura 2.8).

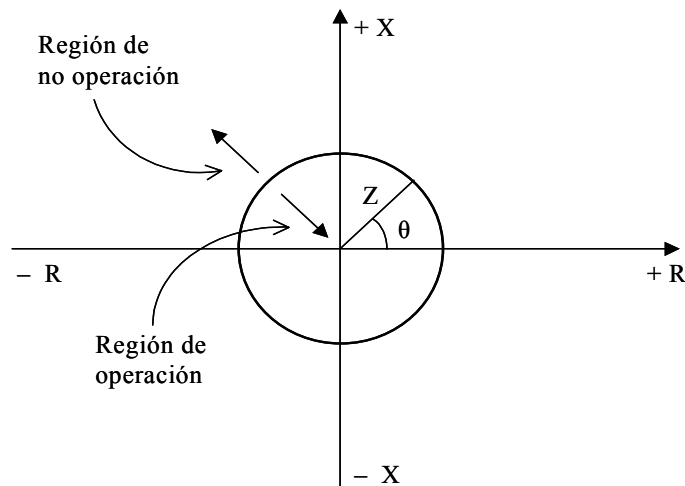


Fig. 2.8 Característica de operación de un relé de impedancia.

Dado que el funcionamiento del relevador de impedancia es prácticamente independiente del ángulo de fase entre la corriente y el voltaje, su característica de operación es un círculo con centro en el origen. Cualquier valor de Z menor que el radio del círculo provocará el funcionamiento del equipo.

Este relevador se utiliza para protección contra fallas entre fases en líneas de longitud media. Por sí solo no es direccional, necesita incluir un relevador direccional para medir la impedancia en un solo sentido.

Una consideración adicional aplicable a los relevadores de impedancia es el *sobrealcance*.

El *sobrealcance* es la tendencia de estos relevadores a funcionar ante un valor de impedancia mayor al que fueron ajustados. Este fenómeno se presenta cuando ocurre un cortocircuito, pues inicialmente, la onda de la corriente está propensa a descentrarse. Para compensar el *sobrealcance* y las imprecisiones en las fuentes de corriente y tensión, los

relevadores se ajustan para funcionar entre un 10 % y 20 % menos de la impedancia original.³⁵

Tipo admitancia o Mho. Es una combinación de relevador de impedancia y direccional, se utiliza para proteger fallas entre fases o pérdidas de excitación en generadores o en grandes motores síncronos. Este tipo de unidad tiene un elemento de tensión de retención que se opone al elemento direccional.

2.7.5 Relevador de temperatura

Este dispositivo en realidad es un termómetro acondicionado con micro-interruptores calibrados a temperaturas específicas y opera cuando se exceden esos valores de ajuste. Se emplean para el arranque de un grupo de ventiladores (para el caso de transformadores) así como para mandar una señal de alarma o disparo y efectuar la desconexión de carga. Por ejemplo, el relé con número de función 49T se utiliza para detectar sobrecalentamientos en los devanados de transformadores.³⁶

2.7.6 Relevador de presión

Es un aparato empleado para detectar y desfogar los excesos de presión que se producen en el interior de los transformadores a causa de una falla. Al igual que en el caso anterior, consta de un micro-interruptor que se activa cuando un diafragma detecta una sobre-presión. Recibe el número de función 63P.

2.7.7 Relevador de fluido y presencia de gases

Este relé mejor conocido como *Buchholz* se emplea para la protección de transformadores que tienen tanque conservador, funciona como una trampa de gases entre

³⁵ Mason, R. *El arte y la ciencia de la protección con relevadores*, p. 110.

³⁶ CFE. *Procedimiento para coordinación...*, op. cit., p. 32.

los tanques principal y conservador; por otro lado, sirve para detectar el flujo inverso del líquido dieléctrico. Tiene asignado el número de función 63T.

2.7.8 Relevadores auxiliares

Son aquellos dispositivos que se emplean como complemento de los esquemas de protección pues sirven para diferir la función del relevador principal que acompañan; están compuestos por uno o varios pares de contactos que abren o cierran un circuito de control cuando su bobina se energiza, de este modo pueden realizar rutinas de transferencia, bloqueo, sellado o aumento de la capacidad de operación.³⁷

Por lo general reciben el número de operación del relé principal agregándose como sufijo la letra X. Sin embargo, existen relevadores que tienen una función propia y definida que auxilian a otros, tal es el caso del dispositivo 86 (bloqueo sostenido) que acompaña generalmente al relé 87 (protección diferencial).

2.7.9 Relevador de recierre

Es uno de los dispositivos más empleados en los sistemas de energía donde es importante mantener la continuidad del servicio. El relé de recierre permite la reconexión automática de un interruptor que ha sido abierto por su propio sistema de protección. Le corresponde el número de función 79 y puede programarse para actuar de manera instantánea o con retraso de tiempo.³⁸

Dependiendo del tipo de falla, que puede ser *transitoria* o *permanente*, el dispositivo de recierre realizará un número determinado de intentos de cierre o bien, se bloqueará automáticamente.

³⁷ Elmore, W. *Protective relaying theory and applications*, p. 1.

³⁸ CFE. *Procedimiento para coordinación...*, op. cit., p. 33.

Una *falla transitoria* (también llamada temporal) es aquella que desaparece algunos segundos después de haber ocurrido; por ejemplo, la caída de un rayo que contornea un aislador sin perforarlo o el contacto de la rama de un árbol con un conductor energizado. En tales casos, el primer recierre se puede efectuar un instante después de que ha ocurrido la falla; no obstante, si ésta todavía perdura se realizará un segundo intento con cierto retardo para dar más tiempo a que el problema desaparezca.

Una *falla permanente* es un suceso que debido a su gravedad sólo puede ser eliminada cuando el personal encargado revisa y repara la parte dañada del sistema. Ejemplos de tal situación pueden ser: un cortocircuito en los devanados de un transformador o dentro de un cable, el corte de líneas por la acción de fenómenos naturales o sabotaje; entre otros. En estos casos, los relevadores de recierre están programados para bloquearse cuando se han ejecutado un número establecido de intentos de cierre y la falla aún se mantiene.

La maniobra del recierre somete a los interruptores y sus mecanismos a condiciones severas de trabajo, pues muchas veces el interruptor cierra cuando la falla todavía no ha sido despejada, es decir, intenta cerrar ante un cortocircuito y tiene que volver a abrir de manera inmediata. Por lo tanto, los interruptores y accesorios empleados para estas acciones deben ser reforzados en sus elementos tanto eléctricos como mecánicos.³⁹

2.7.10 Relevador de hilo-piloto

Este relevador es un sistema de protección diferencial adaptado para el caso en que los transformadores de corriente se encuentren muy alejados. Su principio de operación consiste en comparar las corrientes entrantes y salientes de una línea de transmisión y cuando la diferencia es apreciable, se envía la orden de apertura a los dos interruptores extremos de la línea. Pueden funcionar con corriente alterna o directa; sin embargo, el relé de alterna es inmune a variaciones de carga o pérdida de sincronismo, por lo que se emplea mayormente.

³⁹ Raúll Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 112.

Su principal aplicación es actuar como protección de respaldo en líneas con longitudes inferiores a 20 km; para distancias mayores se acostumbra utilizar el sistema de onda portadora que maneja señales de baja tensión y alta frecuencia transmitidas a lo largo de los conductores de la línea de transmisión, por medio de dos sistemas de acoplamiento instalados en los extremos.

En la Figura 2.9 podemos observar el diagrama de una protección de hilo-piloto.

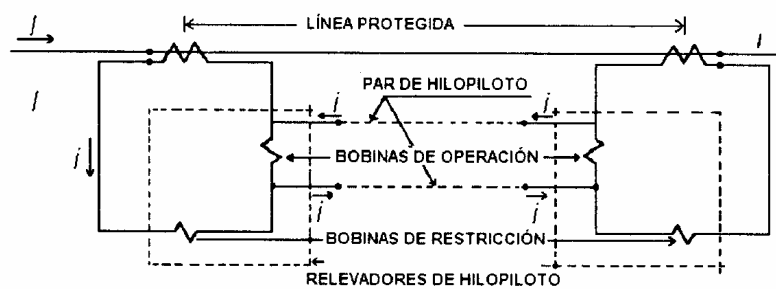


Fig. 2.9 Protección de hilo-piloto.⁴⁰

⁴⁰ Raúl Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 438.

3.1 El Controlador Lógico Programable (PLC)

El PLC es un dispositivo electrónico basado en microprocesadores que sirve para desempeñar tareas de control automático y supervisión de procesos industriales de diversos tipos y grados de complejidad.⁴¹



Fig. 3.1 Controladores lógicos programables.⁴²

Por medio de un programa, que se almacena en la unidad de memoria, se establecen las condiciones bajo las cuales debe trabajar el aparato. De este modo, el PLC recibe información proveniente de diferentes elementos de entrada como interruptores (*switches*), botones de presión o momentáneos (*push-buttons*), contactos auxiliares, interruptores activados por presión o temperatura, etcétera; verifica el programa y activa los equipos conectados a la salida que pueden ser luces indicadoras, solenoides, relés auxiliares, arrancadores e incluso otros controladores.

Básicamente puede decirse que un PLC sirve para realizar las mismas funciones que llevarían a cabo un grupo de relevadores convencionales en un circuito de control, pero con las ventajas de poder reprogramar el sistema, verificar su operación desde una computadora y sobre todo sin la necesidad de efectuar conexiones complicadas. Dependiendo del modelo y fabricante, un solo PLC puede contener varias decenas e incluso centenas de funciones de

⁴¹ Webb J. & Reis R. *Programmable Logic Controllers*, p. 4.

⁴² Schneider-Electric Co. Controlador *TSX*, s/p.
ABB Robotics. Controlador *CS31*, s/p.

relés lo cual significa un ahorro en espacio, tiempo, dinero y esfuerzo con respecto a los esquemas alambrados con relevadores electromagnéticos.

Adicionalmente, un PLC tiene temporizadores y contadores para efectuar, con un tiempo o cuenta predeterminados, alguna acción. También se puede ejecutar un programa en forma total o parcial mediante las funciones **relé de control maestro** (*master control relay*) y **salto** (*jump*) que se verán más adelante.

3.2 Desarrollo histórico

A principios de la década de 1970 se desarrollaron los primeros PLC's a partir de las computadoras de entonces. Su principal aplicación fue en las plantas industriales que efectuaban algunos de sus procesos en forma automática. La aparición del PLC significó un gran adelanto sobre los circuitos de control tradicionales pues su menor tamaño y la cualidad de poder ser programados varias veces disminuyeron la cantidad de materiales como cables, relevadores auxiliares, temporizadores, entre otros; además la modificación frecuente de los esquemas de control (que era cuestión de semanas) pasó a ser labor de unos cuantos días.

Sin embargo, uno de los mayores problemas con los PLC's de aquella época era su programación. Los programas se realizaban en lenguajes un tanto complicados y por lo mismo se requería de personal altamente capacitado. Con la introducción de los microprocesadores, a finales de los 70's, los sistemas electrónicos se volvieron más sofisticados y en consecuencia los controladores lógicos pudieron ser programados en lenguajes más comprensibles para la mayoría de los técnicos e ingenieros.⁴³

Durante el decenio de 1980, el mercado de los PLC's se extendió rápidamente a casi todas las industrias para automatizar sus métodos de producción y desde mediados de los 90's se han venido utilizando en otras ramas distintas a los procesos de manufactura. Por ejemplo, se han empleado PLC's para el control de aparatos de exámenes clínicos y

⁴³ Webb J. & Reis R. *Programmable Logic Controllers*, p. 5.

biomédicos; asimismo, en los modernos edificios se valen de PLC's para manejar y supervisar los sistemas de seguridad y contra incendio, iluminación, elevadores, climatización de espacios, entre otras aplicaciones.

3.3 Ventajas de los PLC's

Flexibilidad. Los circuitos de control tradicionales necesitan varios relés auxiliares y otros equipos que son interconectados a través de una maraña de cables y terminales, con un PLC, a pesar de emplear la misma lógica de los relevadores del circuito original, los empalmes se hacen en forma interna por medio de un programa y las únicas conexiones físicas que se realizan son las de aquellos equipos que van a la entrada y salida del controlador.

Tamaño. Además de facilitar el alambrado, la gran cantidad de relés internos, temporizadores y contadores que contiene un solo PLC permite añadir nuevas tareas a un circuito sin la necesidad de adquirir otros dispositivos ni modificar las dimensiones de los tableros de control.

Programación. El lenguaje empleado en la programación de un PLC no solamente es sencillo, también permite la modificación de los programas cuantas veces sea necesario; esto simplifica los cambios que frecuentemente se hacen en los circuitos de control ya que no se realizan conexiones engorrosas.

Supervisión del programa. Una de las mayores ventajas de un PLC es que antes de ser instalado en forma definitiva, cualquier programa puede ejecutarse en un laboratorio o centro de pruebas. Esto permite evaluar el desempeño del proyecto (y corregir errores, en caso de haberlos) sin el riesgo de afectar a los demás equipos que integran un esquema de control.

Rapidez de operación. Debido a que un PLC está compuesto por circuitos electrónicos modernos, los tiempos de ejecución de un programa son del orden de milisegundos.

Respaldo de la información. El *software* de un PLC permite que los programas desarrollados puedan ser almacenados en una computadora personal o en discos, también existe la opción de imprimir los proyectos para una mayor referencia.

Costo. La gran diversidad de funciones que puede desempeñar un PLC amortiza su costo con respecto a los circuitos alambrados con equipos electromecánicos convencionales. Por otra parte, con los avances tecnológicos de hoy, los PLC's cada vez son más sofisticados y su precio es menor en comparación con los primeros modelos.

Seguridad. Todos los PLC's tienen interruptores especiales (algunos de los cuales requieren de una llave) para prevenir que personal no autorizado active, detenga o modifique cualquier programa.

3.4 Consideraciones importantes sobre el uso de los PLC's

Falibilidad. Como todos los sistemas creados por el hombre, los PLC's no son infalibles por lo que dependiendo de la importancia del proceso de control, a veces es necesario emplear equipos de respaldo como relevadores auxiliares o interruptores de emergencia.

Cuestiones económicas. Para aquellas aplicaciones en las que los circuitos de control rara vez requieren de modificaciones en su diseño original, conviene más el emplear relevadores convencionales en lugar de un PLC ya que éste no sólo podría resultar más caro sino también su aprovechamiento sería mínimo. Los PLC's son más útiles en aquellos procesos donde los cambios en la configuración de los circuitos son frecuentes.

Especificaciones técnicas. Antes de pensar en un PLC, es muy importante estudiar a detalle el proceso de control y las condiciones bajo las cuales trabajará el controlador, pues aparte de los valores de corriente y voltaje que manejará, hay que tomar en cuenta si existen ambientes corrosivos o inflamables, temperaturas extremas, vibraciones, entre otros factores adversos que pudieran ocasionar operaciones erróneas e incluso daños al aparato.

3.5 Partes de un PLC

3.5.1 Unidad Central de Proceso (CPU)

Es el "cerebro" del sistema el cual a su vez lo integran un microprocesador, una memoria y una fuente de alimentación. (Figura 3.2).

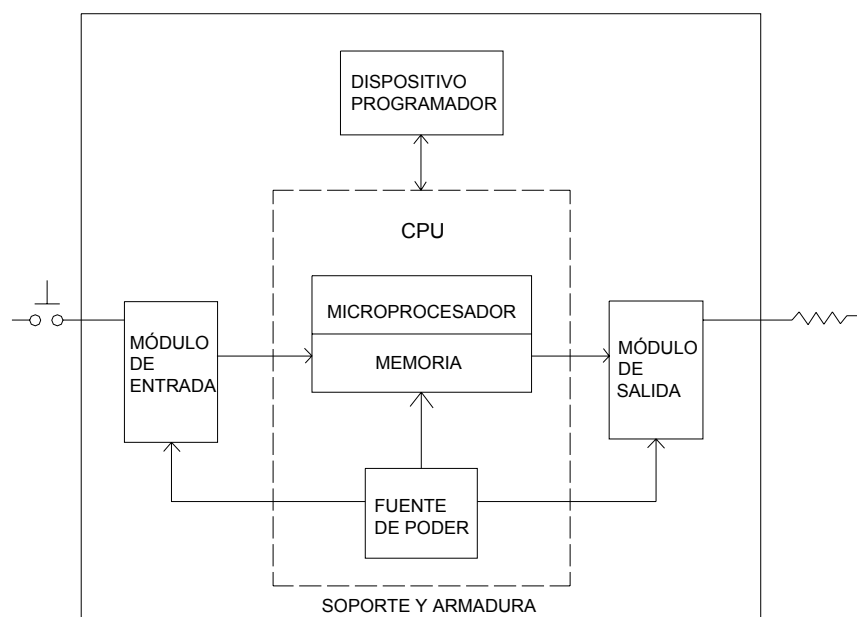


Fig. 3.2 Partes de un PLC.⁴⁴

- El microprocesador es el dispositivo donde se efectúan todas las operaciones lógicas y matemáticas del sistema.

⁴⁴ Webb J. & Reis R. *Programmable Logic Controllers*, p. 9-10.

- La memoria es el área de la CPU donde se almacena la información, el *software* del sistema y el programa del usuario.
- La fuente de alimentación proporciona el suministro de energía para que el PLC funcione adecuadamente. Esta es la parte del equipo que convierte el voltaje de CA (127 ó 220 V) a valores de CD propios de los circuitos internos del controlador.

Dependiendo del modelo y fabricante de PLC's, la CPU varía en tamaño o capacidad por lo que es importante analizar la complejidad del proceso de control para el cual se va a emplear. En algunas CPU's la memoria puede ser expandida de acuerdo a las necesidades del sistema.

La memoria de la CPU se divide en dos tipos: una de sólo lectura (ROM), en donde el *software* del sistema es retenido permanentemente, y otra de acceso aleatorio (RAM) en la cual se almacena el programa del usuario. Cuando se interrumpe el suministro de energía, la memoria ROM se conserva mientras que la RAM se pierde, por ello es importante que el usuario guarde su programa en la ROM una vez que lo ha verificado y desea salir del sistema; también es posible almacenar los programas en discos o en una computadora personal para después transferirlos al PLC cuando sea necesario.

Por otro lado, los fabricantes de PLC's han dotado a sus CPU's de una batería de respaldo que mantiene en funcionamiento el programa cuando se presentan problemas con el suministro de energía.

La CPU también tiene interruptores especiales que funcionan como sistemas de seguridad para evitar que personal no acreditado modifique, active o suspenda un programa determinado. Como estos interruptores varían de acuerdo a la marca de PLC, solamente se mencionan algunos de ellos.

- APAGAR (*OFF*). El sistema no puede ser activado o programado.
- EJECUTAR (*RUN*). Permite el funcionamiento del sistema, pero el programa no puede ser alterado.
- INHABILITAR (*DISABLE*). Desactiva todas las salidas del PLC.
- PROGRAMAR (*PROGRAM*). Se emplea para modificar el programa en turno o desarrollar uno nuevo, pero ninguno de ellos puede ser ejecutado mientras no sea guardado y se active *RUN*.
- MONITOREAR (*MONITOR*). Esta opción es muy útil cuando se quiere verificar un programa paso a paso.

3.5.2 Módulo de entradas y salidas (E/S)

El módulo de entradas tiene terminales internas en cada una de las cuales se reciben las señales eléctricas generadas por los dispositivos de entrada como transductores, *switches*, botones momentáneos (*push-buttons*), contactos auxiliares, interruptores activados por presión, temperatura o nivel; entre otros. En las terminales de salida van conectados los equipos que se van a controlar, estos pueden ser luces indicadoras, alarmas, solenoides, relés auxiliares, arrancadores, motores, etcétera.⁴⁵

En sistemas pequeños, las terminales de entrada y salida están montadas sobre la misma estructura de la CPU, si el PLC es de mayor tamaño los módulos de entrada-salida son unidades separadas que se conectan al controlador por medio de los puertos de expansión.

Observaciones sobre los módulos de entrada y salida

- Las terminales de salida no suministran energía a los aparatos conectados a ellas; es decir, al actuar solamente como interruptores que abren o cierran, el usuario debe emplear una fuente de alimentación externa para sus equipos.⁴⁶

⁴⁵ Webb J. & Greshock K. *Industrial control electronics*, p. 469.

⁴⁶ Cutler-Hammer. *D100 Computer programming user's manual*, cap. 9, p. 1.

- *Corriente de fuga.* Cuando un contacto de salida está abierto no hay flujo de corriente en el circuito o dispositivo conectado; sin embargo, en ocasiones se llega a presentar una pequeña fuga de corriente que proviene de los semiconductores encargados de activar y apagar cada una de las terminales de salida. El valor de esta corriente es de algunos miliamperes y aunque generalmente es despreciable, existen aplicaciones en las que hay que tomarla en cuenta porque puede provocar operaciones erróneas de los equipos.
- También es importante respetar los valores nominales de voltaje y corriente pues en caso contrario, o el PLC no funciona correctamente o se daña. Por ejemplo, un módulo de entrada diseñado para trabajar con 24 volts de CD no servirá en sistemas de 120 volts de CA y viceversa. Por ello es necesario determinar las circunstancias bajo las cuales trabajará el controlador para no exceder sus especificaciones.

3.5.3 El programador

Es el dispositivo usado para introducir las instrucciones o programa del usuario en la memoria del PLC. Aunque su forma varía de acuerdo a la marca y modelo, básicamente se parece a una calculadora graficadora, tiene un teclado alfanumérico, una pantalla de cristal líquido (LCD) y su cable para poder comunicarse con el PLC. (Figura 3.3).

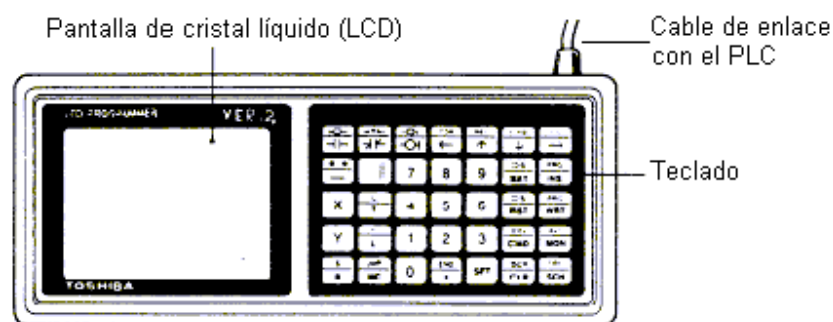


Fig. 3.3 Teclado-programador.⁴⁷

⁴⁷ Cutler-Hammer. *D100 Computer programming user's manual*, cap. 2, p. 2.

El teclado también contiene los símbolos de componentes como bobinas, contactos, temporizadores, entre otros; y botones de borrado, inserción y desplazamiento que son muy útiles para la edición y modificación de los programas. Una vez que un programa ha sido almacenado en la memoria del PLC, el programador puede ser desconectado del mismo.⁴⁸

Igualmente, una computadora personal puede funcionar como dispositivo programador empleando el *software* y la interfaz correspondientes; por lo general se utiliza el puerto serie (RS-232) de la computadora para enlazarse con el PLC.

Cada día la programación vía PC es empleada con mayor frecuencia porque en ocasiones resulta ser menos costosa que el adquirir un programador convencional; al mismo tiempo que los usuarios prefieren trabajar con un teclado y pantalla más grandes. Sin embargo, el teclado-programador suele ser muy práctico cuando el PLC ya se encuentra en servicio, en estos casos el personal encargado simplemente lo lleva hasta el lugar de la aplicación y revisa o hace los cambios necesarios en el programa sin tener que cargar con todo el equipo de cómputo.

3.5.4 Otros Accesorios

Impresora. Es un elemento de gran utilidad porque permite respaldar cualquier programa en papel. Además, cuando los programas llegan a ser muy grandes, no es posible visualizarlos por completo en una pantalla por lo que es más conveniente imprimirlos para analizarlos con mayor detenimiento.

Los documentos que más se acostumbra imprimir son: los diagramas *Ladder*, el estado de los registros, la lista de los elementos empleados, comentarios adicionales e información del sistema.

Unidades de expansión de E/S. Las unidades de expansión son conectadas al PLC para proveer un mayor número de entradas y salidas. Se pueden emplear tantos módulos de

⁴⁸ Webb J. & Reis R. *Programmable Logic Controllers*, p. 39.

expansión de E/S como lo permita el controlador. Estas unidades son muy convenientes cuando se hacen adiciones a los circuitos de control y no se tienen los recursos económicos para comprar otro PLC o bien, el que está en uso todavía tiene memoria suficiente para admitir nuevas tareas.

