

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Pruebas y requisitos de un restaurador
trifásico para protección de líneas de
distribución aéreas, con medio de extinción de
arco en vacío, con enfoque al cumplimiento
de las pruebas de rutina en fábrica.

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE: INGENIERO MECÁNICO Y ELÉCTRICO

PRESENTA:
Carlos Avila Cortes

ASESOR: Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez

Puebla, Puebla

Febrero 2014

Contenido

1.	EL RESTAURADOR ELÉCTRICO	3
1.1.	Clasificación de restauradores	5
1.2.	Selección del restaurador	6
2.	COMPONENTES DEL RESTAURADOR TRIFÁSICO CON MEDIO DE EXTINCIÓN EN VACÍO	8
2.1.	Unidad Interruptora.....	8
2.1.1.	Polos de corte	9
2.1.2.	Mecanismo de accionamiento.....	11
2.2.	Unidad de control (DEI).....	12
2.2.1.	Fuente de alimentación auxiliar	12
2.2.2.	Relevador de protección	13
2.2.3.	Unidad de comunicación remota	23
3.	INTERPRETACIÓN DE LA NORMATIVIDAD APLICABLE A RESTAURADORES.....	25
3.1.	Requisitos generales del restaurador con medio de extinción por cámaras en vacío de acuerdo a IEC	26
3.1.1.	Método para trazar la envolvente de la prospectiva tensión transitoria de restablecimiento de un circuito y determinar los parámetros representativos	43
3.1.2.	Relaciones X/R	44
3.1.3.	Pruebas de rutina	46
3.2.	Requisitos generales del restaurador con medio de extinción en vacío de acuerdo a normatividad ANCE	48
3.3.	Requisitos generales del restaurador con medio de extinción en vacío de acuerdo a normatividad de la CFE	49
3.3.1.	Medio de extinción y medio aislante	50
3.3.2.	Control del restaurador.....	50
3.3.3.	Fuente de alimentación.....	51
4.	PRUEBAS DE RUTINA.....	52
4.1.	Pruebas al gabinete de control	52
4.2.	Pruebas a la unidad interruptiva	59
4.3.	Dossier (compendio) de calidad	66
	Bibliografía	67

1. EL RESTAURADOR ELÉCTRICO

Los restauradores eléctricos son equipos auto-controlados para la interrupción y restauración automática de un circuito eléctrico de corriente alterna[1]. Dentro de los sistemas de potencia eléctrica, su utilización es más común en los circuitos de distribución, como medio de protección contra sobre corriente[2].

El 80% de las fallas en los circuitos de distribución eléctrica son temporales, pudiendo ser causadas por contacto de las líneas eléctricas con las ramas de los árboles, interferencia de fauna, acercamiento de las líneas debido a la fuerza del viento o por descargas atmosféricas. La secuencia automática de apertura y cierre de los restauradores o secuencia de operación como se muestra en la figura 1.1, corrige esta falla temporal y restaura el servicio con tan solo algunas interrupciones de muy corta duración[1].