Módulos de entradas analógicas. Son dispositivos que convierten las señales analógicas provenientes de transductores (por ejemplo, de presión o temperatura) en valores digitales en forma de corriente o voltaje. Estos datos son almacenados en los registros de entrada del PLC y son cotejados con valores predefinidos que el usuario ha introducido en los registros de comparación. Junto con el PLC y los transductores, los módulos de entradas analógicas son de los equipos más empleados en la automatización de procesos industriales.⁴⁹

Módulos de salidas analógicas. Estos equipos son los encargados de convertir los valores binarios del PLC en señales de voltaje o corriente continua para controlar los servo-mecanismos conectados a la salida. Por medio de un convertidor digital-analógico (DAC), los datos digitales son transformados en señales de magnitud proporcional al valor original; los intervalos de voltaje y corriente más empleados son los siguientes: 4 a 20 [mA], 0 a 20 [mA], 0 a 5 [V], 0 a 10 [V], -5 a 5 [V] y -10 a 10 [V]. El DAC utilizado por los módulos para PLC's maneja datos de 12 ó 13 bits por lo que tiene una resolución de 4,096 u 8,192 pasos, respectivamente.

3.6 Lenguajes de programación

Existen diversos lenguajes para programar PLC's los cuales tienen sus particularidades según la marca y modelo, pero básicamente pueden clasificarse en dos tipos: de ambiente gráfico y lista de instrucciones. Cualquiera que fuese el lenguaje a utilizar, cabe señalar que la programación del PLC puede hacerse a través de una computadora personal (empleando el *software* respectivo) o por medio del teclado-programador.

⁴⁹ Webb J. & Greshock K. *Industrial control electronics*, p. 490.

Los lenguajes de programación en ambiente gráfico ofrecen la ventaja de ser más comprensibles ya que el usuario simplemente conecta (en forma virtual) los dispositivos que componen un circuito de control en vez de memorizar un conjunto de instrucciones. Otra de las cualidades de esta forma de programación es el poder analizar cómo se ejecuta un programa elemento por elemento o bien, por secciones. Los lenguajes **escalera** (*Ladder*) y **diagrama de bloques funcionales** (FBD) pertenecen a este tipo de programación.⁵⁰

3.6.1 Escalera (*Ladder*)

Es quizás el lenguaje más conocido y empleado en la programación de PLC's porque en él se pueden "conectar" cada uno de los elementos que integran un circuito de control tal y como aparecen en el diagrama eléctrico. De este modo, el usuario trabaja con bobinas, contactos, temporizadores y otros dispositivos, mediante arreglos serie-paralelo, que operan con dos estados básicos: **encendido** (contacto o bobina cerrados) y **apagado** (contacto o bobina abiertos).

A esto se debe la popularidad de la programación en diagramas *Ladder* pues incluso la gente con poca experiencia en el manejo de PLC's pero familiarizada con la lógica de relevadores y electrónica digital puede escribir el programa de cualquier circuito porque es algo que le resulta conocido.

3.6.2 Diagrama de bloques funcionales (*Function Block Diagram* o FBD)

Esta es otra variante de la programación en gráficos pero en vez de trabajar con elementos individuales, los agrupa en bloques funcionales, de ahí se deriva su nombre. Cuando una persona programa en FBD traduce el circuito de control a un diagrama de bloques donde se emplean compuertas digitales, principalmente se trabaja con *AND*, *OR* y *NOT*; entre tanto, los estados lógicos son **1** para **encendido** y **0** para **apagado**.

⁵⁰ Berger, H. *Automating with SIMATIC*, p. 96.

El lenguaje FBD se emplea mayormente en Europa mientras que el *Ladder* se usa más en Norteamérica. Posteriormente se verán las analogías entre la lógica de relevadores (*Ladder*) y las compuertas digitales.

3.6.3 Lista de instrucciones (*Statement List* o STL)

Este lenguaje es similar a los empleados para programar computadoras como C, Fortran, Pascal, entre otros. Cuando se programa en STL el usuario introduce una serie de instrucciones (en forma de lista) las cuales definen la función que debe ser desarrollada por el controlador. Por ejemplo, en cada instrucción u orden se especifican los elementos (bobinas, contactos) que serán activados, la dirección de la memoria del PLC en la cual se hallan, el tiempo que va a cronometrar un temporizador, etcétera.

A diferencia de la programación en gráficos, el lenguaje STL no sólo resulta poco claro, especialmente para los usuarios que están más acostumbrados a la lógica de los circuitos con relevadores, sino también, las instrucciones difieren de un fabricante a otro. Por tales razones la programación en STL es más empleada por las personas familiarizadas con los lenguajes de cómputo convencionales.

No obstante lo anterior, una de las mayores ventajas de programar en STL es que no se necesita del PLC o su *software* para crear el listado de instrucciones; es decir, el también llamado programa fuente puede ser escrito en cualquier editor de texto, simplemente se hace una copia y posteriormente se descarga en el editor STL correspondiente para supervisarlos y guardarlo en la memoria del controlador.⁵¹

En el Apéndice A se incluyen algunas de las instrucciones más comunes para programar PLC's.

⁵¹ Berger, H. *Automating with SIMATIC*, p. 97.

3.7 Fundamentos de programación en diagramas *Ladder*

3.7.1 Bobinas y contactos

Los elementos más empleados en la programación *Ladder* son las bobinas y sus contactos asociados. El funcionamiento de estos dispositivos es básicamente como sigue: cuando una bobina se enciende, los contactos que dependen de ella abren o cierran. Un contacto que cierra es interpretado por el PLC como un **nivel alto** (1 en lógica digital), si la posición es la contraria entonces se toma como un **nivel bajo** ó 0 lógico.

Básicamente se manejan dos tipos de contactos: normalmente abiertos (NA) y normalmente cerrados (NC), ver Figura 3.4.



Figura 3.4 Contactos normalmente abierto y cerrado.

Normalmente abierto (NA). Su estado natural es de apertura y sólo cierra cuando su bobina se energiza.

Normalmente cerrado (NC). Su posición natural es de cierre y sólo abre cuando su bobina se enciende.

Las salidas y bobinas se simbolizan como se observa en la Figura 3.5.

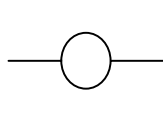


Fig. 3.5 Bobina o salida.

3.7.2 Comparación entre las lógicas digital y *Ladder*

Compuerta AND

La compuerta AND es un circuito que opera en forma tal que su salida es Alta sólo cuando todas sus entradas son Altas. La salida será Baja cuando al menos una de sus entradas sea Baja. (Figura 3.6-a).

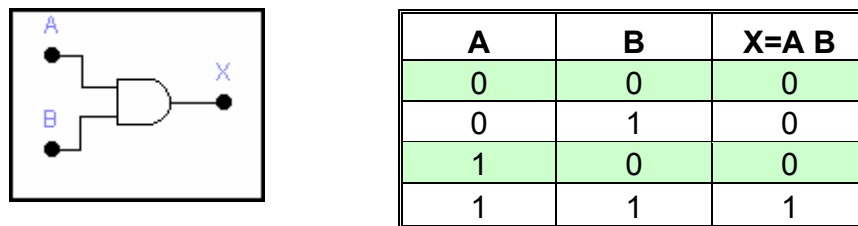


Fig. 3.6-a Símbolo de AND y tabla de verdad.

En el equivalente *Ladder* se observa que una compuerta AND se comporta como un conjunto de **contactos en serie**, solamente cuando todos están cerrados se enciende la salida.⁵² (Figura 3.6-b).

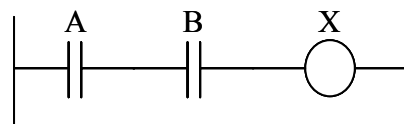


Fig. 3.6-b Equivalente *Ladder* de AND.

⁵² Webb J. & Reis R. *Programmable Logic Controllers*, p. 91.

Compuerta OR

La operación lógica OR produce un resultado en nivel Alto cuando al menos una de las variables de entrada está en Alto. La salida será Baja sólo cuando todas las entradas sean Bajas. (Figura 3.7-a).

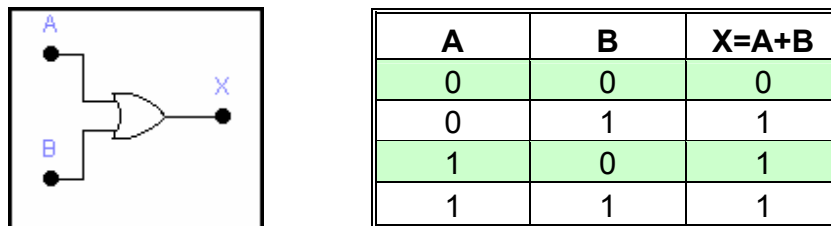


Fig. 3.7-a Símbolo de OR y tabla de verdad.

En su equivalente *Ladder*, la compuerta OR se asemeja a un arreglo de **contactos en paralelo**, la salida se encenderá cuando al menos uno de ellos esté cerrado.⁵³ (Figura 3.7-b).

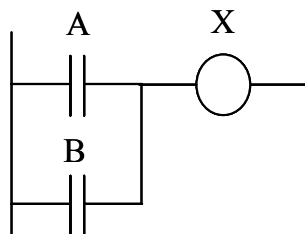


Fig. 3.7-b Equivalente *Ladder* de OR.

Compuerta NOT

También conocida como Inversora, genera una salida de valor contrario al nivel lógico de entrada. Por ejemplo, supóngase que una variable A vale cero, cuando es invertida el resultado será $A' = 1$; el apóstrofo representa la Negación o Inversión de A. Ver Figura 3.8-a.

⁵³ Webb J. & Reis R. *Programmable Logic Controllers*, p. 92.

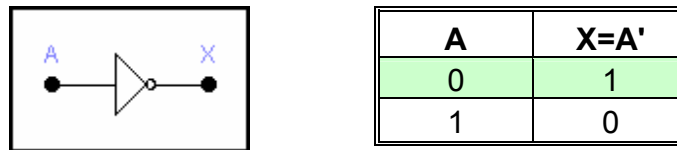


Fig. 3.8-a Símbolo de NOT y tabla de verdad.

En un diagrama *Ladder*, la compuerta NOT se representa mediante un **contacto normalmente cerrado** (NC), esto significa que al encenderse su bobina asociada los contactos se abren apagando la salida que les fue conectada y viceversa.⁵⁴ (Figura 3.8-b).

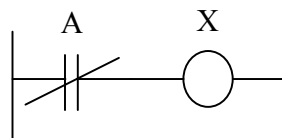


Fig. 3.8-b Equivalente *Ladder* de NOT.

Compuerta NAND

Es la Negación de la compuerta AND (NOT AND) y por lo mismo producirá una salida en nivel Alto cuando una o más de las entradas estén en Bajo, la salida solamente será Baja si todas las entradas son Altas. (Figuras 3.9-a y 3.9-b).

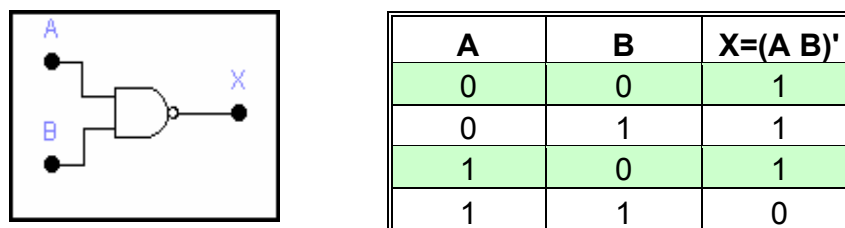


Fig. 3.9-a Compuerta NAND y tabla de verdad.

⁵⁴ Webb J. & Reis R. *Programmable Logic Controllers*, p. 93.

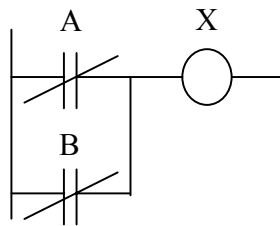


Fig. 3.9-b Diagrama *Ladder* de NAND.

Compuerta NOR

De manera similar al caso anterior, NOR es la Negación de la compuerta OR (NOT OR). La salida será en nivel Alto sólo si todas las entradas son Bajas, en cualquier otro caso la salida será en nivel Bajo. (Figuras 3.10-a y 3.10-b).

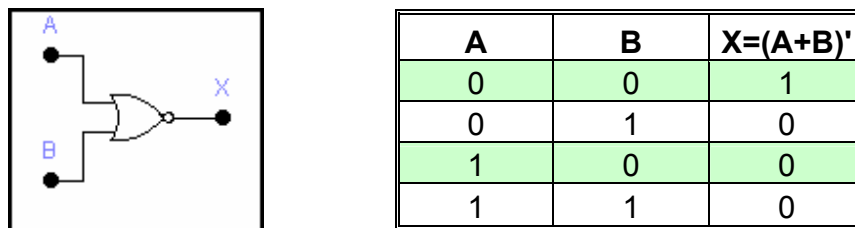


Fig. 3.10-a Compuerta NOR y tabla de verdad.

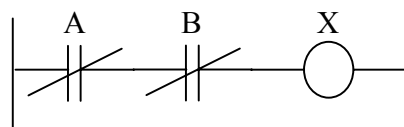


Fig. 3.10-b Equivalente *Ladder* de NOR.

Compuerta EXCLUSIVE OR (EX-OR)

En esta compuerta, igualmente conocida como OR Exclusiva, la salida será en nivel Alto cuando las dos entradas tengan diferentes niveles lógicos; en caso que ambos sean iguales la salida asumirá un nivel Bajo. (Figuras 3.11-a y 3.11-b).

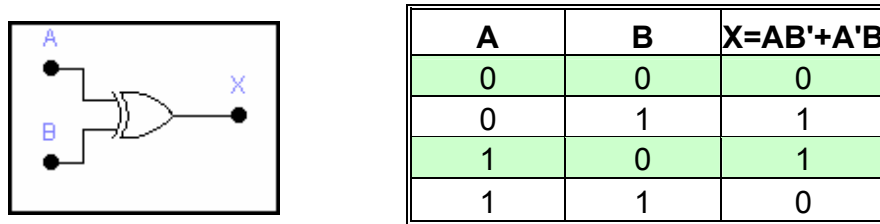


Fig. 3.11-a Símbolo de EX-OR y tabla de verdad.

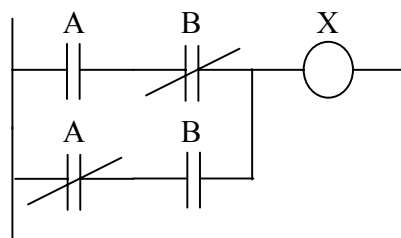


Fig. 3.11-b Equivalente *Ladder* de EX-OR.

Compuerta EXCLUSIVE NOR (EX-NOR)

La compuerta NOR Exclusiva es la Negación de EX-OR, la salida será en nivel Alto cuando los valores lógicos de las dos entradas sean iguales; si son diferentes entonces se producirá un Bajo en la salida. (Figuras 3.12-a y 3.12-b).

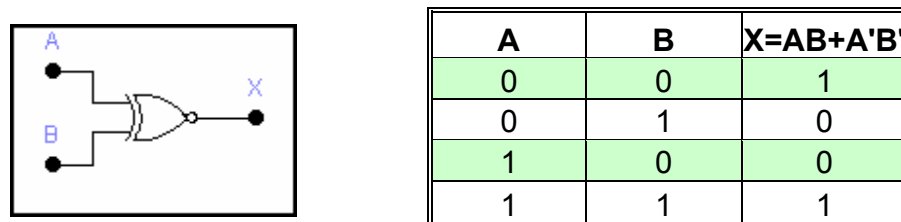


Fig. 3.12-a Compuerta EX-NOR y tabla de verdad.

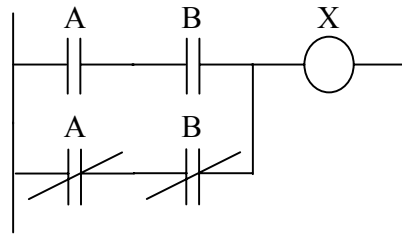


Fig. 3.12-b Diagrama *Ladder* de EX-NOR.

3.7.3 Temporizadores

En un circuito lógico, los temporizadores o *timers* son los dispositivos encargados de controlar el tiempo. En cierta forma, un temporizador puede verse como una bobina que activa sus contactos con cierto retraso; es decir, cuando se ordena su encendido, los contactos asociados solamente actuarán hasta que se haya cumplido el período programado.

Un temporizador es definido por dos parámetros: la nomenclatura "T" o "TMR" (para diferenciarlo de las bobinas auxiliares comunes) y el tiempo que va a cronometrar, generalmente en segundos, aunque algunos fabricantes de PLC's emplean como unidades las décimas y centésimas de segundo.

Ejemplo 1. Cuando se cierra X1, el temporizador T1 comienza a contar los 12 segundos que le fueron programados y únicamente cerrará sus contactos hasta que haya transcurrido ese tiempo para poder activar la bobina de salida Y0. Si X1 se abre, el temporizador se apagará inmediatamente y desconectará a Y0. (Figura 3.13).

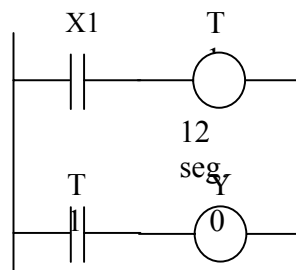


Fig. 3.13 Ejemplo de un temporizador.

3.7.4 Contadores

El contador o *counter* es un elemento empleado para registrar el número de eventos que ocurren en un renglón del programa *Ladder*, por ejemplo, las veces que un contacto es abierto o cerrado. Básicamente, un contador se define por tres parámetros: la nomenclatura "C" o "CTR", el valor de ajuste (que es la cuenta o número de eventos por verificar) y una bobina de restablecimiento (*Reset Counter* o RC) la cual deberá estar encendida para que el conteo se lleve a cabo.

Generalmente los PLC's pueden desempeñar tanto conteos hacia adelante (*Count Up*) como hacia atrás (*Count Down*); sin embargo, algunos modelos solamente incluyen el primero de ellos. Esta función es muy empleada en las plantas industriales como refresqueras, empacadoras y en todas aquellas en las que es indispensable el conteo de los objetos que viajan en las bandas transportadoras.

Ejemplo 2. El contador C0 ha sido programado para registrar 6 cierres del contacto X1: cada vez que X1 se cierra, C0 registrará una operación, siempre y cuando la bobina de restablecimiento C0-RC esté encendida. Cuando la cuenta llegue a 6, el contador C0 se activará y sus contactos asociados cerrarán para energizar la salida Y5. Si se desea interrumpir y reiniciar la cuenta en 0 ó bien apagar Y5, entonces se debe desconectar la bobina C0-RC mediante la apertura del contacto X2. (Figura 3.14).

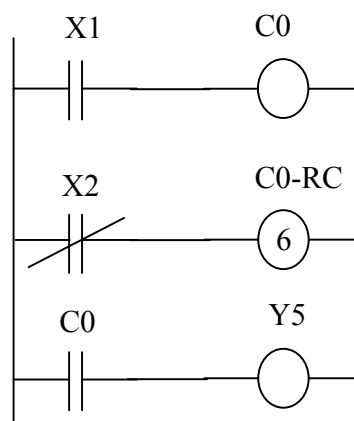


Fig. 3.14 Ejemplo de un contador.

Es importante resaltar que si el funcionamiento de PLC es interrumpido mientras se realiza una medición de tiempo o un conteo, los temporizadores y contadores también quedarán suspendidos pero conservarán el último valor registrado hasta ese instante; de esta manera, si el PLC es encendido nuevamente los conteos no empiezan desde cero.

3.7.5 Funciones adicionales

Aunque casi todos los PLC's pueden desempeñar las mismas tareas, algunos presentan otras funciones que varían de acuerdo al modelo, marca y precio. Debido a estas razones, sólo se mencionarán algunas de las funciones más comunes para la mayoría de ellos; para un estudio más detallado sobre el tema es mejor revisar la literatura especializada y sobre todo los manuales de los fabricantes.

Relé de control maestro (Master Control Relay o MCR). Es una función que permite ejecutar sectores determinados de cualquier programa. Se compone de dos bobinas: puesta maestra (*Master Set* o MS) y restablecimiento maestro (*Master Reset* o MR) entre las cuales se encuentra contenida la parte específica del programa que se desea ejecutar. Cuando MS es encendida, todos los elementos comprendidos entre ella y MR se activan y funcionan de la misma manera como lo harían en cualquier programa; pero si MS se desactiva los componentes que fueron accionados se apagan nuevamente.⁵⁵ (Fig. 3.15).

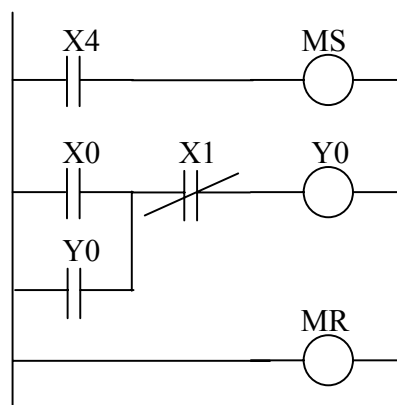


Fig. 3.15 Ejemplo de relé de control maestro.

⁵⁵ Cutler-Hammer. *D100 Computer programming user's manual*, cap.6, p. 3.

Salto (Jump o Skip). Trabaja de manera similar a la de MCR pero en lugar de activar una sección determinada del programa, la brinca u omite. También tiene dos bobinas: *puesta de salto (Jump Set o JS)* y *restablecimiento de salto (Jump Reset o JR)* en medio de las cuales está la parte del programa que se desea desactivar.

El programa funciona en su totalidad mientras JS esté apagada; sin embargo, cuando JS se enciende, todos los elementos comprendidos entre ella y JR quedan desactivados pero conservan el último estado que tenían antes de ser desconectados; por ejemplo, los temporizadores y contadores retienen el valor de la cuenta que llevaban hasta ese momento, ver Figura 3.16.

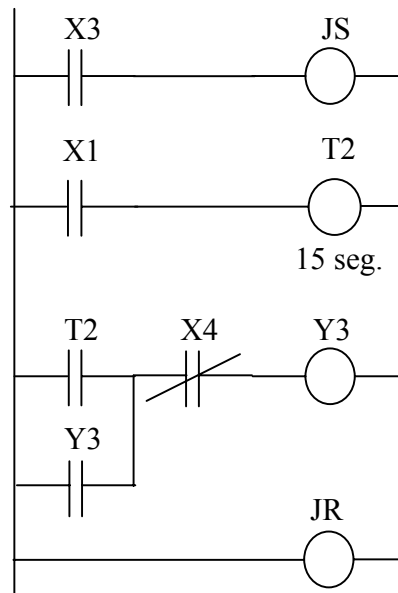


Fig. 3.16 Ejemplo de salto.

Funciones aritméticas. Algunos PLC's pueden efectuar operaciones matemáticas básicas como sumar, restar, multiplicar y dividir, incluso existen marcas que incluyen la raíz cuadrada; básicamente todas trabajan de la misma manera: se emplean tres direcciones distintas de la memoria, en dos de ellas se introducen los números y la función aritmética que se desea efectuar, mientras que en la tercera se almacena el resultado.

También existen funciones de comparación como igual (*Equal* o **EQ**), diferente de (**Not EQ**), mayor que (*Greater Than* o **GT**) y menor que (*Less Than* o **Not GT**); como en el caso anterior los números a comparar son introducidos en dos localidades de la memoria y el resultado es guardado en una tercera dirección. Aquí es importante mencionar que en algunos PLC's la respuesta puede aparecer como verdadero (*True* o **T**) o falso (*False* o **F**) aunque otros modelos despliegan **1** ó **0**, respectivamente.⁵⁶

3.8 Ejemplos de aplicaciones

Ejemplo 3. En una planta se emplean tres detectores para su sistema de seguridad industrial, el primero es para humo, el segundo para gases tóxicos y el último para fuego. Como la empresa cuenta con su propia brigada para emergencias, cuando sólo dos *sensores* se activan debe encenderse una alarma de desalojo de las instalaciones; pero si los tres detectores son activados, se envía una llamada automática a la estación de bomberos.

Para este ejemplo se verá el programa en los tres lenguajes descritos para observar sus analogías. (Figura 3.17).

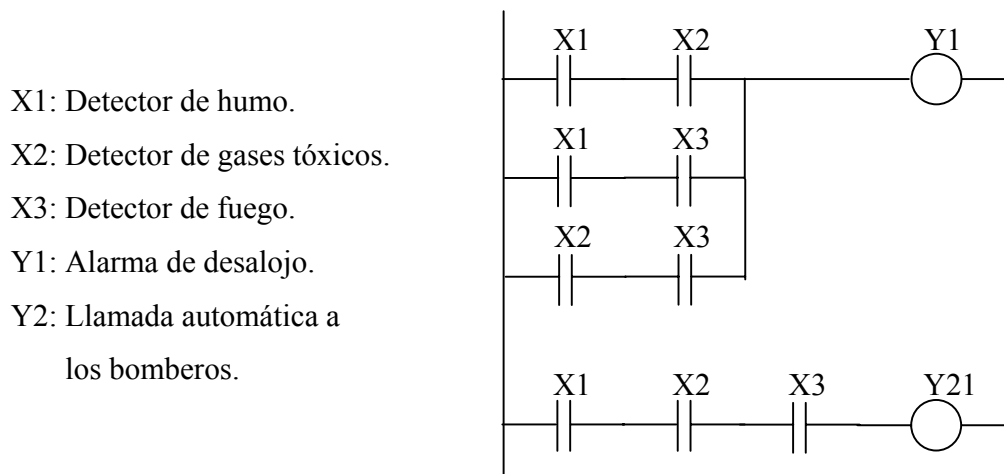


Fig. 3.17-a Diagrama *Ladder*.

⁵⁶ Webb J. & Greshock K. *Industrial control electronics*, p. 487.

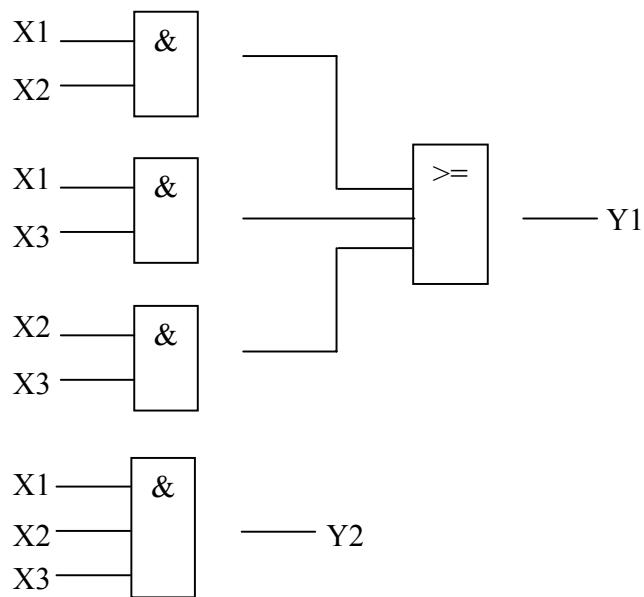


Fig. 3.17-b Diagrama FBD.

```

IN_X01_AND_IN_X02
OR
IN_X01_AND_IN_X03
OR
IN_X02_AND_IN_X03
LOAD_OUT_Y1
IN_X01_AND_IN_X02_AND_IN_X03
LOAD_OUT_Y2
END
  
```

Fig. 3.17-c Lista de instrucciones (STL).

Nota: Se emplearon las instrucciones que manejan la mayoría de los textos sobre PLC's ya que en los controladores reales varían de acuerdo al fabricante.

Ejemplo 4. Para tener un mejor desempeño, un motor eléctrico requiere ser lubricado (durante algunos segundos) cada vez que es apagado. La bomba encargada de suministrar el aceite lubricante debe permanecer encendida durante los 25 segundos posteriores al apagado del motor. (Figura 3.18).

X0: Interruptor principal.

R1: Relé auxiliar.

T1: Temporizador.

Y0: Motor principal.

Y2: Bomba.

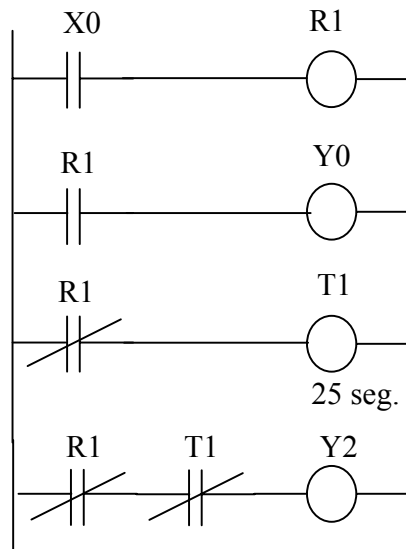


Fig. 3.18 Aplicación de un temporizador.

Cuando X0 se cierra, se activa R1 y en consecuencia se enciende el motor (Y0) pero se apaga T1. Al abrir X0 se desconecta R1 apagándose Y0 y activando T1; sin embargo, los contactos de T1 no abrirán sino hasta 25 segundos después lo que permitirá el funcionamiento de la bomba del lubricante (Y2) durante ese intervalo de tiempo.

4.1 Circuito de control

El circuito de control de un interruptor de potencia es el medio a través del cual se efectúan las operaciones de cierre y apertura del mismo ya sea en forma manual o automática.⁵⁷ Está formado por las siguientes partes:

Manija de control. Es el mecanismo empleado para abrir o cerrar el interruptor manualmente.

Relevador de protección. Es el dispositivo que al detectar alguna falla o anomalía en un circuito eléctrico ordena la apertura automática del interruptor.

Relé de recierre. Este aparato sirve para cerrar el interruptor automáticamente después de que ha sido disparado por su propio sistema de protección.

Luces piloto. Se utilizan para indicar el estado en que se encuentra el interruptor; generalmente se manejan los colores rojo y verde, el primero de ellos se asocia con la posición de cierre y el último con la de apertura.

Alarma. Es otra herramienta de señalización, cuando es activada advierte que el interruptor fue desconectado por el sistema de protección debido a la presencia de una falla.

Relevadores auxiliares. Son la parte medular del sistema de control pues al abrir y cerrar sus contactos (cada vez que sus respectivas bobinas son encendidas o apagadas) ordenan a los demás equipos el momento preciso en el que deben operar. Por ejemplo, al encenderse la luz roja, la lámpara verde tiene que apagarse y viceversa; asimismo, se emplean para alimentar circuitos derivados y bloquear otros elementos, como en el caso de la función antibombeo.

⁵⁷ CFE. *Procedimiento para coordinación de protecciones de sobrecorriente en sistemas de distribución*, p. 34.

En el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la FI-UNAM se dispone de una mesa-tablero en la cual se ha implementado un sistema similar al anteriormente descrito, con ella se enseña a los alumnos de la materia de "Laboratorio de Protección de Sistemas Eléctricos" el funcionamiento básico de un interruptor de potencia y su interacción con los relevadores de protección. (Figura 4.1).

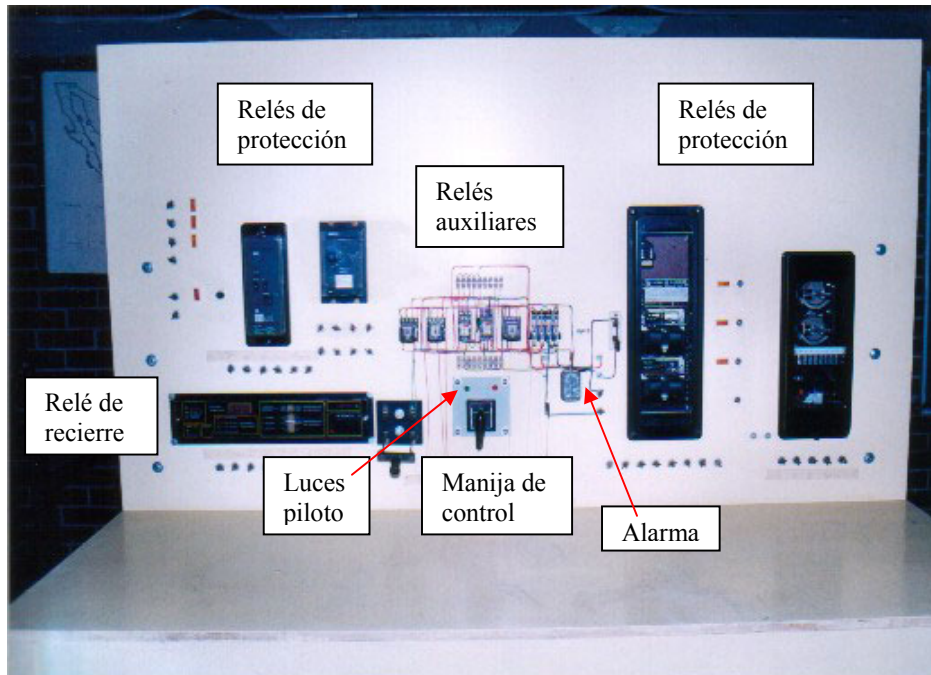


Fig. 4.1 Tablero de protecciones múltiples - sistema original.

Uno de los objetivos principales de este trabajo fue el desarrollar una réplica del circuito de control del interruptor sustituyendo los relés auxiliares por un PLC; sin embargo, dado que ambos tableros desarrollan las mismas funciones, en este capítulo se aborda el funcionamiento del sistema en forma general (para una mejor comprensión del mismo) y en el siguiente se trata con más detalle el controlador y su programa *Ladder* correspondiente.

4.2.1 Manija de control

Es el mecanismo de **control manual** del interruptor, tiene tres posiciones: "encendido" (cierre), "apagado" (apertura) y "neutro"; este último es su estado natural al cual siempre regresa por medio de un resorte. (Figura 4.3).



Fig. 4.3 Manija de control.⁵⁸

La integran 7 pares de contactos que operan simultáneamente, pero de manera distinta, agrupados en tres bloques funcionales:

1. *Contactos momentáneos.* Son similares a los botones de presión (*push buttons*), se encuentran normalmente abiertos y solamente cierran durante el tiempo en que el operador los mantiene en esa posición, al soltar la manija vuelven a su estado original.

En este grupo se encuentran las parejas formadas por los contactos 1-2 y 3-4; sin embargo, es importante señalar que las terminales 1-2 sólo cierran cuando la manija se encuentra en la posición de "encendido", en cambio los bornes 3-4 únicamente cierran con la orden de apertura.

2. *Contactos deslizantes.* También son llamados permanentes porque conservan una posición determinada (a pesar de que la manija siempre retorna a "neutro"), por lo tanto su estado sólo puede ser alterado manualmente.

⁵⁸ General Electric. *Power management catalog 1998*, s/p.

Pertenecen a esta clase los contactos 11-12 y 13-14, ambos se hallan normalmente abiertos, cierran en "encendido" y abren en "apagado".

Para indicar su estado, se dispone de una carátula acoplada al eje de la manija que cambia de color según la orden dada: el verde es para apertura y el rojo para cierre.

3. *Contactos neutros.* Son aquellos que permanecen cerrados cuando la manija está en "neutro" y abren tanto en cierre como en apertura. Este grupo lo integran los contactos 7-8 y 9-10.

Finalmente, existe un par de contactos que en cualquiera de las tres posiciones siempre están cerrados, debido a esta condición no fueron empleados en el sistema; tales contactos son las terminales 5-6.

En el circuito de control la manija recibe el número de función 101 de tal modo que sus contactos son identificados con ese número y para diferenciar la tarea que realizan se emplea una letra, ver la tabla siguiente:

Tipo de contactos	Terminales correspondientes	Función que realizan
Momentáneos	1-2	101/C - Cierre manual
	3-4	101/T - Apertura manual
Permanentes	11-12 y 13-14	101/SC - Apertura o cierre manual
Neutros	7-8 y 9-10	101/0 - Transferencia hacia circuitos derivados

Tabla 4.1 Contactos de la manija y función correspondiente.

4.2.2 Operación manual

Cuando se ejecuta el cierre, los contactos 101/C se empalman ordenando el encendido del relevador auxiliar X, a su vez X activa al auxiliar C provocando que sus contactos asociados cambien de posición, esto hará que la luz roja se encienda y la verde se apague.

Por el contrario, al efectuar una apertura se cierran los contactos 101/T y se enciende la bobina auxiliar 52T; los relés 52P y C quedarán desconectados porque se hallan en serie con los contactos asociados a 52T. En consecuencia, la luz verde vuelve a encenderse y la roja se apaga.

En operaciones de apertura y cierre manuales la carátula bicolor de la manija coincide con los colores de las lámparas: verde con luz verde (interruptor abierto) y rojo con luz roja (interruptor cerrado), lo mismo pasa con los contactos permanentes (101/SC).

4.2.3 Disparo por protecciones

Si el interruptor se encuentra cerrado y se presenta una falla, las protecciones (en nuestro caso el relevador de sobrecorriente 50D) ordenarán la apertura de manera automática ocasionando el encendido de la luz verde y el apagado de la roja, pero el color de la carátula de la manija seguirá en rojo y sus contactos 101/SC permanecerán cerrados provocando la activación de la alarma.

Lo anterior sucede porque la apertura fue provocada por las protecciones y no por la acción del operador; recuérdese que los contactos permanentes y la carátula bicolor de la manija sólo cambian de estado en forma manual.

La discordancia entre el encendido de la luz verde y la carátula de la manija (rojo) así como el sonido de la alarma son indicadores de que el interruptor fue abierto por la presencia de una falla.

Una observación importante es que los contactos de disparo del relevador 50D están en paralelo con los contactos 101/T de la manija, ambos se hallan en la rama del circuito encargada de la apertura del interruptor; gracias a este arreglo se puede disparar el interruptor en forma tanto automática como manual.

4.2.4 Función de recierre

En el diagrama también se observa el relevador de recierre 79, este dispositivo es el encargado del cierre automático del interruptor después de que ha sido disparado por las protecciones.

El relevador de recierre puede efectuar uno o varios intentos de cierre con determinado retraso para permitir que la falla sea despejada si se simula una falla transitoria; por el contrario, si se requiere simular una falla permanente entonces se sostiene la falla en el circuito de prueba y el 79 se bloquea automáticamente.

El relé 79 va conectado a otros elementos del circuito de control que le permiten reconocer si la apertura fue manual (en cuyo caso no debe haber recierre) o provocada por los equipos de protección; la descripción de estas conexiones se verá más adelante.

Cabe señalar que los contactos de cierre del relé 79 (terminales C) se conectaron en paralelo con los bornes 101/C de la manija, con esta disposición se puede efectuar el cierre del interruptor en forma automática o manual, respectivamente.

4.2.5 Bombeo del interruptor

Si el interruptor cierra ante una falla, por ejemplo al intentar un recierre o por un descuido del personal, las protecciones actuarán inmediatamente realizando la apertura; sin embargo, de no existir un mecanismo que bloquee los contactos que ordenan el cierre, estos

tratarán de mantenerse cerrados (a pesar de la falla) y en consecuencia el interruptor estará cerrando y abriendo repetidas veces. Dicho fenómeno es conocido como bombeo.⁵⁹

El bombeo de un interruptor implica un serio problema ya que no sólo se pueden dañar los elementos encargados de su operación sino que el propio aparato puede sufrir desde el flameo de sus contactos hasta la destrucción de su cámara de arco.

4.2.6 Función antibombeo

En el sistema, cuando se cierra el interruptor ante una falla, las protecciones lo abren de inmediato y para evitar que los contactos del relé auxiliar C sostengan el cierre se dispone de otro elemento auxiliar llamado Y que desconecta a X; al bloquearse X se impide una segunda activación de la bobina de C (y en consecuencia de sus contactos) por lo que el interruptor queda abierto en forma definitiva y sólo podrá cerrar cuando la falla sea despejada.

4.3 Características del relevador de protección empleado

4.3.1 Relé de sobrecorriente de tiempo definido 50D

Este relevador contiene circuitos de medición para detectar la corriente de falla, que proviene de los transformadores de corriente, y un cronómetro de estado sólido para ajustar el tiempo de disparo. Esta es una de sus características principales ya que sus contactos pueden operar en forma instantánea o hasta con un retraso de 3 segundos.

Una de las mayores ventajas de los relés de tiempo definido es que el tiempo de disparo se puede programar con mayor facilidad en lugar de realizar aproximaciones con las curvas de corriente contra tiempo.

⁵⁹ CFE. *Procedimiento para coordinación...*, op. cit., p. 34.

El relevador 50D se emplea principalmente en la protección contra fallas de fase a tierra y entre fases, protección diferencial de máquinas de balance propio y activación de alarmas de sobrecarga y ventiladores. También puede ser controlado en forma externa por otro relé permitiéndole ser empleado en esquemas del tipo sobrecorriente-direccional.⁶⁰

Su funcionamiento es muy simple, el transformador de corriente trifásico se conecta a las terminales 1-2, 3-4 y 5-6 del relevador (si se desea proteger solamente una fase se emplean los bornes 3-4), cuando la corriente alcanza el valor de ajuste comienza el conteo del tiempo programado y al cumplirse se activan los contactos que ordenarán en el circuito de control del interruptor la apertura del mismo. (Figura 4.4).

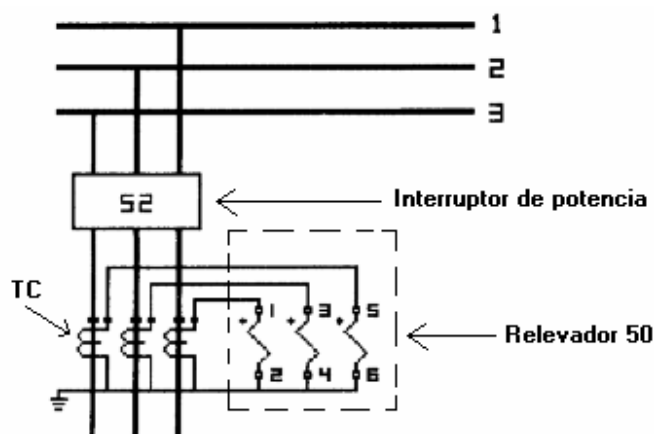


Fig. 4.4 Conexión del relé 50D con un interruptor de potencia.⁶¹

Generalmente se utilizan los contactos normalmente abiertos 11-12 y 14-15, pero dependiendo de la lógica del esquema de control pueden usarse los contactos normalmente cerrados 12-13 y 15-16.

⁶⁰ ABB. *50D Overcurrent relay instructions manual*, p. 4.

⁶¹ Idem, p. 9.

4.3.2 Panel frontal

En la parte frontal del relevador 50D (Figura 4.5) aparecen sus controles e indicadores correspondientes.



Fig. 4.5 Panel frontal del 50D.⁶²

Selector de la corriente de disparo (Pickup). Esta perrilla es para ajustar el valor de la corriente de disparo en un intervalo de 1 a 10 veces la resolución del relevador que es de 0.8 A; es decir, se pueden detectar corrientes de 0.8 a 8 A.

Selector del retraso de tiempo (Time delay). Con este disco se programa el tiempo de disparo en una escala de 0.1 a 3 segundos.

Indicador de disparo (Target). Señala el momento en el cual los contactos del relevador han sido disparados. El indicador es una bandera de color naranja accionada electrónicamente, para que funcione debe estar presente el voltaje de alimentación del equipo.

LED de disparo. Un LED de color amarillo se enciende cuando la corriente alcanza el valor de disparo programado con el disco de ajuste.

⁶² ABB. 50D Overcurrent relay instructions manual, p. 1.

Botón de restablecimiento del indicador de disparo (Target reset). Este botón permite regresar el indicador de disparo a su estado normal siempre y cuando los contactos del relevador también hayan regresado a su posición original.

Botón de disparo forzado (Trip). Este botón fuerza el disparo de protección para accionar los contactos del relevador en forma manual, básicamente se trata de un botón de prueba en donde no se necesita de una corriente de disparo real.

4.3.3 Contactos principales

Los contactos del 50D que se conectan al sistema de control del interruptor se encuentran en la parte trasera del aparato. Ver Figura 4.6.

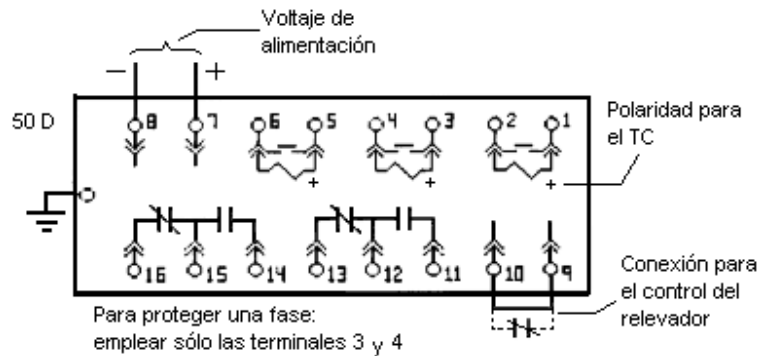


Fig. 4.6 Terminales y contactos del relé 50D.⁶³

La alimentación (125 V cd) corresponde a las terminales 7 y 8, las terminales 1-2, 3-4 y 5-6 son para conectar las bobinas internas (encargadas de medir la corriente de disparo) del TC; cuando se desea proteger una fase se emplean sólo las terminales 3-4.

Los contactos normalmente abiertos 11-12 y 14-15 se conectan al sistema de control que manda la señal de disparo al interruptor de potencia. Dependiendo de la lógica del circuito se pueden utilizar los contactos normalmente cerrados 12-13 y 15-16.

⁶³ ABB. 50D Overcurrent relay instructions manual, p. 8.

Finalmente, la conexión fija entre los bornes 9 y 10 permite el funcionamiento normal del relevador; sin embargo, si el aparato requiere ser controlado por otro relé entonces se debe quitar dicha conexión y en su lugar van los contactos del equipo externo.

4.3.4 Especificaciones técnicas

Fabricante:	ABB.
Corriente que puede ser medida:	0.8 a 8 A.
Corriente máxima a la entrada:	16 A.
Tiempo de disparo:	0.1 a 3 segundos.
Tensión de alimentación:	48 ó 125 V cd.
Intervalo de operación a 125 V cd:	100 a 142 V cd.
Corriente máxima a la salida:	30 A.
Temperatura de operación:	- 30 a 70 °C.
Tolerancia de los controles frontales con respecto al valor impreso:	± 10 %.
Peso:	2.5 kg.
Volumen:	0.25 pies cúbicos.

4.4 Características del relevador de recierre utilizado

4.4.1 Generalidades del 79M

El relevador de recierre 79M es usado para cerrar automáticamente un interruptor de potencia (hasta en tres ocasiones) después de que ha sido abierto por su respectivo sistema de protección. Su principal uso es en líneas de distribución de energía.⁶⁴

El tiempo para efectuar cada recierre es independiente uno de otro y se ajusta por medio de tres perillas localizadas en el panel frontal del relé; los tiempos de retraso tienen la finalidad de dar un margen para que la falla sea despejada. Un recierre satisfactorio se obtiene si el interruptor permanece cerrado por un período igual al tiempo programado con el disco de restablecimiento (*Reset*), cuando así sucede el relevador y sus contactos regresan a su estado normal. El tiempo de restablecimiento inicia su cuenta en cero segundos cada vez que el interruptor es cerrado por el relevador.

Si después de ocurrir el número de recierres programados el interruptor es abierto nuevamente (antes de que el tiempo de restablecimiento se cumpla), el relevador se bloquea automáticamente y se enciende un *LED* rojo que indica bloqueo (*Lockout*).

El relé 79M puede conservar el programa de recierres que debe efectuar cuando su alimentación es interrumpida, de este modo el aparato reanuda su funcionamiento (sin pérdida de la información) una vez restituida la energía. También emplea un reloj de estado sólido para medir los tiempos de cada recierre y de restablecimiento.

4.4.2 Fuente de poder

Para que el relé 79M funcione adecuadamente debe ir conectado a su fuente de alimentación; este módulo (llamado 79PS) tiene dos funciones básicas: la primera es

⁶⁴ ABB. *79M Reclosing relay instructions manual*, p. 4.

suministrar un voltaje regulado al 79M y la segunda (y más importante) es proporcionar las señales lógicas que indican el estado del interruptor de potencia.

Para conocer la posición del interruptor, la fuente 79PS va conectada a los siguientes contactos del circuito de control:

52/a. Es un contacto auxiliar que abre cuando el interruptor abre y viceversa. En cierta forma su operación es similar a la de la luz roja.

52/b. Este otro auxiliar abre cuando el interruptor cierra y cierra cuando el interruptor abre. Su funcionamiento es parecido al de la luz verde.

En síntesis, los contactos 52/a y 52/b operan simultáneamente pero en forma opuesta.

43. Es un botón de encendido-apagado que se emplea para activar o inhabilitar la función de recierre. Por tal motivo recibe el nombre de "permisivo de recierre".

101/SC. Son los contactos permanentes de la manija de control, su cierre y apertura están ligados al cierre y apertura del interruptor en forma manual; por lo tanto éste es el medio que hace posible distinguir al relé 79M (y su fuente 79PS) si el disparo del interruptor de potencia fue manual o por protecciones, recuérdese que el recierre solamente se ejecuta si la apertura fue causada por los sistemas de protección.

La alimentación que proporciona el módulo 79PS es un voltaje regulado de 24 V en corriente directa aunque el voltaje de funcionamiento del relevador 79M oscila entre los 21 y 26 V de cd. Las señales lógicas que indican la posición del interruptor son de 0 volts (nivel bajo) y 24 volts (nivel alto) en corriente directa con respecto a la terminal (-) del relevador.

4.4.3 Controles frontales

Los controles e indicadores del 79M se hallan localizados en su parte frontal. (Figura 4.7).



Fig. 4.7 Panel frontal del 79M.⁶⁵

Selector del número de recierres (No. of reclosures). Este tornillo es usado para seleccionar 1, 2 ó 3 maniobras de recierre. Cada vez que se requiera cambiar su posición, el interruptor debe ser abierto manualmente o el relevador tiene que estar en condición de restablecimiento (*LED* verde encendido).

Selector del retraso de tiempo para cada recierre (Open interval time). El relevador cuenta con tres discos para ajustar el tiempo en el que se debe efectuar cada recierre después de que ha sido abierto el interruptor de potencia. El reloj interno del 79M comienza a contar el retraso programado desde el momento en que el interruptor es disparado, cuando ha transcurrido el plazo operan sus contactos ordenando en el circuito de control volver a cerrar el interruptor.