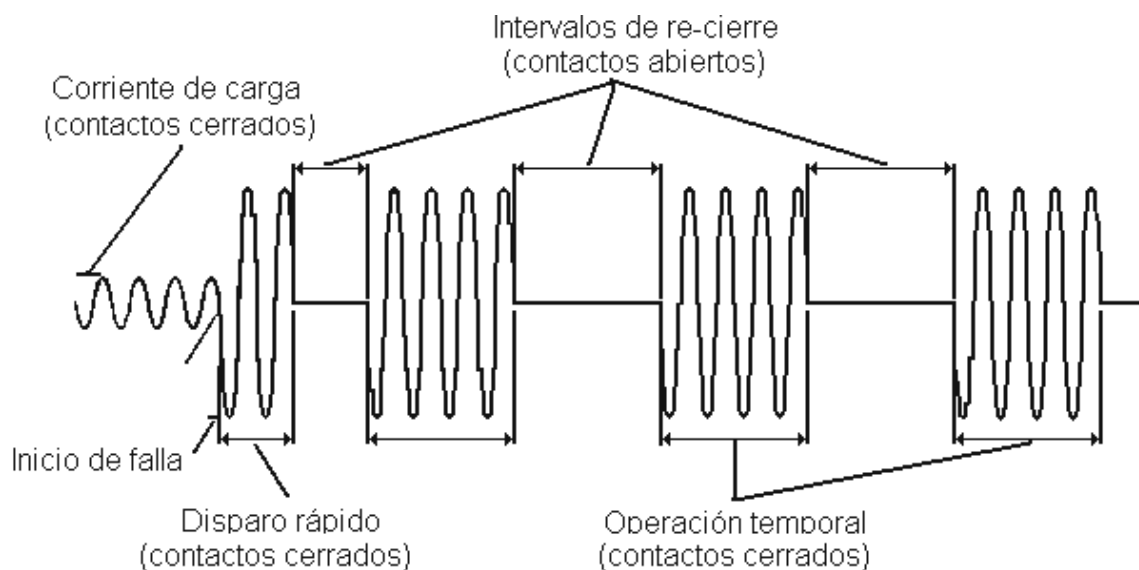


Fig. 1.1 Secuencia típica de operación de un restaurador [1].

Las secuencias de operación de los restauradores se constituyen de la siguiente manera acorde a su configuración:

- Dos operaciones instantáneas de disparo y cierre continuadas por dos operaciones de disparo y cierre retardado antes de la apertura definitiva.

- Una operación de disparo y cierre instantáneo y tres operaciones con retardo.
- Tres operaciones de disparo y cierre instantáneo y uno con retardo.
- Cuatro operaciones de disparo y cierre instantáneos.

Si el restaurador detecta en cualquiera de estas operaciones que la falla ha sido transitoria, procederá a restablecer el servicio, quedando listo para las siguientes operaciones de apertura y cierre. En caso de que se detecte que la falla no es transitoria, el restaurador dejará el circuito abierto en su disparo definitivo y bloqueando el equipo para operación de manera remota, hasta que la falla sea corregida por un operario y el restaurador sea operado (cerrado) de manera manual.

Las operaciones del restaurador son en base al tiempo que transcurre en segundos y a la corriente que circula en amperes. En la figura 1.2 se muestran las características de las curvas de operación rápida y con retardo de los restauradores.

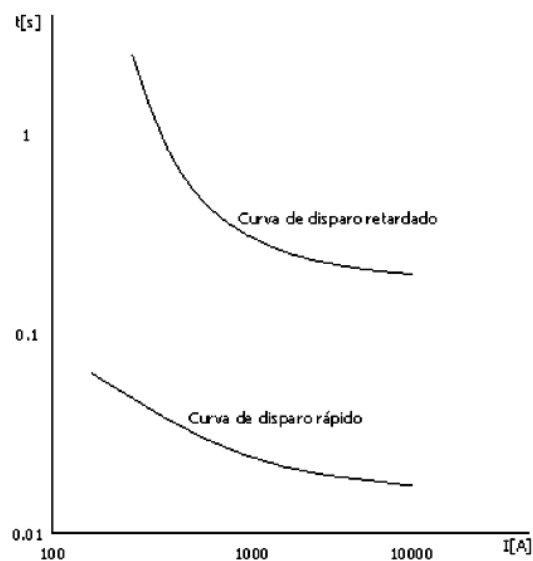


Fig. 1.2 Curvas características t-I de un restaurador [2].

El objetivo del restaurador es prevenir que las fallas transitorias se conviertan en permanentes, reanudar el servicio en el menor tiempo posible, proteger los equipos de protección adicionales, así como los equipos de los usuarios[2].

1.1. Clasificación de restauradores

Los restauradores de circuitos eléctricos se pueden clasificar de la siguiente manera [2]:

- Monofásicos y Trifásicos.
- Mecanismos interruptores con operación hidráulica o electrónica.
- Por medios de extinción del arco eléctrico (aceite, vacío, SF₆).

Los restauradores monofásicos se utilizan cuando la carga es predominantemente en una sola fase. Cuando ocurre una falla en una fase, se espera que el restaurador monofásico abra el circuito de esa única fase, dejando las otras fases operando. Los restauradores trifásicos se utilizan solo cuando es necesario abrir el circuito de las tres fases para prevenir desbalances de carga en el sistema.

Los restauradores con mecanismos de operación hidráulica tienen una bobina de desconexión en serie con la línea. Cuando la corriente excede el valor máximo permitido, la bobina genera un campo magnético que atrae un pistón, cuya función es abrir los contactos principales del restaurador, interrumpiendo el circuito eléctrico.

Los restauradores con operación electrónica, interrumpen el circuito eléctrico recibiendo una señal de un transformador de corriente. Cuando la corriente excede el valor predeterminado, se inicia un disparo retardado que resulta en una señal de accionamiento transmitida al control del restaurador. El control del circuito determina las subsecuentes operaciones de apertura y cierre del mecanismo de interrupción dependiendo de la configuración designada. Este tipo de restauradores, utiliza aceite como medio de extinción de arco y también como medio aislante. El mismo aceite se puede utilizar en el mecanismo de control.