Tales intervalos de tiempo son para permitir que la falla sea despejada y el interruptor pueda cerrar sin problemas, el relé puede efectuar hasta tres recierres cuyos tiempos de operación son independientes entre sí; sin embargo, sea cual fuese el número de

⁶⁵ ABB. 79M Reclosing relay instructions manual, p. 1.

intentos de cierre, si todos son infructuosos se bloquea en forma automática para evitar mayores daños al interruptor.

Los tiempos que se pueden programar para cada recierre son:

Primer intento: 0.075 a 60 segundos.

Segundo intento: 2 a 60 segundos.

Tercer intento: 2 a 60 segundos.

Selector del tiempo de restablecimiento (Reset time). Con esta perilla se ajusta el tiempo mínimo que el interruptor debe permanecer cerrado para considerar que el recierre fue exitoso, cuando esto sucede el relevador y sus contactos regresan a su estado normal. Empero, si el interruptor vuelve a ser abierto antes de que haya transcurrido el tiempo de recuperación ordenado, el relevador realiza otro intento de cierre (si es que fueron programados dos o tres recierres) o bien, se bloquea automáticamente.

El tiempo de restablecimiento inicia su cuenta en cero segundos cada vez que el interruptor es cerrado por el relevador y puede ser seleccionado en un margen de 4 a 120 segundos.

Luz indicadora de restablecimiento. Es un *LED* de color verde que se enciende cuando el relevador se halla en estado de restablecimiento (*Reset*).

Luz de bloqueo. Este *LED* rojo se enciende para indicar que el relevador ha sido bloqueado (*Lockout*) porque los intentos de recierre programados fueron infructuosos.

4.4.4 Conexiones y contactos principales

En la Figura 4.8 se muestra el diagrama de conexiones entre la fuente 79PS y el relé 79M, también se observan sus respectivos contactos.

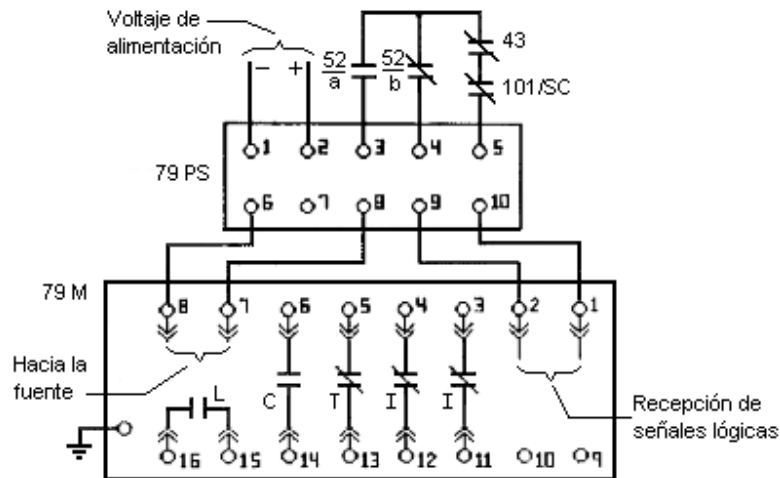


Fig. 4.8 Terminales y contactos del 79M.⁶⁶

- C: Contacto de cierre.
- T: Contacto de corte del cambiador de derivaciones.
- I: Contacto de corte instantáneo.
- L: Contacto que activa la alarma de bloqueo.
- 43: Permisivo de recierre.
- 52/a: Contacto auxiliar del interruptor.
- 52/b: Contacto auxiliar del interruptor.
- 101/SC: Contacto deslizante de la manija de control.

Los siguientes contactos (localizados en la parte posterior del relevador) son los más utilizados:

Contacto de cierre C. Cuando se cumple el tiempo programado de un recierre, el contacto C cierra ordenando en el circuito de control la reconexión del interruptor de potencia. C vuelve a quedar abierto si el recierre fue exitoso o si el relevador fue bloqueado ante la persistencia de la falla.

⁶⁶ ABB. *79M Reclosing relay instructions manual*, p. 7.

Contacto de bloqueo L. Cierra cuando el relevador ha sido bloqueado como consecuencia de haberse realizado infructuosamente los recierres programados, el contacto L se usa para activar alguna alarma o luz indicadora. Permanece abierto cuando el 79M se encuentra en estado de restablecimiento o se abre el contacto 52/b.

4.4.5 Especificaciones técnicas

Fabricante:	ABB.
Numero de recierres:	1, 2 ó 3.
Tiempos de recierre:	
Primer intento:	0.075 a 60 segundos.
Segundo intento:	2 a 60 segundos.
Tercer intento:	2 a 60 segundos.
Tiempo de restablecimiento:	4 a 120 segundos.
Tensión de alimentación:	125 V cd.
Corriente máxima a la salida:	30 A.
Temperatura de operación:	- 20 a 70 °C.
Peso:	2.1 kg.
Volumen:	0.25 pies cúbicos.

5.1 Generalidades del PLC D100

El PLC D100 provee una solución económica para un control eficiente y confiable de sistemas automatizados en pequeña escala. Por medio del programa que se introduce en su memoria se definen las tareas que debe realizar el aparato; cuando llega la información (a través de los dispositivos de entrada) el controlador verifica el programa y activa las terminales de salida correspondientes.

Algunas de las características del PLC D100 que lo hacen muy útil para una amplia gama de aplicaciones son las siguientes:

- Su lenguaje de programación es en diagramas-escalera (*Ladder*) permitiéndole al usuario desarrollar programas en forma clara y sencilla en comparación con otros lenguajes.
- Puede ser programado por medio de una PC o por teclado-programador, en cualquiera de las dos formas es posible escribir, verificar y editar los programas, activar y detener el funcionamiento del controlador o analizar el desempeño de cada uno de los elementos del programa durante la ejecución del mismo.
- Permite el crecimiento del número de entradas y salidas (E/S) mediante la conexión de módulos de E/S a través de su puerto de expansión.
- El D100 puede ser conectado a un módulo de entradas analógicas que maneja dos intervalos de voltaje (0 a 10 V cd, 0 a 5 V cd) y uno de corriente (0 a 20 mA cd) para obtener la información de procesos de control donde se miden temperatura, presión u otro tipo de señales analógicas similares.

5.2 Partes del PLC D100

El modelo de PLC que se utilizó cuenta con 14 terminales de entradas-salidas (8 entradas y 6 salidas). Está integrado en una sola pieza que es la encargada de controlar las salidas según se lo indique el programa. Las diferentes partes que lo componen se muestran en la Figura 5.1.

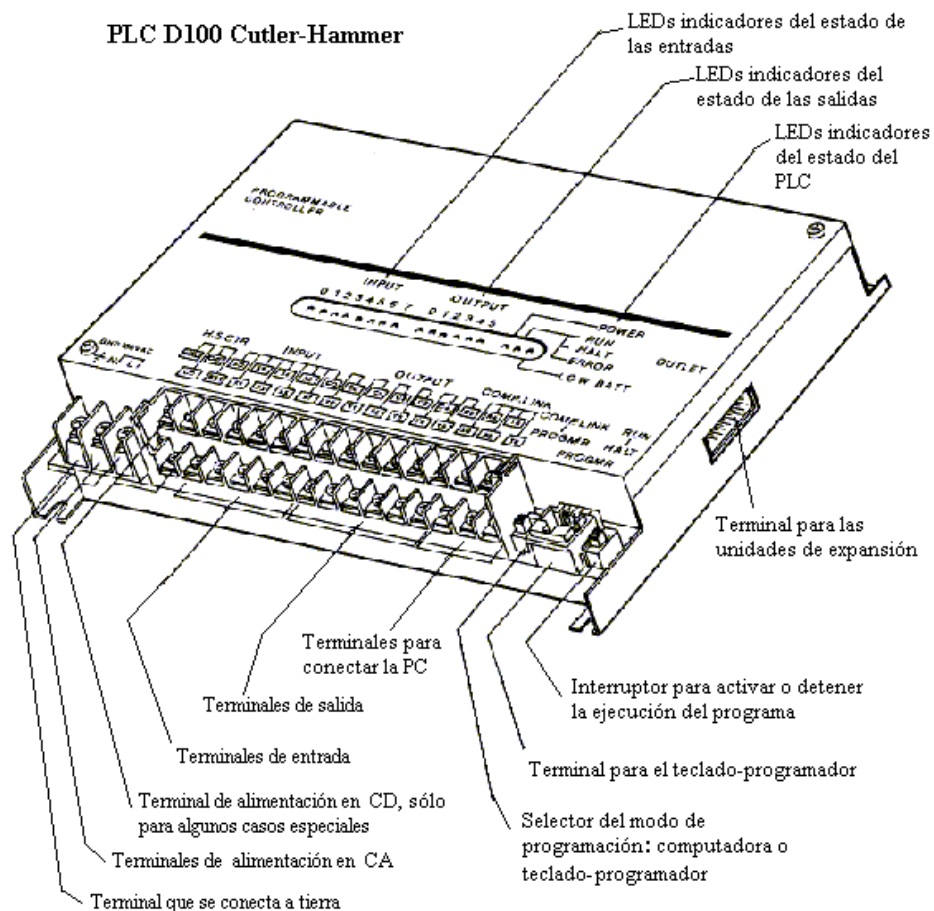


Fig. 5.1 Partes del PLC D100.⁶⁷

1. *Terminales de alimentación.* El voltaje de alimentación es de 127 V en corriente alterna pero permite un intervalo de 85 a 132 V.

⁶⁷ Cutler-Hammer. *D100 Computer programming user's manual*, cap. 4, p. 2.

2. *Terminal de conexión a tierra.* En este borne se conecta el cable de tierra para proteger al PLC contra descargas.

3. *Terminales de entrada.* Es la parte encargada de recibir las señales lógicas de entrada por medio de los dispositivos conectados a ella.

4. *Terminales de salida.* Es la parte que envía las señales lógicas de salida para activar los elementos que se desea controlar.

5. *Terminales de conexión con la computadora.* Se conectan al puerto de la computadora mediante un cable y un módulo convertidor RS-232.

6. *Selector de EJECUCIÓN/INTERRUPCIÓN (RUN/HALT).* Con este interruptor se habilita la ejecución del programa (*RUN*) o se ordena su interrupción (*HALT*).

7. *Selector del modo de programación.* Con este botón se selecciona el dispositivo de programación: computadora personal (PC) o teclado-programador (PGRM).

8. *LED's indicadores del estado del PLC.* Por medio de estos *LED's* se muestran los tres estados posibles en los cuales se podría encontrar el PLC:

- *ALIMENTACIÓN (POWER).* Cuando está encendido indica que el PLC ha sido energizado con el voltaje de alimentación.
- *EJECUCIÓN/INTERRUPCIÓN/ERROR (RUN/HALT/ERROR).* Cuando el *LED* está encendido indica que el PLC se encuentra ejecutando un programa. Si el *LED* parpadea indica que el PLC ha detenido la ejecución del programa y si está apagado significa que hubo un error durante la corrida.
- *BATERÍA BAJA (LOW BATT).* Si se activa está indicando que la batería interna del PLC está baja.

9. *LED's indicadores del estado de las entradas.* Cuando en una terminal de entrada se está recibiendo una señal lógica en nivel alto (127 V ca) se enciende el *LED* correspondiente.

10. *LED's indicadores del estado de las salidas.* Cada vez que una salida es activada se enciende su respectivo *LED*.

11. *Terminal para el programador.* En esta terminal se conecta el teclado-programador.

12. *Puerto de conexión con las unidades de expansión.* Las unidades de expansión de entradas-salidas se conectan en esta terminal.

5.3 Conexión de las terminales de entrada y salida

Dispositivos de entrada. Los dispositivos de entrada pueden ser transductores, *switches*, botones momentáneos (*push-buttons*), contactos, relevadores auxiliares, entre otros. Deben conectarse entre el nodo común (C) y su respectiva terminal de entrada, para activar una entrada debe existir un potencial de 127 V ca entre el común y dicha terminal.

En cada entrada pueden ser alambrados tanto contactos normalmente abiertos (NA) como contactos normalmente cerrados (NC) y a su vez, en el programa, se pueden configurar las entradas como NA o NC.

Dispositivos de salida. Se pueden emplear elementos como luces indicadoras, solenoides, relevadores auxiliares, contactos, alarmas e incluso otros controladores. Es importante señalar que el controlador no suministra energía para alimentar a los equipos de salida; es decir, sus terminales se comportan como simples interruptores que abren o cierran conectando dichos equipos con una fuente de alimentación externa proporcionada por el usuario.

Para una mejor descripción de cómo conectar los equipos a la entrada y salida del controlador véase la Figura 5.2.

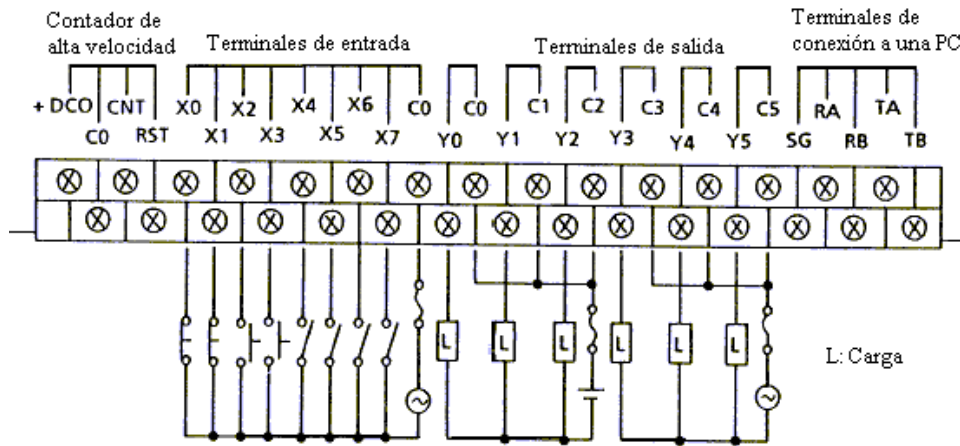


Fig. 5.2 Conexión de las terminales de entrada y salida.⁶⁸

5.3.1 Características de las entradas y salidas del PLC

Entradas

Voltaje nominal:	100 a 120 V ca.
Corriente de entrada:	10 mA (a 120 V ca - 60 Hz).
Retraso de encendido:	15 ms máximo.
Retraso de apagado:	15 ms máximo.
Nivel Alto (1 lógico) de entrada:	Ideal: 120 V ca. Mínimo: 75 V ca.
Nivel Bajo (0 lógico) de entrada:	Ideal: 0 V ca. Máximo: 25 V ca.

⁶⁸ Cutler-Hammer. *D100 Computer programming user's manual*, cap. 9, p. 3.

Voltaje máximo que pueden resistir: 1,500 V ca por 1 min.

Salidas

Intervalo de voltaje que pueden manejar: 100 a 240 V ca, 24 V cd.

Corriente máxima de salida: 2 A (con carga resistiva).
1 A (con carga inductiva).

Retraso de encendido: 15 ms máximo.

Retraso de apagado: 10 ms máximo.

Corriente de fuga: Menor a 1 mA.

Corriente mínima de carga: 20 mA / 12 V cd.

Voltaje máximo que pueden resistir: 1,500 V ca por 1 min.

5.4 Direccionamiento de los elementos del programa

Para que el controlador pueda reconocer cada uno de los elementos que forman parte de un programa es necesario que lleven una especie de identificación llamada dirección.

El direccionamiento de los elementos no sólo le sirve al PLC para saber si un contacto está asociado a un elemento interno o externo, o si pertenece a un contador o un temporizador; también le es útil al usuario ya que le permite manejar la información de sus programas en forma clara y ordenada.

Para dar la dirección de cada elemento se emplea una letra (que define el tipo de dispositivo) y un número en **sistema octal**. A continuación se muestran las direcciones que le corresponden a los elementos programables del D100 y la cantidad máxima disponible de ellos.

Elemento	Dirección	Cantidad
Entradas físicas	X0-X7	8
Salidas físicas	Y0-Y5	6
Relevadores internos	R0-R177	128
Bobinas retentivas	L0-L177	128
Temporizadores	T0-T77	16
Contadores	C0-C77	16
Registros de corrimiento	S0-S377	128
<i>Flip flops</i>	R o L	Disponible
<i>Master Control</i>	MS, MR	Disponible
<i>Jump</i>	JS, JR	Disponible

Tabla 5.1 Direccionamiento de los elementos del D100.⁶⁹

5.5 Tiempo de ejecución del programa

Para la mayoría de aplicaciones, el tiempo total de ejecución (TTE) del PLC D100 puede ser calculado de la siguiente forma:

$$\text{TTE} = \text{Tolerancia (2 ms)} + \text{Suma de los tiempos de ejecución de cada instrucción.}$$

En la Tabla 5.2 se presenta una lista con los tiempos de ejecución de las instrucciones básicas del D100.

⁶⁹ Cutler-Hammer. *D100 Computer programming user's manual*, cap. 6, p. 14.

Instrucción en pantalla	Número de pasos	Tiempo de ejecución (µs)
Contacto: -] [- , -] / [-	1	60
Conexión: — , , ⊥	1	60
Bobina: -()-	1	76
Bobina de temporizador: -(T)-	2	140
Bobina de contador: -(C)- -(RC)-	2	400

Tabla 5.2 Tiempos de ejecución de algunas instrucciones del D100.⁷⁰

5.6 Especificaciones del PLC D100 y su teclado-programador

Concepto	PLC D100	Teclado-programador
Alimentación	85 a 132 V ca	Proporcionada por el PLC
Voltaje máximo que puede soportar	1,500 V ca por 1 min.	—
Temperatura de operación	0 a 60 °C	0 a 40 °C
Humedad relativa	20 a 90 % sin condensación	20 a 90 % sin condensación
Vibraciones	16.7 Hz	16.7 Hz
Entorno del lugar de trabajo	No apto para gases corrosivos e inflamables	No apto para gases corrosivos e inflamables
Puesta a tierra	No más de 100 Ω	—
Masa	1.5 kg (3.3 lb)	0.3 kg (0.7 lb)

Tabla 5.3 Especificaciones del D100 y su programador.⁷¹

⁷⁰ Cutler-Hammer. *D100 Computer programming user's manual*, Apéndice B, p. 1.

⁷¹ Cutler-Hammer. *D100 Computer programming user's manual*, Apéndice C, p. 1.

5.7 Programa del sistema

El programa *Ladder* se introdujo en la memoria del PLC por medio de un programador porque lamentablemente no se consiguió la interfase para hacerlo por computadora, por esta razón no es posible presentar una impresión del archivo original pero se hizo una réplica del mismo en el editor de texto *Word* para poder visualizar su contenido.

El programa se realizó con base en el diagrama de relevadores descrito en el capítulo anterior (Figura 4.2, página 68) y cada uno de sus elementos se ha reflejado en un diagrama de escalera. Se han utilizado como entradas físicas los contactos de la manija y los relevadores de sobrecorriente (50D) y de recierre (79M); entretanto, como salidas físicas se tienen las luces indicadoras, la alarma de disparo y un relevador auxiliar. El resto de los elementos del sistema original (relés auxiliares X, Y, C y 52) fueron "alambrados" en el programa a través de los relevadores internos del PLC por lo que disminuyó el número de dispositivos empleados al igual que el cableado entre ellos.

Un elemento adicional que se incluyó en el programa, y que no tiene relación con el diagrama eléctrico del sistema original, es un temporizador ajustado a 0.5 segundos; esto se hizo con la finalidad de proveer un retraso de tiempo suficiente en la salida que va conectada al relevador de recierre 79M, debido a que el PLC ejecutaba el programa tan rápido que el 79M funcionaba erróneamente.

Para una mejor descripción del programa se dividió en 4 bloques que interactúan entre ellos para simular el funcionamiento del interruptor de potencia junto con los relevadores de sobrecorriente y de recierre. Ver Figura 5.3.

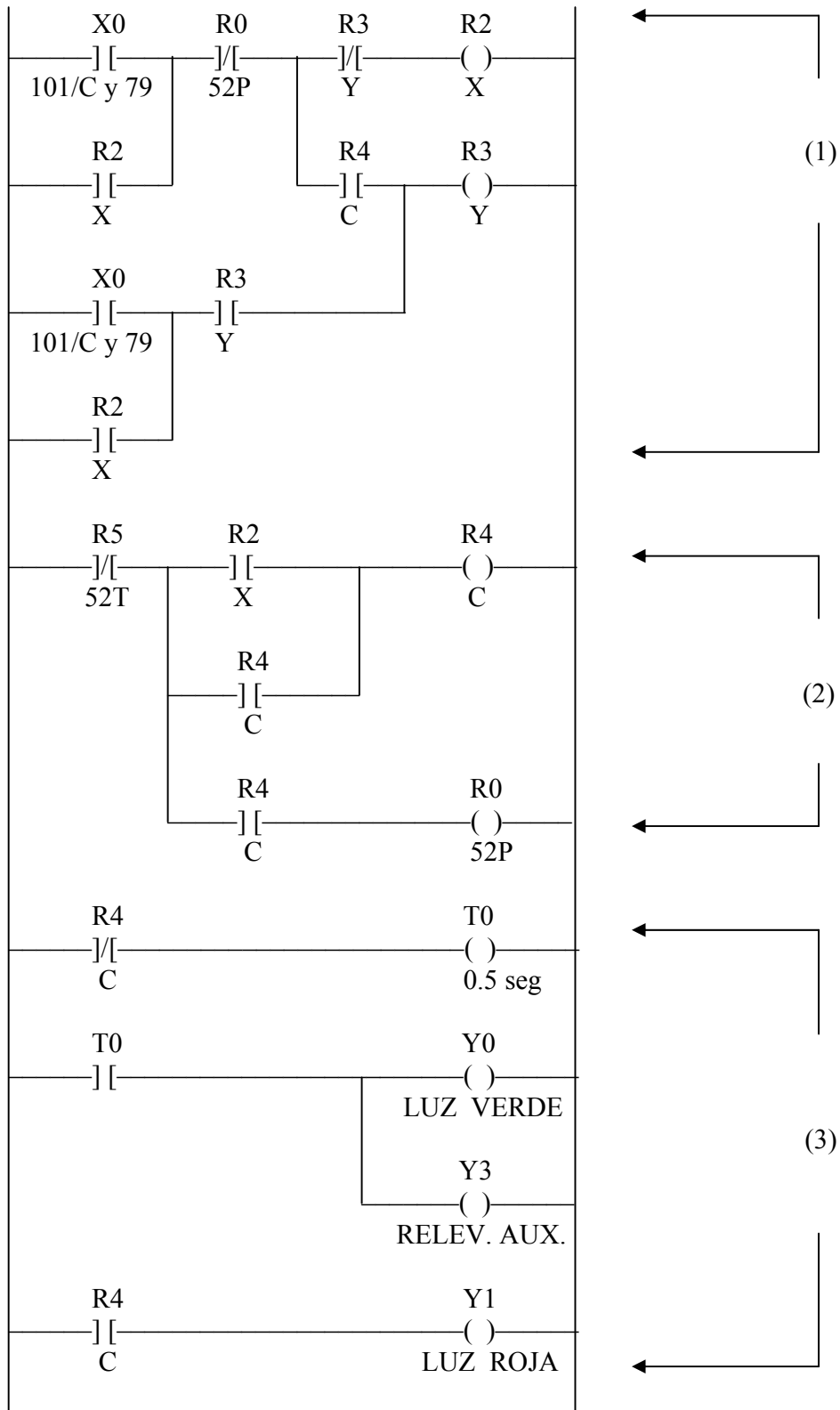


Fig. 5.3 Programa *Ladder* del sistema.

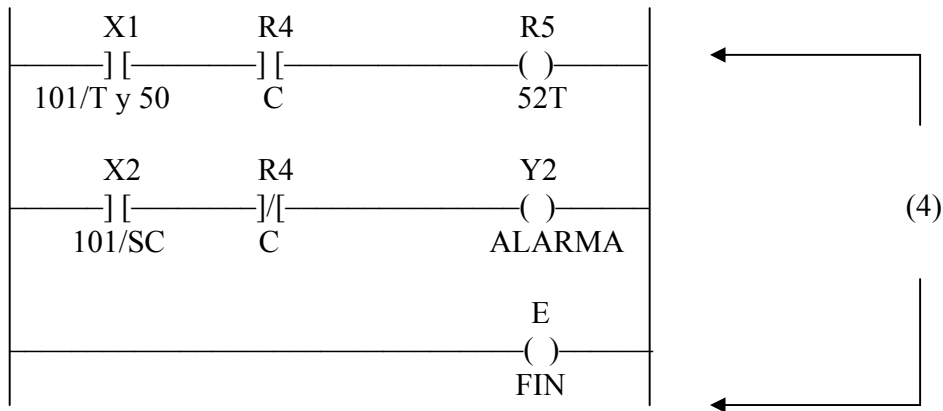


Fig. 5.3 Programa *Ladder* (continuación).

Notas:

1. Entradas físicas: X0, contactos de cierre (101/C y relevador de recierre 79M).
X1, contactos de disparo (101/T y relevador de sobrecorriente 50D).
X2, contacto deslizante o permanente (101/SC).
2. Salidas físicas: Y0, luz verde.
Y1, luz roja.
Y2, alarma.
Y3, relevador auxiliar.
3. Los caracteres que aparecen arriba de cada elemento corresponden a la nomenclatura propia del PLC D100.
4. Los caracteres que aparecen debajo de cada elemento corresponden a la simbología del circuito original.

5.7.1 Bloque 1

En este primer bloque están contenidas las funciones de cierre del interruptor y el antibombeo. El cierre está asociado a la entrada física X0 en la cual se conectaron (en paralelo) los contactos 101/C de la manija y C del relevador 79M para poder efectuar el cierre en forma manual o automática, respectivamente. La conexión entre dichos contactos se realizó en forma externa, no se observa en el programa.

Cuando se cierra X0 se enciende el auxiliar de cierre R2 (X) provocando la activación del auxiliar R4 (C) que se encuentra en el siguiente bloque, esto hará que la luz verde se apague y la roja se encienda indicando el cierre del interruptor.

Antibombeo. Cuando el interruptor se cierra con falla sólo se permitirá un cierre pero inmediatamente las protecciones lo abrirán de nuevo; si se fuerza el cierre (por imprudencia del operador o no se bloquea el 79M) para evitar que los contactos R4 (C) sostengan el cierre se emplea el auxiliar R3 (Y) que impide su funcionamiento a través del bloqueo de R2 (X). Gracias a este arreglo se evita la oscilación cierre-apertura del interruptor quedando abierto en forma definitiva y sólo podrá cerrarse cuando la falla sea eliminada.

5.7.2 Bloque 2

La segunda parte del programa es la encargada del cierre y apertura del interruptor mediante el contacto auxiliar R5 (52/T) dependiendo de las órdenes que reciba de los bloques 1 (cierre) y 4 (apertura). Cuando R5 está cerrado se permite el encendido de R4 (C) y en consecuencia se simula el cierre del interruptor; por el contrario, al abrirse R5 indica que se está recibiendo la orden de apertura.

5.7.3 Bloque 3

En esta sección se indica el estado del interruptor mediante el empleo de las salidas físicas Y0 (luz verde) para la apertura y Y1 (luz roja) para el cierre. Como las luces están conectadas al auxiliar R4 (C) el funcionamiento de ambas está ligado a la operación del bloque 2 que realiza la apertura o cierre de dicho contacto.

También se observa la presencia de un relevador auxiliar conectado a la salida Y3, este relevador se instaló para proteger al PLC porque la salida Y3 va conectada al relé de recierre (el cual maneja una tensión de 125 V cd en sus terminales) que excede por mucho el voltaje máximo de salida del controlador (24 V cd).

Finalmente, es importante señalar que tanto Y0 (luz verde) como Y3 (relevador auxiliar) están en serie con un contacto asociado al temporizador T0. Como ya se mencionó, el temporizador fue añadido porque el controlador corría el programa tan rápido que el relé 79M no podía detectar con certeza el estado del interruptor y efectuaba operaciones erróneas. En el capítulo siguiente se hablará con más detalle sobre los problemas que hubo con el 79M y la inclusión del temporizador como solución.

5.7.4 Bloque 4

Es el bloque dedicado a la apertura del interruptor. En la entrada física X1 se conectaron (en paralelo) los contactos 101/T de la manija con los de disparo del relevador de sobrecorriente 50D para realizar la apertura en forma manual o automática, respectivamente. Al igual que en la entrada X0, en la terminal X1 la conexión de los contactos mencionados se hizo externamente por lo que no se aprecia en el diagrama.

Al cerrarse X1, y como R4 (C) está cerrado, se energiza R5 (52T) provocando la apertura de sus contactos asociados que se hallan en el bloque 2, mediante esta acción se desconecta R4 (C) y se abre el interruptor encendiéndose la luz verde y apagándose la roja.

En esta última sección aparece otra entrada física (X2) en la cual se conectaron los contactos deslizantes de la manija (101/SC) en serie con R4 (C) y la salida Y2 (alarma de disparo). Con este arreglo la alarma se activa cuando hay un disparo por protecciones y se inhabilita si la apertura es manual.

Una observación muy importante es que mientras en el diagrama del sistema original los contactos 101/SC están conectados en serie con los 101/0 (ver Figura 4.2, página 68), en el programa *Ladder* únicamente aparecen los 101/SC. La aparente omisión se debe a que dicha conexión se hizo en forma externa porque ambos contactos son controlados mediante la manija y por lo tanto fueron considerados como una sola entrada física.

En la Figura 5.4 se presenta una fotografía del tablero que se desarrolló y que contiene los elementos que integran el sistema (PLC, relevadores de protección, relé auxiliar, alarma, luces y manija de control).

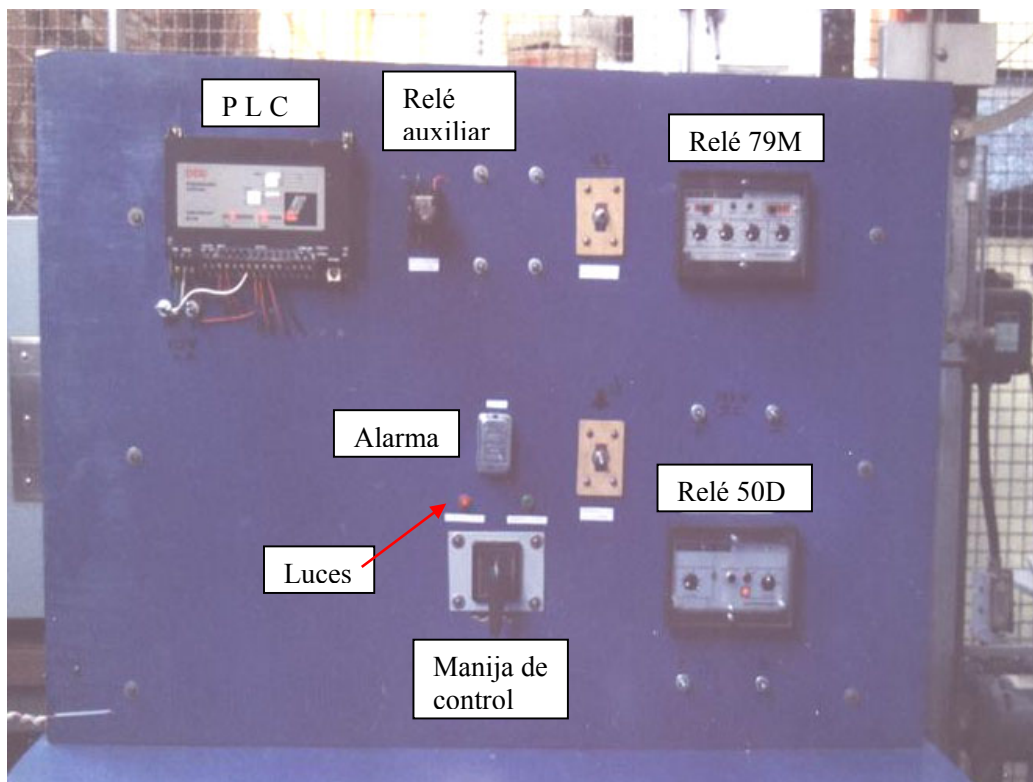


Fig. 5.4 Simulador de interruptor de potencia - sistema controlado por PLC.

A continuación se presenta el diagrama eléctrico del sistema mostrado en la figura anterior y en el cual se puede visualizar la conexión de los elementos de una manera clara. (Figura 5.5).

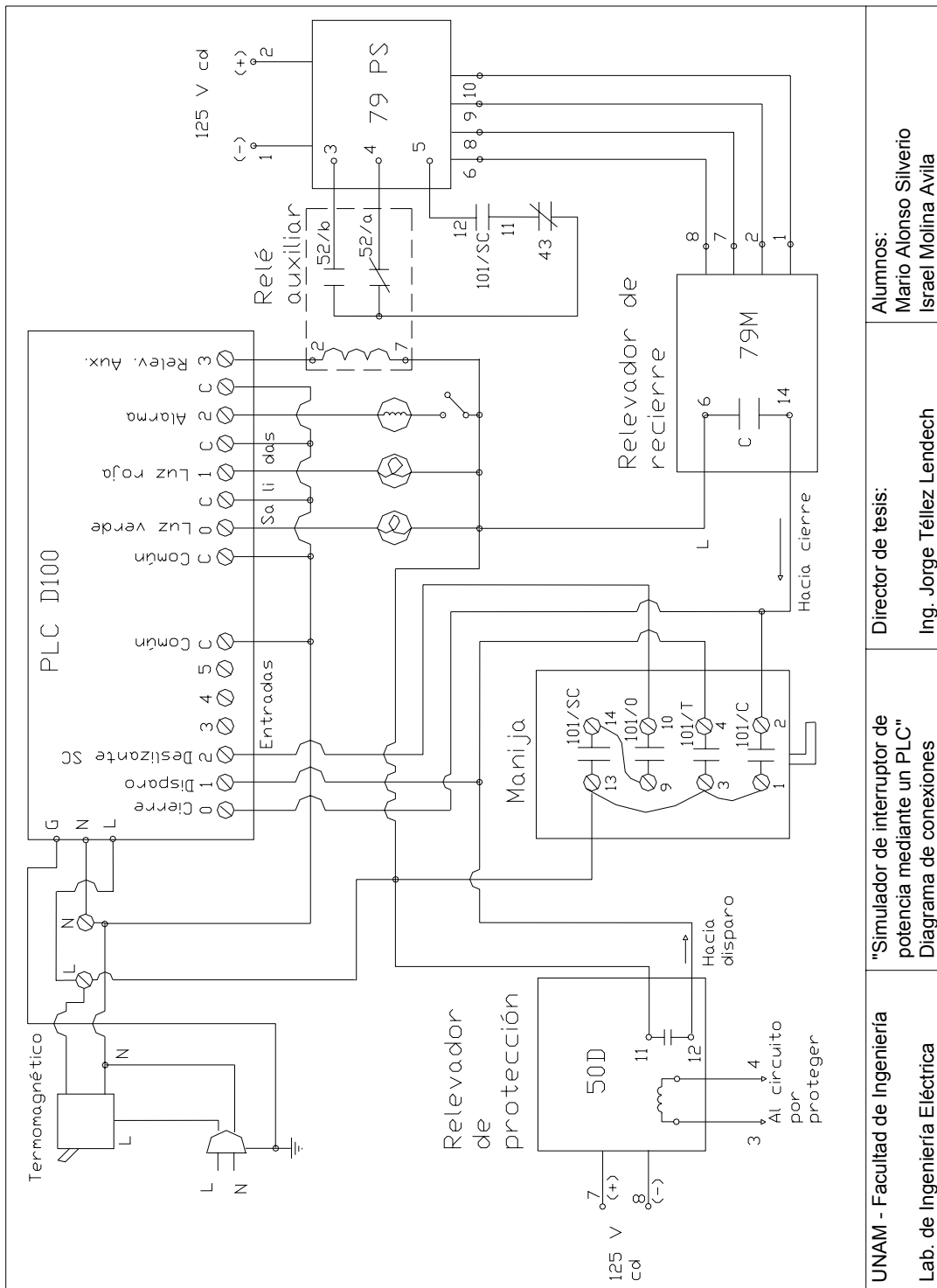


Fig. 5.5 Alambrado del sistema.

UNAM - Facultad de Ingeniería Lab. de Ingeniería Eléctrica	"Simulador de interruptor de potencia mediante un PLC" Diagrama de conexiones	Director de tesis: Ing. Jorge Téllez Lendeck	Alumnos: Mario Alonso Silverio Israel Molina Avila
---	--	---	--

6.1 Operación manual

El objetivo de la prueba de operación manual del sistema (apertura y cierre del interruptor de potencia) es el comprobar que el encendido de las luces coincida con la orden dada a través de la manija de control: luz roja para interruptor cerrado y luz verde para interruptor abierto, verificando, en este último caso, que no se active la alarma de disparo, que sólo debe responder cuando intervengan las protecciones. Ver Tabla 6.1.

Posición de la manija	Carátula de la manija	Luz verde	Luz roja	Alarma de disparo
Cierre	Rojo	Apagada	Encendida	Apagada
Apertura	Verde	Encendida	Apagada	Apagada

Tabla 6.1 Operación manual del sistema.

6.2 Apertura por protecciones

6.2.1 Circuito de prueba

Para observar el comportamiento del sistema bajo condiciones de falla, y a la vez evaluar el desempeño del relevador de protección 50D (sobrecorriente), se montó un circuito con un reóstato conectado en serie con un amperímetro y el propio relé. (Figuras 6.1 y 6.2).

Sin embargo, es importante señalar que en aplicaciones reales el relevador 50D va conectado a un transformador de corriente (ya sea monofásico o trifásico, según se requiera) que, en nuestro caso, no es necesario.

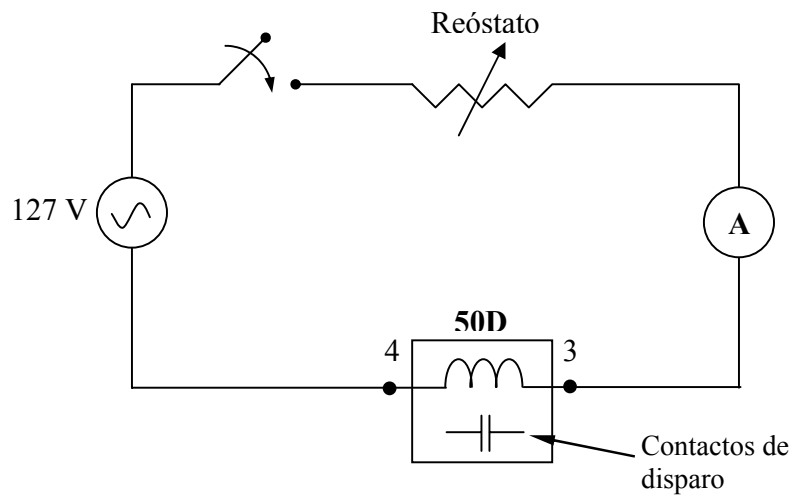


Fig. 6.1 Diagrama del circuito de prueba.



Fig. 6.2 Circuito de prueba conectado al sistema.

En la Fig. 6.1 se aprecia un interruptor de cuchilla mediante el cual se simulan los dos tipos de fallas: *temporales* (la cuchilla es cerrada sólo durante algunos segundos) y *permanentes* (la cuchilla queda cerrada indefinidamente).

6.2.2 Ajuste de corriente del 50D

Para ajustar el valor de la corriente de disparo del 50D se emplea el selector de corriente (*Pick up rating*) con el cual es posible ajustar ésta en un intervalo de 0.8 a 8 A con una resolución de 0.8A. En la prueba se escogió al azar la cantidad de 1.6 A para disparar al relé; a continuación se muestran las lecturas registradas.

Múltiplo de la resolución	Corriente de disparo ajustada (A)	Corriente de disparo medida (A)	Resistencia del reóstato (Ω)	Estado del relevador 50D	Estado de la alarma de disparo
1	0.8	0.85	130.0	Normal	Apagada
2	1.6	1.58	76.0	Disparo	Encendida
3	2.4	2.47	48.0	Disparo	Encendida
4	3.2	3.25	37.0	Disparo	Encendida

Tabla 6.2 Corriente de disparo del 50D.

6.2.3 Ajuste de tiempo del 50D

Dado que una de las características del 50D es su disparo con retraso de tiempo, se procedió a realizar esta prueba con el propósito de verificar dicho funcionamiento. En la Tabla 6.3 se pueden ver los tiempos seleccionados y los que se midieron con un cronómetro.

Tiempo seleccionado (s)	Tiempo registrado (s)
0.5	0.53
1	1.07
1.5	1.56
2	2.10

Tabla 6.3 Tiempo de disparo del 50D.

Para más detalle, a continuación se menciona el procedimiento llevado a cabo con los ajustes hechos al relevador para dar la corriente medida en el circuito de prueba.

Primeramente, el selector de corriente (*Pick up rating*) es ajustado al doble del valor de la resolución mínima (1.6 A) mientras que el selector del tiempo de disparo (*Time*) es puesto en 1.5 segundos. (Figura 6.3-a).

Al ajustar la corriente de prueba, el relevador dispara en tiempo y en la carátula del amperímetro se observa que la aguja marca una corriente aproximada de 1.58 A, este valor es un poco menor que el de ajuste, pero se encuentra dentro del margen de tolerancia especificado por el fabricante. Ver Figura 6.3-b.

Además, en la Figura 6.3-a se pueden distinguir un *LED* amarillo que ha encendido al alcanzar el valor de corriente seleccionado y una bandera anaranjada que indica que los contactos del relé han sido activados.

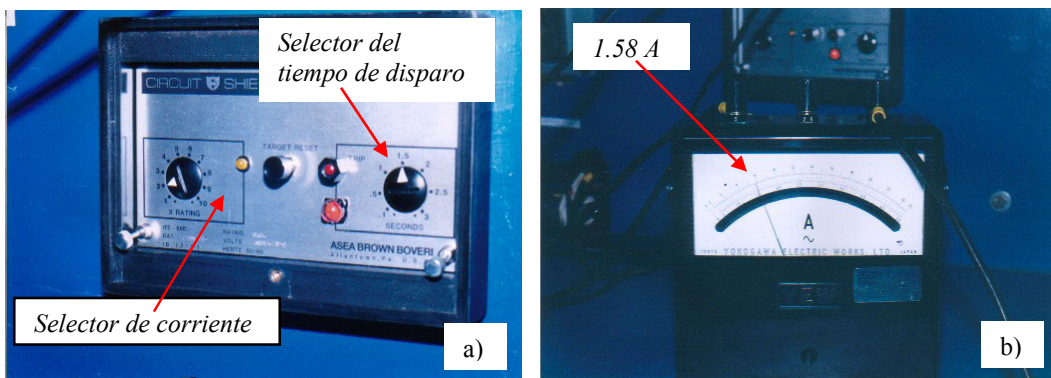


Fig. 6.3 a) Ajustes del 50D. b) Medición de corriente.

6.3 Ejecución del recierre

Antes de pasar a las pruebas realizadas con el relé de recierre 79M es conveniente mencionar, primeramente, la forma en la que se conectó éste con el PLC y hablar sobre las

dificultades que se presentaron durante la operación del relevador ante falla permanente y el procedimiento mediante el cual fueron resueltas.

6.3.1 Conexión del 79M con el PLC

Como se mencionó en el capítulo anterior, hubo que conectar un relevador auxiliar en la terminal de salida del PLC que va hacia los bornes correspondientes del relé 79M encargados de reconocer la posición del interruptor de potencia debido a un par de razones que a continuación se describen:

- Proteger al controlador dado que su módulo de salidas soporta una tensión máxima de 24 V cd mientras que el 79M maneja un voltaje de 125 V cd en sus terminales.
- Reproducir el funcionamiento de los contactos 52/a y 52/b activando solamente una salida del PLC.

En este último caso y dado que 52/a (contacto normalmente abierto) y 52/b (contacto normalmente cerrado) operan encontrados, era necesario activar, al mismo tiempo, un par de contactos (uno que abra mientras el otro cierra) para imitar así su funcionamiento según el esquema de control del interruptor de potencia. La manera de lograr esto fue usando el relevador auxiliar, ya que energizando su bobina se accionan a la vez dos de sus contactos asociados (uno normalmente abierto y otro normalmente cerrado).

Sin embargo, en el sistema dichos contactos aparecen invertidos (52/b es el normalmente abierto y 52/a el normalmente cerrado) porque el encendido de la bobina del relevador auxiliar está directamente asociado al encendido de la luz verde (interruptor abierto). Esto significa que al abrirse el interruptor, 52/b cierra y 52/a abre; por el contrario, cuando el interruptor es cerrado la luz verde se apaga, la bobina del relé auxiliar también es desactivada y en consecuencia 52/b abre mientras que 52/a cierra por lo que, a fin de cuentas, el circuito de control opera como se había especificado. (Figura 6.4).

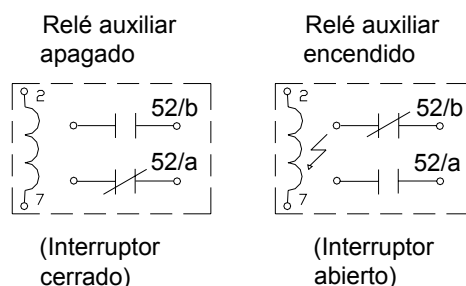


Fig. 6.4 Disposición de 52/a y 52/b en el relevador auxiliar.

6.3.2 Problemas con falla permanente

Al efectuarse las pruebas del relé 79M ante falla temporal, los recierres previstos se efectuaron sin problema alguno; empero, al ser simuladas las condiciones de una falla permanente, el relevador no se bloqueaba (pese a que ya se habían efectuado todos los intentos de cierre programados) tratando de cerrar el interruptor al estar disparado por las protecciones, produciéndose un efecto similar al de abrir y cerrar la manija continuamente.

Para solucionar este inconveniente se analizaron las circunstancias que provocaban la activación del 79M: el relevador funciona sólo cuando el interruptor de potencia es abierto por los equipos de protección (no se activa si el disparo es manual). Para identificar si la apertura es manual o automática se emplean los contactos permanentes de la manija (101/SC) y como éstos trabajaban correctamente entonces se buscó la respuesta en el funcionamiento de los contactos 52/a y 52/b.

Durante el desarrollo de las pruebas de apertura y cierre del interruptor (tanto manual como por protecciones) se observó que la activación del relevador auxiliar (contactos 52/a y 52/b) y el encendido de las luces se efectuaban en forma muy rápida, por lo que se pensó que el relé 79M funcionaba erróneamente al no registrar con tiempo la operación de dichos contactos.

Como la rapidez de operación del relevador auxiliar y de las luces depende de la estructura del programa (y por ende, del tiempo de ejecución del mismo) se supuso que el problema podría estar en el PLC. De hecho el controlador corre todo el programa en 5 ms, que es el tiempo total de ejecución (TTE), y para demostrarlo se puede emplear el método descrito por el fabricante:

Considerando que fueron programadas 50 instrucciones (cifra indicada en la pantalla del teclado-programador) y tomando en cuenta 60 microsegundos por cada una de ellas tenemos

$$\text{TTE} = 50 \times 60 \mu\text{s} = 3000 \mu\text{s} = 3 \text{ ms}$$

más un tiempo de tolerancia de 2 ms que recomienda el fabricante

$$\text{TTE} = 3 \text{ ms} + 2 \text{ ms} = 5 \text{ ms}$$

Para observar en forma más lenta la operación de los contactos 52/a y 52/b con el relé 79M (sin involucrar al resto del sistema) se conectaron temporalmente un par de interruptores al relevador y se activaron en forma manual (ver Figura 6.5); obviamente, al ser esto mucho más lento que el funcionamiento del PLC, el 79M pudo detectar los cambios que se producían en los contactos mencionados cada vez que se emulaba una falla (transitoria o permanente) y trabajó en forma correcta.

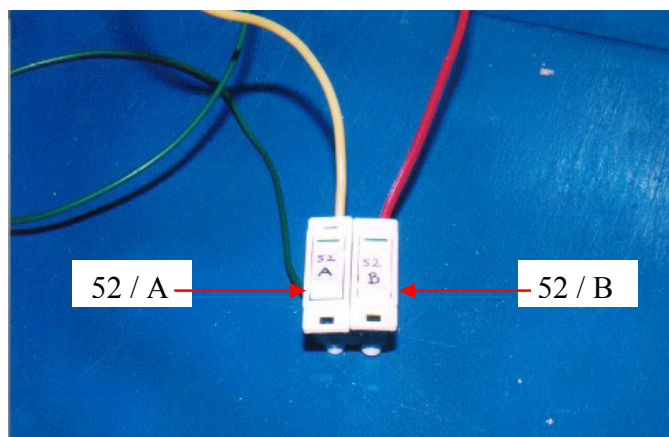


Fig. 6.5 Contactos manuales 52/a y 52/b.

Como resultado de lo anterior se decidió que la solución era proporcionar un retraso de tiempo adecuado en la salida del PLC que va conectada al relevador auxiliar con la finalidad de que el accionamiento de los contactos 52/a y 52/b fuese más lento y pudiera ser detectado por el relé de recierre.

El retraso se efectuó añadiendo un temporizador en la rama del programa correspondiente a la salida Y3 (ver Figura 5.3, página 94). Mediante ensayos con diferentes tiempos de ajuste se determinó que un retraso de 0.5 segundos era el intervalo idóneo para que el relé 79M detectara sin dificultades el accionamiento de 52/a y 52/b, pues un tiempo menor significaba pasar otra vez por los problemas mencionados, y por otro lado, un tiempo mayor desfasaba el funcionamiento de las luces indicadoras con respecto a los contactos; no se olvide que 52/a y 52/b están relacionados con la operación de las luces.