El aceite, el vacío y el hexafluoruro de azufre (SF_6), se utilizan como medios aislantes (extinción del arco eléctrico), cuando el mecanismo interruptor del restaurador, abre los contactos para cortar el suministro de las líneas eléctricas. Los restauradores cuyo medio de extinción es el vacío o el hexafluoruro de azufre, tiene la ventaja de requerir menor mantenimiento[3].

1.2. Selección del restaurador

Las características que se deben tomar en cuenta para una buena selección de los restauradores eléctricos son[2]:

- La tensión del sistema.
- La corriente de carga del circuito.
- La máxima y mínima corriente de falla.
- Coordinación con otros dispositivos de protección como pueden ser fusibles, seccionadores, relevadores, y otros restauradores.
- Sensibilidad de falla a tierra (cuando aplique).

La tensión de operación del restaurador debe ser igual o mayor que la tensión nominal del sistema.

La capacidad nominal de conducción del restaurador debe ser igual o mayor que la corriente de carga del circuito. En restauradores con control electrónico, la corriente mínima de disparo se puede seleccionar independientemente de la capacidad nominal de conducción, aunque por lo regular no excede el doble de este valor.

La capacidad de interrupción del restaurador debe ser igual o mayor que la máxima corriente de corto circuito en el punto donde se instala el restaurador.

El restaurador debe seleccionarse de tal manera que se coordine con otros dispositivos de protección, como lo son los fusibles, detectando primeramente las corrientes de falla para evitar su operación y que las fallas transitorias se conviertan en permanentes.

En sistemas trifásicos con neutro aislado, una falla a tierra produce una corriente del posible orden de 1000 A. Los sistemas sensibles podrán detectar este tipo de fallas y emitir una alarma. En sistemas trifásicos con neutro a tierra una falla de fase a tierra produce corrientes de corto circuito muy altas y de fácil detección[2].

2. COMPONENTES DEL RESTAURADOR TRIFÁSICO CON MEDIO DE EXTINCIÓN EN VACÍO

Fundamentalmente, un restaurador, cuyo medio de extinción del arco eléctrico (aislamiento) es el vacío, para protección de líneas de distribución aéreas, está compuesto por una unidad interruptiva, que es la que realiza la desconexión del circuito de distribución y una unidad de control que realiza la función de envío de señales de disparo y re-cierre a la unidad de interrupción[2].

Algunos fabricantes de restauradores ofertan únicamente la unidad de interrupción, mientras que otros únicamente la unidad de control, también hay fabricantes que ofertan tanto unidad de control como unidad de interrupción.



Fig. 2.1 a) Unidad de interrupción "Elastimold" de Thomas & Betts.



Fig. 2.1 b) Unidad de control "UCR" de General Electric.

2.1. Unidad Interruptiva

La unidad de interrupción se compone básicamente por los polos de corte que se conectan a las líneas de distribución y el mecanismo de accionamiento que abre y cierra los polos de corte. Dependiendo del fabricante, la unidad de interrupción puede tener un mecanismo de acción por cada polo como es el caso de restauradores denominados triple-monofásicos y que pueden ser configurados para abrir una sola línea a la vez o las tres cuando se detecta la falla en cualquier fase, o un solo mecanismo para la apertura y cierre de las tres fases[4].

2.1.1. Polos de corte

El polo de corte de las unidades interruptoras de los restauradores es esencial, ya que este se conecta a las líneas de distribución, permitiendo el paso de la corriente. En caso de falla, se abren los contactos internos del polo para desconectar el circuito. El medio de interrupción del polo de corte, es una botella de vacío con contactos normalmente cerrados, estos contactos son abiertos por el mecanismo de accionamiento de la unidad interruptora, aislando la corriente eléctrica.

Los polos se diseñan para soportar las posibles sobretensiones y las condiciones ambientales[5]. El material aislante de los polos depende de los fabricantes. ABB, MAYSTEEL, ARTECHE, TAVRIDA, son fabricantes que utilizan una botella interruptor de vacío encapsulada en resina epoxi cicloalifática que además de ser buen aislante, tiene excelentes propiedades para resistir los rayos UV y es buen repelente de agua[6]. En la figura 2.2 se muestran algunos componentes básicos de los polos de corte. Los componentes más relevantes en los polos son: la botella interruptor en vacío (Vacuum interrupter), los sensores de corriente y tensión (current/voltage sensors), y la varilla de accionamiento (drive assembly).