6.3.3 Pruebas realizadas

Una vez que el relé 79M trabajó correctamente se pudieron desarrollar las pruebas enfocadas a cotejar su funcionamiento con el resto del sistema.

a) Activación del recierre. Se hicieron varias aperturas del interruptor de potencia tanto en forma manual como con el relevador de protección.

El objetivo de esta prueba fue comprobar que el relé no se activara cuando la apertura del interruptor fuese manual y solamente respondiera ante el disparo por protecciones. En ambos casos el equipo cumplió con lo que se había especificado.

Con esta prueba también se verificó el funcionamiento del contacto 43 (permisivo de recierre) que se instaló para habilitar o impedir la acción del recierre, es decir, si no se desea que opere el 79M simplemente se coloca el interruptor 43 en "apagado".

b) Ajuste del número de recierres. Mediante esta prueba se verificó que la perilla para seleccionar el número de recierres funcionara adecuadamente, se programaron 1, 2 y 3 recierres. En todos los casos el relevador trabajó de manera satisfactoria, tanto con fallas temporales donde se ejecutaron los recierres previstos, como con fallas permanentes donde el equipo se bloqueó (como se requería) después de haber realizado los intentos de cierre proyectados.

c) Ajuste del tiempo de cada recierre. Con el objeto de evaluar el reloj interno del relevador se ajustó el tiempo de cada recierre (por medio de su respectiva perilla) y se cotejó mediante un cronómetro. En la Tabla 6.4 se observan algunas de las lecturas registradas.

Nota: Para verificar el tiempo de operación con mayor exactitud se ajustó el selector de cada recierre lo más cercano posible al número impreso en la carátula respectiva ya que en las posiciones intermedias no aparece (y de hecho no da) el tiempo exacto que se desea programar.

Instrucción programada	Ajuste del reloj del relé (s)	Tiempo medido (s)
Primer recierre	2	2.1
Segundo recierre	15	15.1
Tercer recierre	30	29.9

Tabla 6.4 Tiempos de ejecución de cada recierre.

Para ilustrar con mayor claridad las pruebas mencionadas véase la fotografía de la Figura 6.6.

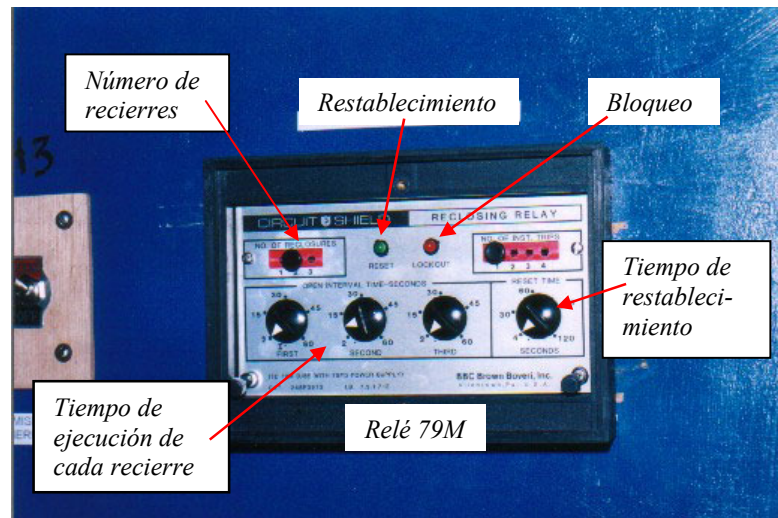


Fig. 6.6 Ajustes hechos al relé 79M.

Se programaron dos intentos de cierre al colocar el tornillo de número de recierres (*No. of reclosures*) en 2. El selector del primer recierre (*Open interval time*) se ubicó en 2 segundos y el siguiente, por tratarse de una posición intermedia entre 2 y 15, se consideró como un valor de 8.5 segundos.

Con estos arreglos, el primer recierre se debe realizar 2 segundos después de que ha abierto el interruptor, si resulta exitoso (el interruptor permanece cerrado durante al menos 4 segundos, que es lo ajustado en el tiempo de restablecimiento o *Reset time*) el *LED* verde (restablecimiento o *Reset*) se enciende y el relevador vuelve a su estado original.

No obstante, si la falla persiste, el relevador de protección volverá a disparar al interruptor por lo que el 79M intentará un segundo cierre 8.5 segundos posteriores a la apertura. De nueva cuenta, si el cierre prevalece, el relevador regresa a la normalidad; pero si el interruptor es disparado otra vez, el 79M se bloquea automáticamente, se enciende el *LED* rojo (bloqueo o *Lockout*) y se suspende la orden de cierre, por lo que el interruptor queda abierto en forma definitiva.

6.4 Posibilidades de crecimiento

A pesar de que en este tablero únicamente se ha empleado un relevador (de sobrecorriente) es posible utilizar también otros equipos de protección.

El sistema fue diseñado de un modo tal que permite la inclusión de otros relevadores sin necesidad de volver a programar el PLC. Dado que, si bien una de las mayores ventajas de los PLC's es el poder *reprogramarlos* cuantas veces se requiera, en este caso para hacerle modificaciones al programa sería indispensable conseguir el teclado-programador o la interfase para PC, lo cual es un tanto difícil porque el controlador utilizado ya es un modelo discontinuado.

De hecho, como se mencionó en el capítulo 5, el programa del sistema fue creado empleando un teclado-programador que fue facilitado (durante tres meses) por la Cutler-Hammer de México.

Para añadir otro relevador, simplemente se deben conectar sus respectivos contactos de disparo (en paralelo) con sus homólogos del 50D y 101/T de la manija (Figura 6.7). El motivo de esto es que por la lógica del PLC y el circuito de control basta con que uno de los contactos se cierre, transfiera 127 V ca a la terminal 01 del controlador (entrada para el disparo) y se ordene la apertura del interruptor. Ver inciso 5.7 del capítulo 5.

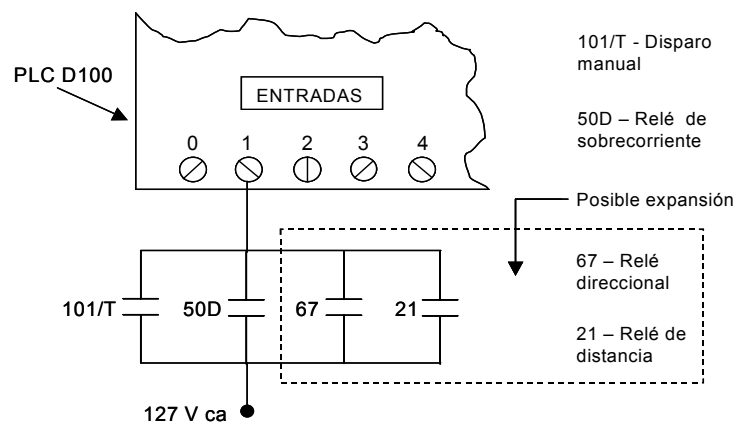


Fig. 6.7 Inclusión de otros relevadores de protección.

Este capítulo está dividido en dos partes, en la primera de ellas se abordan brevemente algunas de las características de los equipos de protección que se emplean en la actualidad y en la otra se describe el funcionamiento de un programa de cómputo (simulador) desarrollado por la compañía ABB para capacitar a los usuarios en el manejo de algunos de sus relevadores.

7.1 Relevadores microprocesados

Son relevadores de amplio uso en nuestros días, basados en microprocesadores, que tienen la ventaja de integrar múltiples funciones en un solo módulo, incluyendo sistemas de comunicación, lo cual permite que se puedan conectar con otros equipos para desempeñar tareas no sólo de protección sino también de supervisión, control y mando a distancia.

Anteriormente, los esquemas de protección se diseñaban con base en relevadores unifuncionales que eran conectados entre sí; en la actualidad, en cambio, un solo aparato puede contener varios tipos de elementos de protección lo cual ha reducido significativamente los costos, tamaño de los tableros de control, cableado entre dispositivos y se han mejorado los tiempos de instalación, prueba y puesta en servicio.⁷² Ver Fig. 7.1.

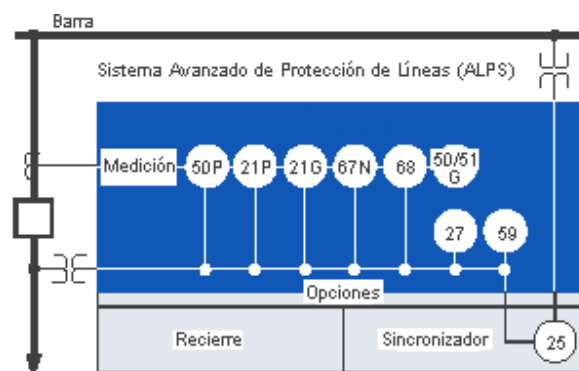


Fig. 7.1 Relevador ALPS (para protección de líneas).⁷³

⁷² Siemens. *Catalog of relays*, 2002, p. 5.

⁷³ General Electric. *Power management catalog 1998*, s/p.

No obstante lo anterior, los principios de la ingeniería de protecciones de hace veinte o treinta años siguen vigentes, por ejemplo, el hecho de que los equipos actuales contengan circuitos capaces de ejecutar las mismas tareas que hacían en conjunto distintos relevadores convencionales no ha evitado el seguir utilizando equipos tanto para protección primaria como secundaria.

7.1.1 Protección y medición integradas

Con la tecnología que ofrecen estos relevadores, además de proteger los diversos equipos que integran un sistema de potencia, se pueden realizar operaciones para el control y monitoreo permanente de cada uno de ellos. Por ejemplo, cuando se presenta un problema, se registran los eventos producidos como variaciones de voltajes y corrientes de cada fase, cambios de frecuencia, excesos de temperatura en los devanados de transformadores y máquinas rotatorias, entre otros. Adicionalmente, se especifica el tipo de falla, su duración y localización; cuáles fueron los relevadores que operaron y la fecha y hora del suceso. Todo lo anterior puede ser almacenado en la memoria de las computadoras enlazadas con los equipos de protección y también es posible imprimir la información o guardarla en discos de respaldo. (Figura 7.2).

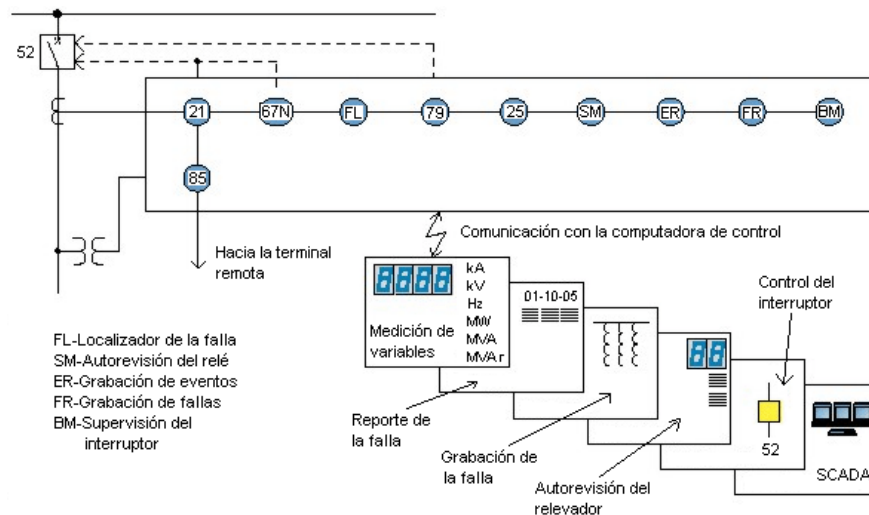


Fig. 7.2 Diversas funciones integradas en un relé moderno.⁷⁴

⁷⁴ Siemens. *Catalog of relays*, 2002, p. 5.

7.1.2 Comunicaciones y enlace con una PC

Un relevador microprocesado puede programarse haciendo uso de su teclado incorporado o bien por medio de una computadora; en este último caso la comunicación se realiza a través del puerto serie RS232 pudiéndose manejar sólo un relevador a la vez (Figura 7.3). No obstante, algunos fabricantes también proveen a sus equipos con un puerto RS485 el cual es muy útil porque permite controlar varios relevadores mediante una misma computadora.



Fig. 7.3 Relevador conectado a una PC.⁷⁵

La mayoría de los relevadores microprocesados cuentan con módulos capaces de reconocer los protocolos de comunicación más comunes sin necesidad de emplear convertidores o adaptadores adicionales. Algunos de estos protocolos son: IEC-60870-5-103, PROFIBUS-FMS o PROFIBUS-DP, DNP 3.0 y los desarrollados expresamente para tareas de automatización como MODBUS RTU y Ethernet (IEC-61850).⁷⁶ La ventaja de emplear protocolos normalizados es que se pueden enlazar equipos de marcas y modelos diferentes siempre y cuando sean compatibles.

Debido a las posibilidades de comunicación entre los relés modernos y las computadoras personales, éstas últimas no sólo se emplean para modificar los valores de ajuste y verificar el funcionamiento de los elementos de protección sino además para realizar el control y la supervisión de los sistemas de potencia en forma local o remota.

⁷⁵ Siemens. *Catalog of relays*, 2002, p. 6.

⁷⁶ Idem, p. 15-16.

Lo que sí recomiendan los fabricantes es que al automatizar una subestación (principalmente, si se desea controlarla a distancia) es necesario conectar los equipos y sistemas de comunicaciones por medio de redes de fibra óptica para evitar interferencias electromagnéticas.

7.1.3 Comparación entre los relés electromecánicos y los microprocesados

Conforme los sistemas de potencia han crecido en capacidad y tensión, las protecciones se han ido complicando tanto en su lógica como en la cantidad y calidad de sus componentes. Hay sistemas que, por un lado, tienen líneas cortas densamente cargadas y con varios circuitos en paralelo; y por el otro, poseen líneas muy largas que enlazan a plantas de gran capacidad de generación con centros de alta densidad de consumo. Por ello, se requieren relevadores cada vez más rápidos, precisos y confiables para mantener la continuidad del fluido eléctrico cuando se presentan disturbios como sobrecargas, variaciones de frecuencia, corrientes de corto circuito, etcétera. Los relevadores microprocesados ofrecen múltiples ventajas sobre los electromecánicos por lo que cada vez se usan con mayor frecuencia en diversas subestaciones y plantas generadoras.⁷⁷

Por ejemplo, los equipos con microprocesadores producen menor saturación en los transformadores de corriente, principalmente en esquemas en los que el cableado y el equipo de control representan una carga (*burden*) importante. También están diseñados para operar con las curvas básicas de corriente-tiempo, es decir, trabajan instantáneamente o con tiempo inverso, muy inverso y extremadamente inverso. Son más resistentes a los impactos y sacudidas. Son más precisos debido a la mayor resolución en sus derivaciones y como tienen un mínimo de partes móviles, sus márgenes de coordinación son menores por lo que el tiempo de libramiento de una falla se reduce.

Asimismo, los relés microprocesados necesitan solamente un juego de transformadores de instrumento gracias a que tienen funciones de protección y medición integradas, esto ha reducido los costos porque se emplea menos equipo. En cambio, hace

⁷⁷ Raull Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*, p. 456.

algunos años era práctica común utilizar dos juegos de transformadores, uno era empleado por los equipos de protección y el otro por los de medición.⁷⁸

Los relés de hoy tienen circuitos para supervisar su propio funcionamiento e indicar si existe alguna anomalía en sus elementos *sensores*, de disparo o en los transformadores de instrumento; cuando esto sucede el equipo se bloquea y envía una señal de alarma para que sea inspeccionado por el personal encargado.

En resumen, los relevadores microprocesados presentan las siguientes cualidades:

- Diseño compacto y bajo costo gracias a la integración de múltiples funciones en un solo módulo.
- Desarrollan tareas de protección, control y medición lo cual permite no sólo la protección sino también la supervisión y monitoreo del sistema de potencia.
- Toda la información acerca de la red eléctrica (flujos de potencia, comportamiento de la carga y fallas) puede ser visualizada en tiempo real y además es posible imprimirla o almacenarla en las computadoras para su posterior discusión y análisis.
- Los relés están diseñados para compartir su información con una computadora (local o remota) gracias a que emplean protocolos estandarizados de comunicación; esto facilita que se puedan emplear equipos de marcas y modelos diferentes.

Sin embargo, no están exentos de inconvenientes como son la susceptibilidad a interferencias electromagnéticas causadas por la maniobra de interruptores de potencia, uso de radiotransmisores y descargas atmosféricas; esto hace necesario acompañarlos con filtros para acondicionar las señales de entrada y evitar operaciones erróneas. Su fuente de

⁷⁸ Siemens. *Catalog of relays*, 2002, p. 5.

poder debe proporcionar una buena regulación de tensión porque los circuitos electrónicos suelen ser afectados por los cambios bruscos de voltaje. También deben estar adecuadamente aterrizados y protegidos contra picos de corriente y voltaje.

7.2 Simuladores de relevadores

Algunos fabricantes de relevadores han desarrollado programas de cómputo (*software*) que simulan, en ambiente gráfico, la mayoría de las funciones que tienen integradas dichos equipos con el fin de familiarizar a los usuarios en el manejo de éstos.

Las principales ventajas que ofrecen estos programas de simulación (también llamados simuladores) son permitir al usuario visualizar la carátula, botones y terminales del relevador, modificar los valores de ajuste y realizar pruebas de rutina para observar su funcionamiento sin necesidad de contar físicamente con el aparato o el tener que trasladarse hasta el lugar de la aplicación.

El propósito de este apartado es analizar uno de tantos simuladores que existen en el mercado, como el creado por la firma ABB, el cual está contenido en el disco compacto *Product simulators, Version 2.0* (Simuladores de producto, versión 2.0). En él, básicamente, se describe su manejo y cómo se realiza la simulación de un relevador determinado, el cual fue escogido del menú *SPACOM SIMULATORS* (SIMULADORES SPACOM), que incluye los simuladores de 19 relevadores de la serie SPACOM junto con sus respectivos manuales.

Aunque se ha puesto principal atención en la simulación de relevadores es importante señalar que el CD contiene otros dos menús: *MicroSCADA SIMULATORS* (SIMULADORES MicroSCADA) -el cual reproduce las operaciones de control y supervisión de una subestación mediante un sistema SCADA- y *MicroSCADA MULTIMEDIA*, que es una presentación donde se muestran algunos de los productos desarrollados por ABB para la industria eléctrica en las áreas de protección, control y automatización. (Figura 7.4).

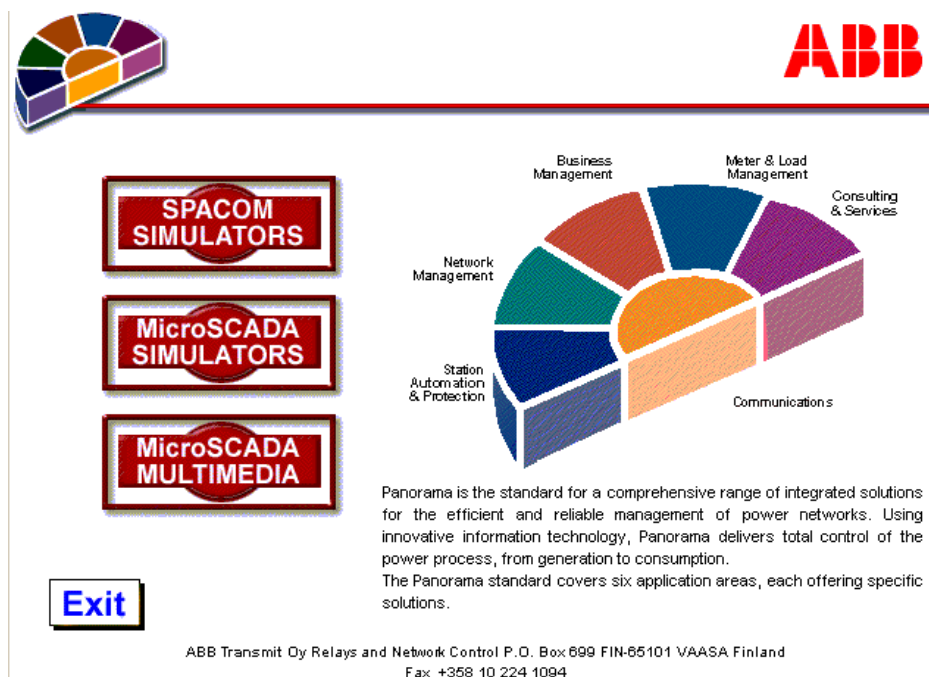


Figura 7.4 Contenido general del CD.⁷⁹

7.2.1 Simulador SPACOM

Al entrar al menú *SPACOM SIMULATORS* se visualizan dos ventanas -ver Fig. 7.5- una que enlista los modelos de relevadores que pueden ser simulados junto con sus respectivos manuales y una más en la que aparecen los instructivos de otros equipos de la serie SPACOM:

1. Simuladores (*Simulators*). Contiene el directorio de los relevadores que pueden ser simulados. El botón *Run Simulator from CD* sirve para ejecutar la simulación desde el CD, *Setup Simulator from CD* se usa para instalar el programa desde el CD y realizar la simulación a través del disco duro de la computadora y *Simulator Manual* despliega el manual del relé seleccionado y a simular.

⁷⁹ ABB. *Product simulators, Version 2.0.*

2. Manuales en texto (*Hypertext Manuals*). Contiene el listado de los manuales de otros relés de la serie SPACOM. Al oprimir el botón *View Manual* (Ver Manual) aparece el instructivo del elemento elegido.

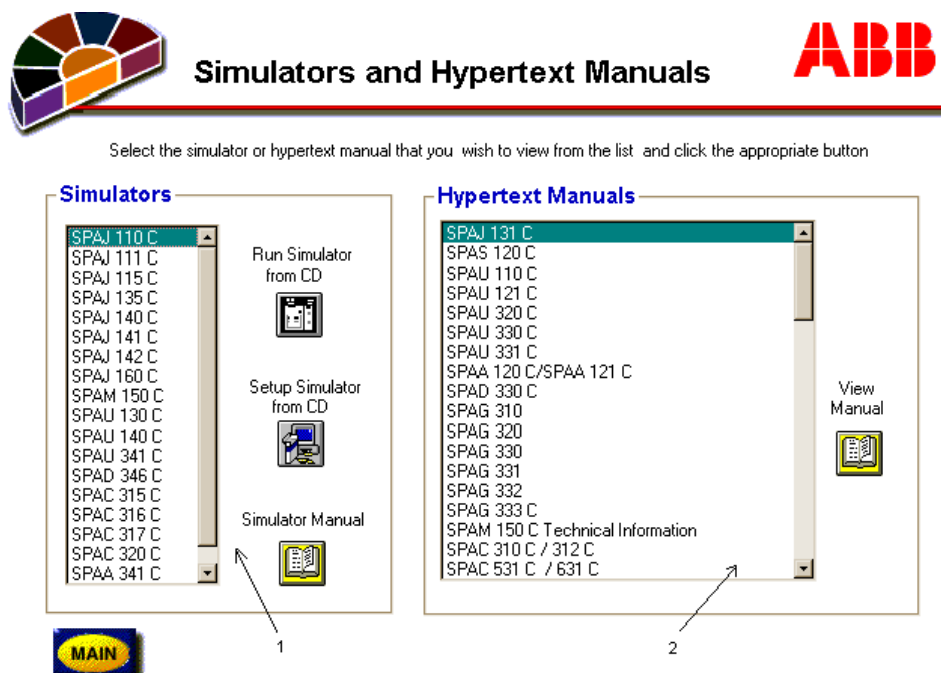


Fig. 7.5 Simuladores y manuales contenidos.⁸⁰

7.2.2 Descripción de algunos relés del simulador

Como se mencionó anteriormente, el programa contiene el simulador de cada uno de los 19 diferentes modelos de relevadores y que, en su mayoría, son similares tanto en funcionamiento como en ajuste. A continuación se muestran las características de algunos de ellos de acuerdo con la información contenida en los manuales correspondientes.

SPAJ 110 C. Relevador de protección contra falla de fase a tierra; provisto con elementos de medición de sobrecorriente e interfase serial para la conexión con subestaciones y sistemas de control de redes por medio de fibra óptica. Útil como protección primaria o de respaldo.

⁸⁰ ABB. *Product simulators, Version 2.0.*

SPAJ 115 C. Relevador de protección contra falla de fase a tierra que cuenta con medición de sobrecorriente, pantalla numérica, interfase serial para la comunicación por fibra óptica y memoria de eventos. Puede emplearse para proteger motores, generadores y transformadores.

SPAJ 135 C. Relevador de protección para redes de distribución que detecta corriente de falla a tierra y sobrecorriente; provisto con pantalla de cristal líquido, memoria de grabación de eventos e interfase para fibra óptica.

SPAJ 140 C. Relevador para alimentadores radiales; combina protección contra sobrecorriente y corriente de falla a tierra; cuenta con ajustes en dos diferentes intervalos de corriente, pantalla alfanumérica y memoria de grabación de eventos.

SPAJ 160 C. El manual no está disponible.

SPAM 150 C. Relé de falla a tierra y medición de sobrecorriente; útil para proteger motores trifásicos de corriente alterna de mediana y gran capacidad; provisto con detección de sobrecarga térmica, desequilibrio de carga entre fases y corriente por debajo del ajuste seleccionado. También posee un módulo para comunicación por fibra óptica.

SPAU 130 C. Relevador de protección contra sobrevoltaje y bajo-voltaje para motores, generadores y transformadores. Puede operar con tiempo definido o tiempo inverso; cuenta con bloqueo automático en bajo-voltaje, pantalla alfanumérica, memoria de eventos e interfase serial para la conexión (por fibra óptica) con subestaciones a distancia.

SPAU 341 C. Relé regulador de voltaje para subestaciones de distribución; sus principales funciones son la regulación manual o automática del voltaje de los transformadores y la compensación de líneas. Cuenta con pantalla de cristal líquido, memoria de eventos, módulo de comunicación para fibra óptica y sistema de bloqueo ante sobrecorriente y bajo voltaje.

SPAC 320 C. Una completa protección para motores asíncronos medianos; cuenta con indicadores locales y remotos del estado del relevador en tiempo real, sistema de bloqueo para evitar operaciones no requeridas y protección por sobrecarga térmica.

Sus elementos de sobrecorriente y de falla a tierra pueden operar con tiempo definido o instantáneo; también mide corriente de fase, calidad de la energía, potencia activa y reactiva. Posee una interfase serial para el intercambio de datos con su respectivo tablero de control.

SPAA 341 C. Relevador de protección para alimentador; contiene un elemento de falla a tierra y otro de sobrecorriente, un módulo direccional de falla a tierra y un relé de recierre.

REF 541 C. Sistema completo de protección, control, medición y supervisión de redes de voltaje de mediana tensión que puede ser utilizado con cualquier tipo de interruptor. Cuenta con entradas para transformadores convencionales de corriente y de potencial y tiene elementos propios de medición de corriente y voltaje.

7.2.3 Entorno de trabajo del simulador

Después de seleccionar el modelo de relé que se desea simular, se cuenta, como ya se mencionó antes, con dos opciones para ejecutar el programa: desde el CD apretando el botón *Run Simulator from CD* o desde el disco duro de la PC, empleando *Setup Simulator from CD*.

Siempre que se inicia una simulación, en la pantalla aparece una guía que proporciona información básica para moverse dentro del simulador. Con base en esta lógica, se procederá primero a describir brevemente los aspectos más importantes acerca del ambiente de trabajo del programa para, posteriormente, analizar con más detalle las funciones de cada menú.

Al igual que otros programas desarrollados en ambiente *Windows*, el simulador posee una Barra de título, que indica el modelo de relevador que se está utilizando; una Barra de menús, que contiene los listados de todas las órdenes que permiten trabajar con el programa; y una Barra de herramientas, que incluye algunas de las órdenes contenidas en los menús. (Figura 7.6).



Fig. 7.6 Menús y barra de herramientas.⁸¹

Por lo general, en la Barra de herramientas aparecen las funciones empleadas con mayor frecuencia; cuando se desconoce la tarea que desempeña cualquiera de sus elementos, se coloca el puntero o flecha del ratón sobre el icono en cuestión y después de algunos segundos aparecerá una pequeña leyenda explicando la función que realiza. Lo anterior se conoce como *Tip* o Ayuda de herramienta, ver la siguiente figura.



Fig. 7.7 Ayuda de herramienta.⁸²

7.2.4 Encendido y mandos del relevador

Para activar el relé seleccionado se requiere oprimir el botón *POWER ON* (ENCENDIDO) de la Barra de herramientas o también puede hacerse desde el menú *Options* (Opciones) eligiendo *Turn on/off power switch* (Botón de encendido-apagado);

⁸¹ ABB. SPAJ 115 C, Version 1.1.

⁸² Idem.

cuando es encendido, el aparato inicia un examen de rutina indicándolo en la pantalla de su panel frontal.

Para identificar los botones o mandos de ajuste hay que desplazar la flecha del ratón sobre la carátula del equipo, si el puntero del ratón se convierte en una pequeña mano o en un destornillador el usuario puede realizar las modificaciones que necesite para la simulación. (Ver Fig. 7.8).

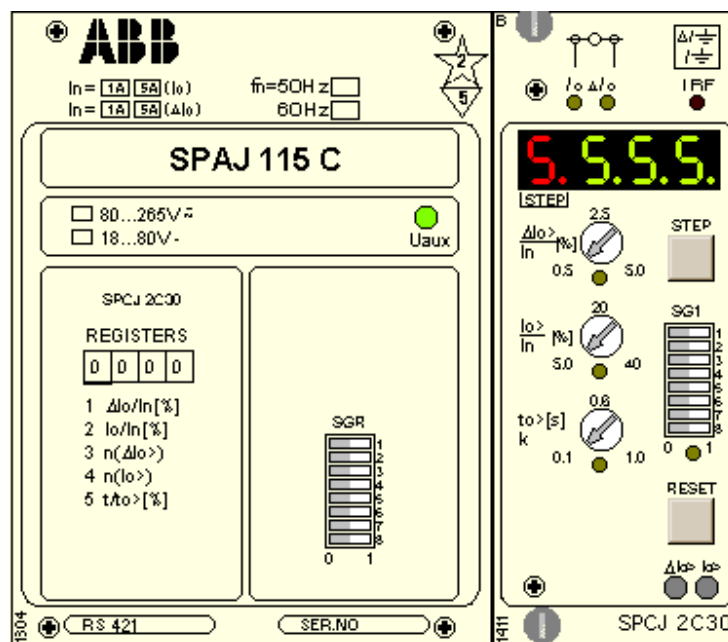


Fig. 7.8 Carátula del relevador simulado.⁸³

Como se puede observar en la figura anterior, los controles a los que tiene acceso el usuario son:

- Potenciómetros. Su icono es una flecha dentro de un disco que puede girarse para aumentar o disminuir el valor de ajuste correspondiente. Para modificar su estado es necesario señalarlos con el ratón y esperar a que surja el desarmador; con el botón derecho del ratón el potenciómetro gira hacia la derecha, si se desea

⁸³ ABB. SPAJ 115 C, Version 1.1.

que la rotación sea en sentido contrario entonces se emplea el botón izquierdo. (Figura 7.9).

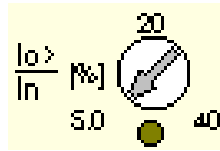


Fig. 7.9 Potenciómetro virtual.⁸⁴

- Micro-interruptores o *Dip-switches*. Son pequeños interruptores de dos posiciones (encendido o apagado) que permiten modificar el funcionamiento del relevador según los requerimientos del usuario.

Para alterar su estado deben señalarse con el ratón y aguardar a que aparezca la mano, luego hay que oprimir (con el botón izquierdo) sobre la región de color claro; es importante señalar que la parte sombreada es la que indica la posición de estos interruptores. (Figura 7.10).

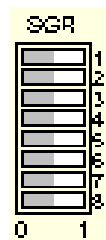


Fig. 7.10 Micro-interruptor.⁸⁵

7.2.5 Barra de menús o menú principal

Está integrada por cuatro menús los cuales contienen a su vez diversas funciones para realizar la simulación. A continuación se describen cada uno de ellos.

⁸⁴ ABB. *SPAJ 115 C, Version 1.1.*

⁸⁵ Idem.

7.2.5.1 Menú de *File* (Archivo)

- *View Clipboard* (Ver el portapapeles). Sirve para ver el contenido del portapapeles.
- *Copy to Clipboard* (Copiar y enviar al portapapeles). Con esta opción podemos seleccionar y copiar una región de la pantalla de simulación para enviarla al portapapeles; posteriormente, la imagen almacenada puede ser pegada en un documento de *Office* o en programas que manejan gráficos como *Paint* o *Corel Draw*.
- *Print Simulator Window* (Imprimir la ventana del simulador). Imprime la ventana correspondiente a la parte frontal del relevador desplegado.
- *Print Setup* (Ajustes de impresión). Se usa para cambiar la configuración de la impresión.
- *Exit* (Salir). Interrumpe la simulación y nos permite salir del programa.

7.2.5.2 Menú de *Options* (Opciones)

- *Clear All Registers* (Limpiar todos los registros). Borra todas las lecturas almacenadas en la memoria del relevador.
- *Simulate Current Injection* (Simular inyección de corriente). Esta función simula la aplicación de corriente para el disparo del relevador. Al ejecutar esta orden se despliega una ventana de opciones para seleccionar la corriente requerida (diferencial o de falla a tierra, según el tipo de protección a simular) y su magnitud en amperes. El valor de la corriente del TC conectado puede escogerse entre dos escalas (1 ó 5 A) y las flechas que aparecen sirven para aumentarla o disminuirla. (Fig. 7.11).

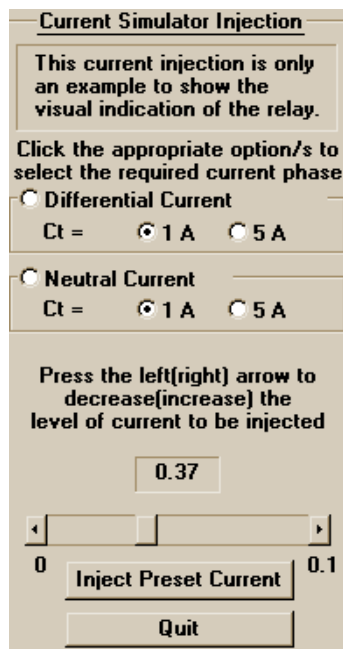


Fig. 7.11 Ventana de inyección de corriente.⁸⁶

En la ventana también se aprecian dos botones: el de *Inject Preset Current* (Inyectar corriente ajustada) que sirve para suministrar la corriente al relevador y el de *Quit* (Salir) que se emplea para salir de la ventana.

- *Forced Output Activation* (Activación forzada de las salidas). Sirve para disparar al relevador en forma manual. Cuando se entra a esta opción, el programa despliega un diagrama interno del relé con la finalidad de poder observar el comportamiento de las salidas. El disparo forzado se produce al oprimir simultáneamente los botones *STEP* (AJUSTE) y *RESET* (REPOSICIÓN).

El usuario también puede provocar el disparo forzado cambiando la posición de los micro-interruptores. (Figura 7.12).

⁸⁶ ABB. SPAJ 115 C, Version 1.1.

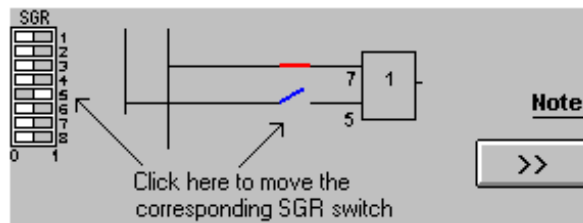


Fig. 7.12 Disparo forzado mediante los *Dip-switchs*.⁸⁷

- *Turn on/off power switch*. Sirve para encender o apagar el relevador.

7.2.5.3 Menú de *Preferences* (Preferencias)

- *Show/Remove Toolbar* (Mostrar u ocultar la barra de herramientas). Despliega o desaparece del monitor la barra de herramientas.
- *Change LED color* (Cambiar el color de los *LED's*). Se emplea para cambiar el color de los *LED's* indicadores y *Dip-switchs* del relevador. Al entrar a esta función aparece una ventana con diferentes opciones como se ve en la Figura 7.13.

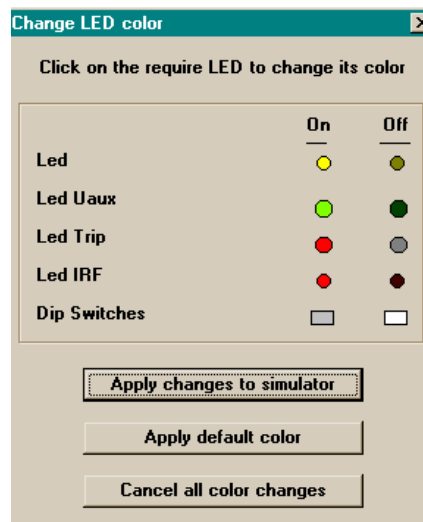


Fig. 7.13 Cambio de color de los *LED's*.⁸⁸

⁸⁷ ABB. *SPAJ 115 C, Version 1.1.*

⁸⁸ Idem.

Para cambiar el color de cualquier elemento se debe seleccionar con el ratón. El botón *Apply changes to Simulator* (Aplicar cambios en el simulador) sirve para confirmar la modificación de los colores, el de *Apply default colours* (Utilizar los colores originales) restablece los colores que fueron programados por el fabricante y el de *Cancel all color changes* (Cancelar todo cambio de color) anula todos los cambios hechos.

- *Change simulator speed* (Modificar la velocidad del simulador). Cambia la velocidad de ejecución del simulador. Cuando esta opción es seleccionada se despliega la ventana de la Figura 7.14.

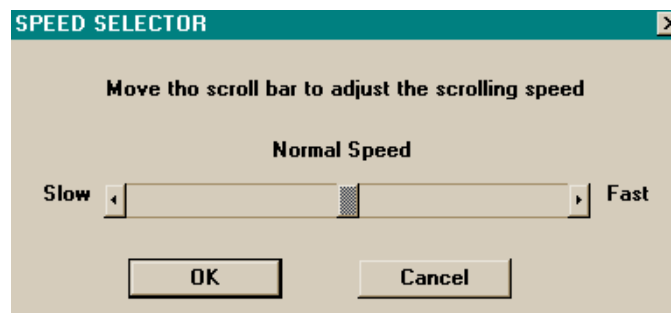


Fig. 7.14 Selector de velocidad.⁸⁹

Para incrementar la velocidad de ejecución se presiona la flecha derecha; con la flecha izquierda se produce el efecto contrario. Al oprimir *OK* (De acuerdo) se confirman los cambios hechos y con *Cancel* (Cancelar) se ignoran.

- *Change Background* (Cambiar el fondo de la pantalla). Cambia el color y la apariencia del fondo de la pantalla del simulador.
- *Change to factory settings* (Regresar a los valores de ajuste originales). Cambia todos los ajustes hechos por los valores programados de fábrica; se

⁸⁹ ABB. SPAJ 115 C, Version 1.1.

debe tener cuidado al seleccionar esta opción porque se borrarán todos los valores programados por el usuario.

- *Change customised settings* (Cambiar ajustes personales) y *Save as customised settings* (Guardar como ajustes personales). Estas opciones sirven para conservar los cambios hechos a los valores de ajuste.

Mediante la opción *Save as customised settings* se permite al usuario mantener fijos los ajustes hechos desde un principio en el programa de simulación; dichos ajustes pueden ser actualizados en el momento que se desee usando *Change customised settings*, sin embargo, al seleccionar esta orden se pierden todos los cambios anteriores.

Es importante mencionar que todos los ajustes que se han hecho son guardados automáticamente en un archivo cuando el relevador es apagado o al salir del programa. Los valores se reestablecen cuando el programa se ejecuta de nuevo.

7.2.5.4 Menú de *Help* (Ayuda)

- *Help on Simulator* (Ayuda del simulador). Abre la ventana con los temas de ayuda del simulador.
- *Show SPAJ Relay manual* (Mostrar el manual del relevador SPAJ). Despliega el manual del relevador en simulación.
- *How to use help* (Cómo usar la ayuda). Muestra las indicaciones necesarias para aprovechar todas las opciones de ayuda del programa.
- *Getting started tutorial* (Desplegar la guía o *tutorial*). Despliega la guía de información básica para trabajar con el simulador.

- *About* (Información sobre el simulador). Muestra la información referente al número de versión y derechos de autor del programa y los recursos del sistema.

7.2.6 Barra de herramientas

Dado que la Barra de herramientas contiene varias de las funciones descritas con anterioridad, solamente se identificarán las tareas que corresponden a cada uno de los botones, ver Figura 7.15.

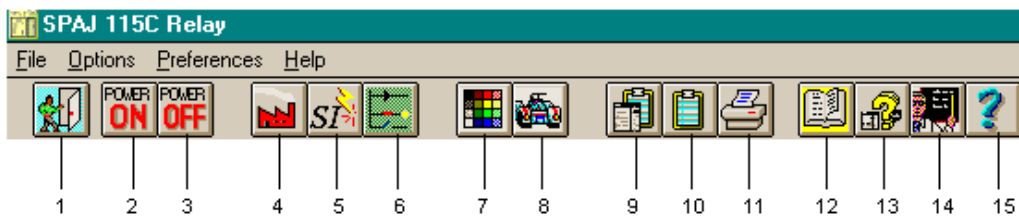


Fig. 7.15 Barra de herramientas.⁹⁰

1. Sale del programa de simulación.
2. Enciende el relevador simulado.
3. Apaga el relevador simulado.
4. Restablece los valores programados de fábrica.
5. Simula la inyección de corriente.
6. Activa el modo de disparo forzado.
7. Sirve para cambiar el color de los *LED's* indicadores y *Dip-Switchs*.

⁹⁰ ABB. SPAJ 115 C, Version 1.1.

8. Cambia la velocidad del simulador.
9. Copia cualquier parte de la pantalla del simulador y la manda al portapapeles como una imagen.
10. Despliega el contenido del portapapeles (imágenes copiadas).
11. Imprime la imagen mostrada en la pantalla del simulador.
12. Muestra el manual del relevador que está siendo simulado.
13. Abre la ventana con los temas de ayuda.
14. Despliega la guía de información básica para trabajar con el programa.
15. Despliega información acerca del programa de simulación como número de versión y derechos de autor.

7.2.7 Uso del simulador

Con el propósito de mostrar cómo trabaja el programa se procederá a la simulación de un relevador en particular, el modelo *SPAJ 115 C* de la serie SPACOM, describiéndose primero sus partes y funciones principales para después pasar a su simulación.

Es importante señalar que una de las mayores limitaciones del programa es el no poder simular ningún tipo de conexión externa, solamente es posible manipular los controles de la carátula y los elementos que disparan los contactos de salida del relevador; este inconveniente impide evaluar su desempeño en conjunto con algún circuito eléctrico de prueba.

El simulador presenta otra desventaja: no se pueden observar los diferentes tiempos de operación del relé porque, independientemente del intervalo programado, el disparo de las salidas siempre se realiza en forma casi instantánea.

7.2.7.1 Generalidades sobre el relevador simulado

El relevador *SPAJ 115 C* es un equipo que combina protección diferencial y protección contra sobrecorriente por falla a tierra; puede operar con características de tiempo definido o de tiempo inverso, según se programe; el fabricante recomienda su uso para proteger motores, generadores y transformadores.

Cuenta con pantalla numérica, interfase para la comunicación por fibra óptica y memoria de eventos; en la Figura 7.16 se observa la parte frontal del relé con sus botones de mando e indicadores respectivos.

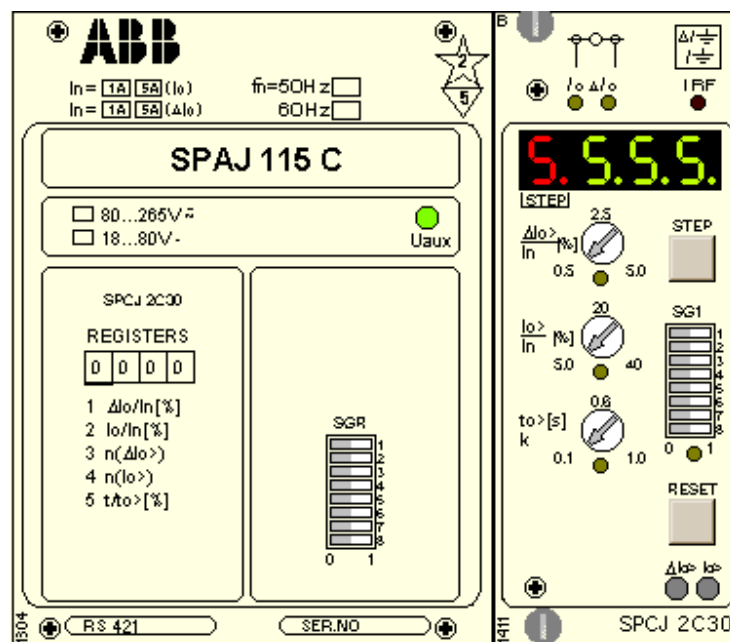


Fig. 7.16 Vista frontal del relevador *SPAJ 115 C*.⁹¹

⁹¹ ABB. *SPAJ 115 C, Version 1.1.*

7.2.7.2 Módulo principal

El relevador está formado por dos módulos: el principal (cuya imagen se aprecia en la Figura 7.17) y el de control, *SPCJ 2C30*, que se verá posteriormente.

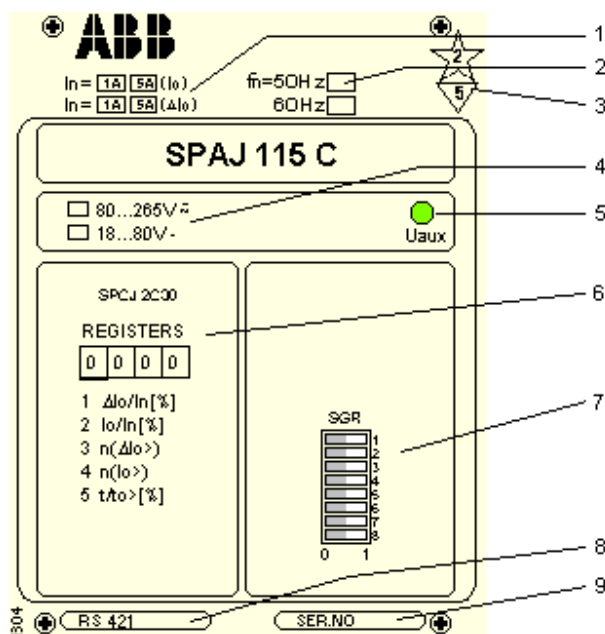


Fig. 7.17 Módulo principal del relé *SPAJ 115 C*.⁹²

1. *Indicador de corriente ajustada en el relé.* El relevador puede ser conectado a un transformador de corriente trifásico de corriente nominal de 1 ó 5 A en el secundario. Cuando la corriente nominal en el secundario del TC es de 5 A ($I_n = 5\text{ A}$) se emplean las terminales 1-2, 4-5 y 7-8 del relevador; en el caso de que $I_n = 1\text{ A}$ entonces las terminales utilizadas son 1-3, 4-6, y 7-9. Para la característica de protección contra falla a tierra el TC se conecta a las terminales 25-26 (cuando la corriente del secundario es de 5 A) o a los bornes 25-27 si la corriente nominal es de 1 A.

2. *Frecuencia de operación.* La frecuencia de operación puede ser de 50 ó 60 Hz. La frecuencia del relevador está indicada con una marca "X".

⁹² ABB. *SPAJ 115 C, Version 1.1.*

3. *Voltaje de prueba.* Terminales del voltaje de prueba del aislamiento; la escala máxima es de 2 kV, 50 Hz, 1 min. Además, cuenta con bornes para el voltaje de prueba de impulso con las siguientes características: 5 kV, 1.2/50 μ s, 0.5 J.

4. *Módulo de entradas-salidas y alimentación de energía.* Este módulo consta de una fuente de alimentación, cuatro contactos de salida, el circuito de control de dichos contactos y circuitos electrónicos de señalización. Los bornes para la alimentación así como las entradas y salidas están localizados en la parte trasera del aparato. La fuente de alimentación está disponible en dos versiones con los siguientes intervalos de voltaje de entrada:

- El modelo *SPTU 240SI*, $U_{aux} = 80$ a 265 V ca o cd.
- El modelo *SPTU 48SI*, $U_{aux} = 18$ a 80 V cd.

El intervalo de voltaje de entrada está indicado con una "X" en el panel frontal del relevador.

5. *LED U_{aux} .* LED indicador del suministro de energía; se enciende cuando la fuente de alimentación funciona correctamente.

6. *Registros de información.* En este módulo se guarda la información referente a la función que está realizando el relevador. Se compone de cinco registros de memoria los cuales muestran su contenido en la pantalla numérica; el dígito que se encuentra más a la izquierda (en color rojo) indica el número de registro y las tres cifras restantes corresponden al valor almacenado.

Para acceder al menú de los registros se presiona (durante un segundo) el botón *STEP* el cual se encuentra en la parte derecha de la carátula del aparato; si se desea ver la información almacenada y/o los valores ajustados, entonces se aprieta dicho botón durante dos segundos.

El contenido de los cinco registros es borrado al presionar simultáneamente los botones *STEP* y *RESET* (en el simulador esto puede hacerse solamente en el modo de disparo forzado).

La información que se guarda en cada registro es la siguiente:

Registro 1, $\Delta I_o/I_n$ [%]. Magnitud (en por ciento) de la corriente diferencial máxima (ΔI_o) con respecto a la corriente nominal del TC (I_n) ajustada en el relé. El contenido del registro cambia cuando:

- El valor de la corriente excede al valor que se encuentra almacenado.
- Se activa el relevador; dado que el nuevo dato es guardado en memoria. Por otro lado, si el valor de la corriente diferencial excede aproximadamente el 60 % de la corriente nominal, el contenido del registro se muestra así: " – – – ".

Registro 2, I_o/I_n [%]. Magnitud (en por ciento) de la corriente de tierra máxima (I_o) con respecto a la corriente nominal del TC (I_n) seleccionada en el relevador. El contenido del registro cambia bajo las siguientes condiciones:

- Cuando el valor de la corriente excede al valor que se encuentra almacenado.
- Al operar el relevador; ya que el nuevo dato es almacenado en memoria.

Registro 3, $n(\Delta I_o >)$. Número de veces que ha sido activada la protección diferencial (ΔI_o); el número máximo de operaciones que puede indicar este registro es 255.

Registro 4, $n(I_o >)$. Número de veces que ha operado la protección de falla a tierra (I_o); el número máximo de operaciones que se pueden registrar es 255.

Registro 5, $t/t_o >$ [%]. Duración (en por ciento) del tiempo en que ocurre el disparo por falla a tierra (I_o) con respecto al período programado. El contador comienza desde cero

cuando el relevador detecta el exceso de corriente, al momento de activarse la protección la lectura será del 100 %.

Cero. Cuando aparece el número 0 el relé indica el estado en que se encuentran las funciones que fueron programadas. Bajo tal condición, el dígito que se encuentra más a la derecha de la pantalla es el que proporciona la información según la Tabla 7.1.

Lectura mostrada	Información correspondiente
0 - - 0	Relevador sin problemas
0 - - 1	Detección de corriente diferencial bloqueada
0 - - 2	Detección de corriente de tierra bloqueada
0 - - 3	Medición de corrientes diferencial y a tierra bloqueadas

Tabla 7.1 Indicadores de estado de las funciones programadas en el *SPAJ 115 C*.

7. *Programación de los contactos de salida.* Tanto la parte de protección diferencial como la de protección de sobrecorriente a tierra están internamente conectadas a los contactos de salida que controlan la apertura de interruptores y la señalización que indica el estado de los mismos. Los contactos de salida pueden ser habilitados o bloqueados desde el panel frontal manipulando los *Dip-switchs* SGR; aunque algunos están conectados directamente con su respectiva etapa de protección y operan automáticamente, tal es el caso de los contactos A (protección diferencial $\Delta I_{o>}$) y B (protección por falla a tierra $I_{o>}$).

Los *Dip-switchs* empleados para habilitar o impedir el disparo de los contactos de salida son:

SGR/1. Interruptor que habilita o inhabilita la señal de bloqueo externo del módulo E/F del relevador.

SGR/2. Interruptor que habilita o inhabilita la operación de la protección de sobrecorriente a tierra ($I_{o>}$) del contacto D correspondiente.

SGR/3. No se usa.

SGR/4. Interruptor que habilita o inhabilita la operación de la protección de sobrecorriente a tierra ($I_{o>}$) del contacto D correspondiente.

SGR/5. Interruptor que habilita o inhabilita la activación de la protección de sobrecorriente a tierra ($I_{o>}$) del contacto C correspondiente.

SGR/6. Interruptor que habilita o inhabilita la activación de la protección de sobrecorriente a tierra ($I_{o>}$) del contacto A correspondiente.

SGR/7. Interruptor que habilita o inhabilita la operación de la protección diferencial ($\Delta I_{o>}$) del contacto C correspondiente.

SGR/8. Interruptor que habilita o inhabilita la acción de la protección diferencial ($\Delta I_{o>}$) del contacto B correspondiente.

Los interruptores de potencia pueden ser directamente controlados por los contactos de salida A o B del relevador; por lo tanto, cualquier etapa de protección contra sobrecorriente puede tener su propio disparo con su respectiva señal de alarma. Tales características permiten al relé *SPAJ 115 C* controlar dos interruptores de potencia en forma independiente.

8. Número de orden. Este número es solicitado por el fabricante cuando se realizan pedidos de partes complementarias, accesorios y/o refacciones.

9. Número de serie. Es un dato único que se le asigna a cada relevador durante el proceso de fabricación; sirve para efectos de certificación y registro de venta.

7.2.7.3 Módulo de control *SPCJ 2C30*

El módulo de control cuenta con una configuración similar a la del módulo principal; todos los ajustes pueden ser programados empleando los botones, potenciómetros y micro-interruptores que se encuentran en la parte frontal.

El módulo *SPCJ 2C30* está compuesto por los siguientes elementos (ver Figura 7.18):

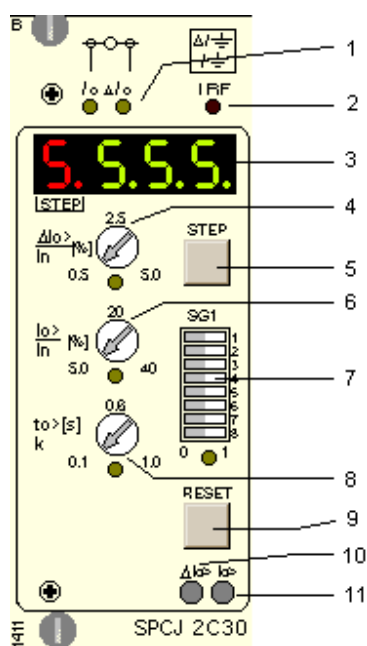


Fig. 7.18 Módulo de control del relevador *SPAJ 115 C*.⁹³

1. *LED's indicadores del tipo de variable que mide el relé.* Cuando se enciende el *LED* que señala *Io*, el relevador detecta la corriente de falla a tierra; por su parte, el *LED* con la leyenda ΔIo corresponde a la medición de corriente diferencial.

2. *LED Indicador de mal funcionamiento.* Cuando el sistema de auto-supervisión con que cuenta el aparato detecta algún mal funcionamiento, el *LED* marcado con las siglas *IRF* se enciende.

⁹³ ABB. *SPAJ 115 C, Version 1.1.*

3. *Pantalla numérica.* En esta pantalla se visualizan datos como parámetros de ajuste, valores medidos y guardados en memoria, estado del relevador y errores de operación.

4. *Selector de la corriente diferencial $\Delta I_o > / I_n$ [%].* Perilla de ajuste de corriente (en por ciento) de la protección diferencial con respecto a la corriente nominal del TC seleccionada en el relevador. El intervalo de ajuste va de 0.5 a 5 % de la corriente nominal.

5. *Botón de STEP.* Es la tecla empleada para acceder al menú de los registros, explorar su contenido y desplegar los parámetros programados en el relé; obviamente, la información se visualiza en la pantalla numérica. También se utiliza para la transferencia de datos durante el proceso de comunicación con otros relevadores y computadoras.

6. *Selector de la corriente de falla a tierra I_o / I_n [%].* Perilla para seleccionar la corriente (en por ciento) de la protección de sobrecorriente a tierra con respecto a la corriente nominal del TC escogida en el relé. El intervalo de ajuste va del 5 al 40 % de la corriente nominal.

7. *Micro-interruptores de ajuste.* Al igual que los micro-interruptores SGR del módulo principal, los *Dip-switchs* SG1 sirven para programar las diferentes funciones del relevador. También tienen dos posiciones, 1 ó 0, las cuales determinan las tareas que se van a desempeñar como se detalla a continuación:

SG1/1. No se usa, de preferencia debe estar en posición 0.

SG1/2. No se usa, de preferencia debe estar en posición 0.

SG1/3. Selecciona la condición final de la señal de disparo de la protección diferencial (TS1). Cuando *SG1/3* está en posición 0 y el relevador detecta sobrecorriente diferencial, la señal que activa a la protección regresa a su posición normal una vez que la corriente medida sea menor que el valor ajustado; en cambio, si *SG1/3* está en posición 1, la

señal de disparo permanece en "nivel alto" a pesar de que la corriente detectada disminuya con respecto al valor seleccionado. La señal de operación regresa a su condición inicial presionando simultáneamente los botones *STEP* y *RESET*.

SG1/4. Selecciona la condición final de la señal de disparo de la protección de sobrecorriente a tierra (TS2). Cuando *SG1/4* se encuentra en posición 0 y el relevador detecta sobrecorriente a tierra, la señal que activa a la protección regresa a su posición normal una vez que la corriente medida queda debajo del valor ajustado; por el contrario, si *SG1/4* está en posición 1, la señal de operación continúa en "nivel alto" sin importar que la corriente detectada sea inferior que el valor programado. La señal de operación regresa a su condición inicial presionando simultáneamente los botones *STEP* y *RESET*.

SG1/5. No se usa, de preferencia debe estar en posición 0.

SG1/6, *SG1/7* y *SG1/8*. Selectores del tiempo de operación. Mediante el manejo de estos micro-interruptores, junto con el selector de ajuste de tiempo, se pueden configurar las características de disparo con tiempo definido y tiempo inverso. Las posiciones correspondientes a los diferentes intervalos de operación se muestran en la Tabla 7.2.

SG1/6	SG1/7	SG1/8	Característica de operación	Tiempo de operación (t₀>) o tipo de curva tiempo-corriente
0	0	0	Tiempo definido	0.10 - 1.0 s
0	0	1	Tiempo definido	1.0 - 10.0 s
0	1	0	Tiempo definido	1.0 - 10.0 s
0	1	1	Tiempo definido	10.0 - 100 s
1	0	0	Tiempo inverso	Extremadamente inverso
1	0	1	Tiempo inverso	Inverso
1	1	0	Tiempo inverso	Muy inverso
1	1	1	Tiempo inverso	Instantáneo

Tabla 7.2 Programación de los tiempos de operación del *SPAJ 115 C*.

8. *Selector de ajuste del tiempo de operación $t_{o>} [s]$.* Como se mencionó en el punto anterior, el tiempo de disparo del relé se ajusta con esta perilla y con los micro-interruptores *SG1/6*, *SG1/7* y *SG1/8*. El equipo puede programarse para operar con tiempo definido y tiempo inverso.

9. *Botón de RESET.* Se utiliza para regresar a su estado inicial los indicadores del panel frontal. El botón se emplea principalmente en el modo de disparo forzado:

- Para seleccionar alguna función (disparo de las protecciones de falla a tierra o diferencial) *RESET* se presiona durante un segundo, hasta ver destellar el *LED* indicador de la respectiva perilla de ajuste.
- El disparo manual de la función escogida se realiza al oprimir simultáneamente los botones *STEP* y *RESET*. (Figura 7.19).

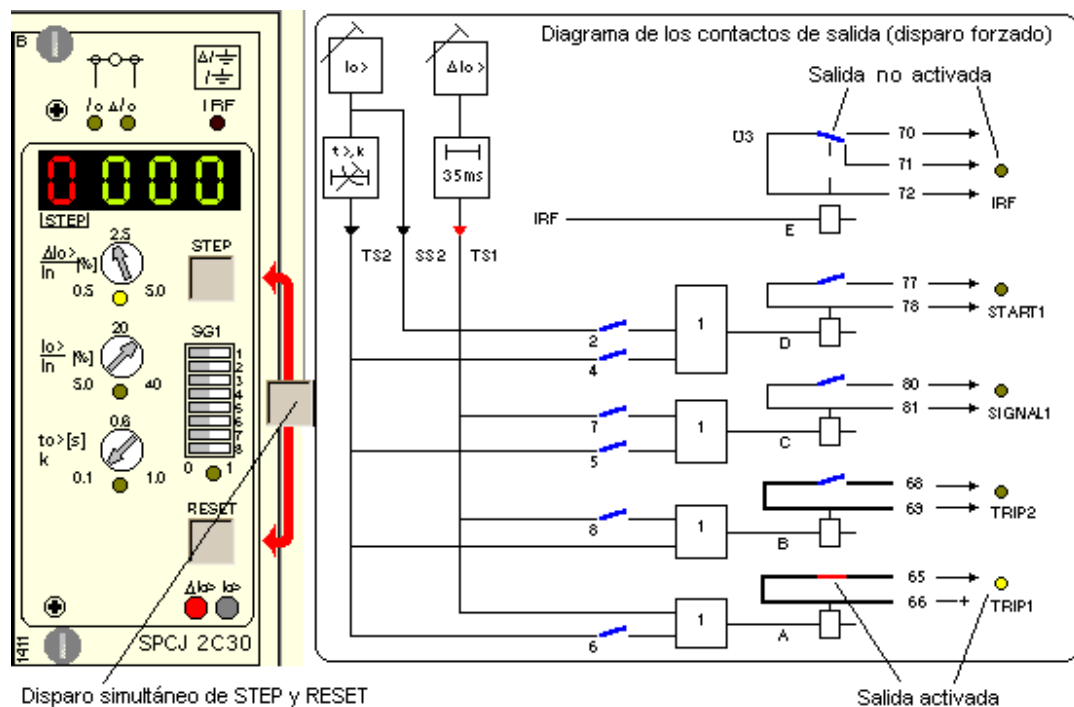


Fig. 7.19 Modo de disparo forzado.⁹⁴

⁹⁴ ABB. SPAJ 115 C, Version 1.1.

Nota: Si se desea salir del modo de disparo forzado, entonces *RESET* se presiona durante 7 segundos.

10. *LED indicador de operación de la protección diferencial.* *LED* indicador de la protección diferencial (marcado con $\Delta I_{o>}$): amarillo cuando inicia la medición de corriente, se vuelve rojo al momento del disparo.

11. *LED indicador de operación de la protección de falla a tierra.* *LED* indicador de la protección de sobrecorriente a tierra (marcado con $I_{o>}$): amarillo cuando comienza la medición de corriente, cambia a rojo al ocurrir el disparo.

7.2.7.4 Ejemplo de una simulación

Finalmente, para ilustrar con mayor claridad los ajustes que se hacen para efectuar una simulación e interpretar la información proporcionada por el relevador, se presentan las siguientes figuras correspondientes al disparo de la protección diferencial.

Para realizar la simulación, primero se enciende el relé, oprimiendo el botón *POWER ON* de la Barra de herramientas.

Posteriormente, se selecciona un valor de corriente diferencial manipulando el potenciómetro respectivo; recuérdese que el valor está dado en por ciento y es con respecto a la corriente nominal del TC ajustada en el relevador. (Figura 7.20).



Fig. 7.20 Ajuste del valor de la corriente diferencial.⁹⁵

⁹⁵ ABB. *SPAJ 115 C, Version 1.1.*

Para suministrar la corriente que activará al equipo entramos a la opción de *Simulate Current Injection* y escogemos *Differential Current* (Corriente diferencial) así como la corriente nominal del secundario del TC: 1 ó 5 A. Ver Fig. 7.21.

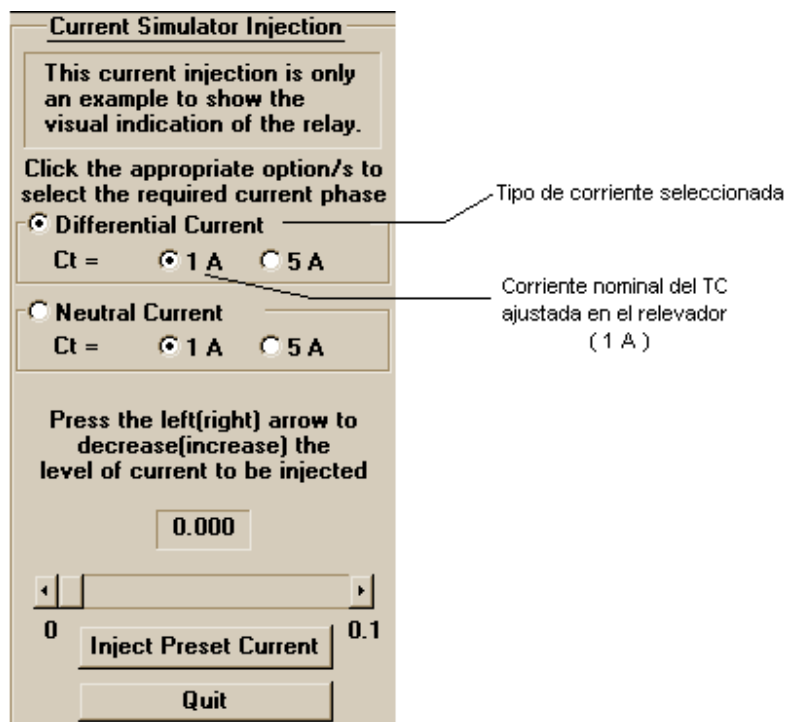


Fig. 7.21 Ventana de inyección y ajuste de corriente.⁹⁶

Con las flechas se incrementa o disminuye la magnitud de la corriente; al presionar el botón de *Inject Preset Current* se inicia el suministro de corriente; si el valor es menor que el de ajuste (2.45 % ó 0.0245) no actuará la protección y esto será señalado por el programa, pero si llega a un valor mayor que el de ajuste entonces se encenderán los *LED's* de ΔI_o y $\Delta I_o >$ para indicarnos que la protección ha sido disparada.

⁹⁶ ABB. SPAJ 115 C, Version 1.1.

Mediante el botón de *STEP* podemos desplazarnos entre los registros para ver la información almacenada; por ejemplo, la magnitud de la corriente diferencial se guarda en el registro número 1. (Figura 7.22).

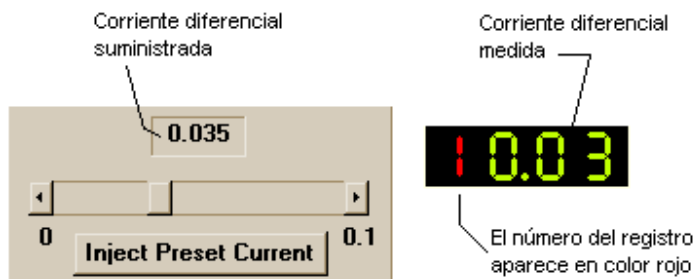


Fig. 7.22 Corriente diferencial medida.⁹⁷

Se hicieron, a manera de prueba, un total de diez disparos, mismos que se pueden comprobar visualizando el contenido del registro 3, el cual indica el número de veces que ha sido activada la protección diferencial. (Fig. 7.23).



Fig. 7.23 Disparos efectuados por la protección.⁹⁸

⁹⁷ ABB. SPAJ 115 C, Version 1.1.

⁹⁸ Idem.

1. Mediante la presente tesis hemos implementado un “Simulador de interruptor de potencia” haciendo uso de un dispositivo electrónico de control (PLC) en vez de utilizar los típicos relevadores auxiliares. Gracias a ello no sólo hemos aprendido a programar el PLC sino que hemos comprobado las ventajas que ofrecen estos equipos en los sistemas de control, por ejemplo, en nuestro caso, al emplear un menor número de dispositivos se disminuye el cableado y el tamaño del tablero.

2. Aunque solamente se utilizó un relevador de protección (el de sobrecorriente 50D) en el sistema, éste ha sido diseñado con entradas de conexión adicionales para aceptar otros relevadores que se deseen agregar. Con ello, el sistema podría quedar más completo y las prácticas donde se muestre el funcionamiento de un interruptor de potencia junto con distintos equipos de protección serían más ilustrativas para los alumnos.

3. No obstante que el PLC se empleó principalmente para sustituir a los relevadores auxiliares del sistema original, finalmente se tuvo que utilizar uno de ellos para poder habilitar la conexión del controlador con el relé de recierre. Como ya se explicó en el Capítulo 6, el relevador auxiliar protege y aísla al PLC, además de que sirve para imitar el funcionamiento de los contactos 52/a y 52/b del interruptor de potencia activando únicamente una salida.

4. En el Capítulo 6 también se mencionó que al simular una falla permanente, la rapidez del controlador provocó un mal funcionamiento en el relevador de recierre lo cual fue solucionado al retrasar la ejecución de una sección del programa mediante un temporizador.

Lo anterior no pudo haber sido resuelto de otra manera por las siguientes razones:

- El dispositivo de recierre tardaba en registrar la operación de los contactos auxiliares 52/a y 52/b, que son activados por el PLC.

- La función antibombeo implementada en el sistema no respondía debido a que el relevador de recierre continuaba haciendo recierres, abriendo y cerrando el interruptor, pese a que ya se habían efectuado todos los intentos de cierre programados.

Lo que sucedió fue lo siguiente: como los contactos del relé abrían y cerraban repetidamente ordenando, en su momento, el cierre del interruptor (sin importar que este último se encontrara disparado por las protecciones), esto producía un efecto similar al de abrir y cerrar la manija continuamente. Por tal motivo la función antibombeo no se activaba pues ésta sólo lo hace cuando los contactos que ordenan el cierre del interruptor se mantienen cerrados.

5. Con respecto al *software* de simulación de relevadores analizado podemos señalar dos limitaciones: no se puede simular ningún tipo de conexión externa ni disparar los contactos de salida con un tiempo determinado. Tales inconvenientes nos impiden conocer y evaluar por completo el desempeño del relé con algún circuito de prueba.

Finalmente, aunque podemos afirmar que el programa básicamente fue diseñado para que el usuario se familiarice con el manejo de los controles e indicadores del relevador simulado (por si se llega a adquirir algún día), sería conveniente emplear el simulador como material de apoyo para la materia de "Protección de Sistemas Eléctricos" (y su respectivo laboratorio) con el fin de que tanto alumnos como profesores vayan conociendo algunas de las tecnologías que hay actualmente y que se están empleando en el área.

Instrucciones más comunes de algunos fabricantes de PLC's¹

Instrucción	Allen-Bradley	GE-Fanuc	Cutler-Hammer	Omeron
<i>Salida</i>	OTE	NO COIL	OUT	OUT
<i>Contacto Abierto</i>	XIO	NO CON	NO	LD
<i>Contacto Cerrado</i>	XIC	NC CON	NC	LD NOT
<i>Fin de programa</i>	END	–	END	END
<i>Temporizador</i>	TON, TOF	TMR	TIM	TIM
<i>Contador</i> ²	CTU, CTD	UPCTR, DNCTR	UC, DC	CNT
<i>Suma</i>	ADD	ADD	ADD	ADD
<i>Resta</i>	SUB	SUB	SUB	SUB
<i>Multipliación</i>	MUL	MUL	MUL	–
<i>División</i>	DIV	DIV	DIV	–
<i>Raíz cuadrada</i>	SQR	SQRT	–	–

¹ Webb, J. & Reis R. *Programmable Logic Controllers*, p. 421-422.

² Algunos modelos emplean conteo hacia adelante (*count up*) y conteo hacia atrás (*count down*).

Instrucción	Allen-Bradley	GE-Fanuc	Cutler-Hammer	Omeron
<i>Salto</i>	JSR	JUMP	JS-JR	–
<i>Control Maestro</i>	MCR	MCRN-END	MCS-MCR	ILC
<i>Registro de corrimiento</i> ³	BSR, BSL	SHR, SHL	SHR, SHL	SFT
<i>Igual</i>	EQV	EQ	–	CMP
<i>Diferente</i>	NEQ	NE	–	CMP
<i>Menor que</i>	LES	LT	–	–
<i>Menor o igual que</i>	LEQ	LE	–	–
<i>Mayor que</i>	GTR	GT	–	–
<i>Mayor o igual que</i>	GEQ	GE	–	–

³ El corrimiento de los datos puede ser a la derecha (*bit shift right*) o a la izquierda (*bit shift left*).

Bibliografía

Bayliss, C. *Transmission and distribution electrical engineering*, 2nd ed. Oxford, England. Newnes; 1999.

Berger, H. *Automating with SIMATIC*. Munich. Siemens; 2000.

Elmore, W. *Protective relaying theory and applications*. New York. M. Dekker; 1994.

Fink D. y Beaty W. *Manual de ingeniería eléctrica*, 13^a ed. México. McGraw-Hill; 2000.

Garzon, R. *High voltage circuit breakers*. New Jersey. M. Dekker; 1997.

Hintze, A. *Apuntes de protección de sistemas eléctricos*. (Material de apoyo que emplea el Ing. Hintze para impartir su clase en la Facultad de Ingeniería de la UNAM).

Mason, R. *El arte y la ciencia de la protección con relevadores*. México. CECSA; 1971.

Raúll Martín, J. *Diseño de subestaciones eléctricas*. México. UNAM - Facultad de Ingeniería; 2000.

Webb J. & Greshock K. *Industrial control electronics*, 2nd ed. New York. Merrill; 1993.

Webb J. & Reis R. *Programmable Logic Controllers*, 4th ed. New Jersey. Prentice-Hall; 1999.

Weedy B. & Cory B. *Electric power systems*, 4th ed. West Sussex. John Wiley and Sons; 1998.

CFE. *Procedimiento para coordinación de protecciones de sobrecorriente en sistemas de distribución*. México. Departamento editorial de la Comisión Federal de Electricidad; 1983.

IEEE. *The red book (Recommended practice for electric power distribution for industrial plants)*. New York. The Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1994.

Catálogos y manuales

ABB. *50D Overcurrent relay instructions manual*.

ABB. *79M Reclosing relay instructions manual*.

Cutler-Hammer. *D100 Computer programming user's manual*.

General Electric. *Power management catalog 1998*.

Siemens. *Catalog of relays, 2002*.

Programas de cómputo

ABB. *Product simulators, Version 2.0*.

ABB. *SPAJ 115 C, Version 1.1*.

Páginas en Internet

www.abb.com

www.schneider-electric.com.mx

www.siemens.com