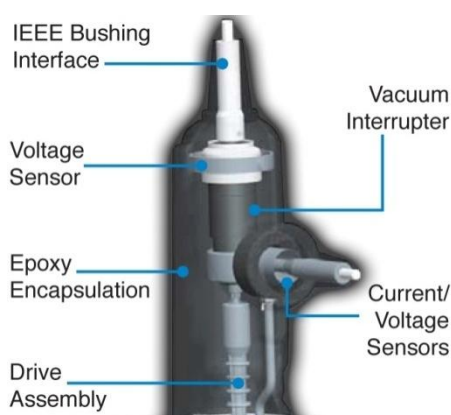


Fig. 2.2 Polo de corte del restaurador Viper-S de G&W.

La botella interruptor en vacío tiene 2 contactos, que para las unidades de interrupción de restauradores se utilizan normalmente abiertos. La alta capacidad dieléctrica del vacío permite distancias muy cortas entre contactos, que por lo

general son de 6 a 25mm. Este tipo de interruptores tienen aplicación en media tensión, hasta 38kV y es la razón por la que se pueden encontrar restauradores para operar a tensiones nominales desde 15kV, 27kV y hasta 38kV. Son libres de mantenimiento y tienen larga vida de operación, que se puede considerar de hasta 30,000 interrupciones a corriente nominal y 100 operaciones de interrupción de corrientes de corto circuito.

El interruptor de vacío tiene un contacto fijo y otro móvil. El arco eléctrico, se presenta por vaporización del material de los contactos debido a las altas temperaturas que se presentan en los contactos y a la presencia del alto vacío en las cámaras, es mantenido hasta que la corriente alcanza nuevamente el nivel cero (cruce por cero de la señal), en ese momento se extingue finalmente el arco, la mayor parte del vapor se condensa en los contactos, por lo que no existe gran pérdida de material y el interruptor de vacío recupera su capacidad de aislamiento. Los contactos de la botella de interrupción son ranurados lo cual hace que el arco eléctrico gire alrededor de los contactos y no se concentre en un solo punto, por otro lado el campo magnético lo arroja hacia la parte externa de los contactos[7]. En la figura 2.3a, se muestra un interruptor de vacío de la marca SIEMENS, en la cual se pueden apreciar las ranuras de los contactos y en figura 2.3 b, se muestra el desplazamiento del arco eléctrico sobre los contactos y área de calentamiento.



Fig. 2.3 a) Interruptor de vacío SIEMENS.

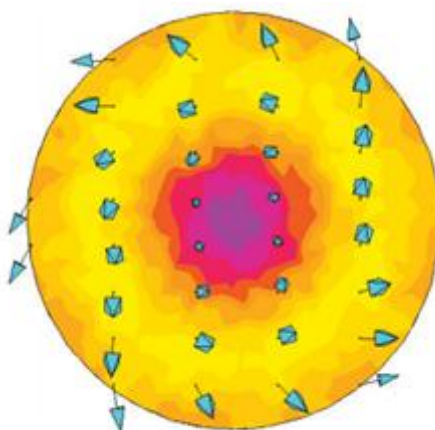


Fig. 2.3 b) Modelado del arco eléctrico en contactos ranurados de interruptor en vacío.

Para los sensores de corriente en los polos se utilizan bobinas toroidales, la corriente pasa a través del centro del toroide. La tensión de salida del sensor es proporcional a la derivada de la corriente. Como la bobina no tiene núcleo de hierro no ocurre el fenómeno de saturación. Esto resulta en un gran rango dinámico y una alta linealidad.

Los sensores de tensión son divisores resistivos de voltaje, entregan una señal proporcional a la tensión primaria, las principales ventajas de esta medición son las buenas características inherentes a las condiciones de gran rango dinámico y alta linealidad[8].

La varilla de accionamiento es fundamentalmente un eje aislador, cuya única función es transmitir la fuerza mecánica generada por el mecanismo de operación, para abrir o cerrar los contactos de la botella de vacío.

2.1.2. Mecanismo de accionamiento

El mecanismo de accionamiento para la apertura y cierre del circuito eléctrico es comúnmente un actuador magnético o solenoide. El actuador consiste en un cuerpo de acero, magnetos permanentes, una bobina y un núcleo de hierro (la parte móvil). Los magnetos permanentes se pueden adherir al núcleo de hierro para formar un embolo. Cuando se excita la bobina, esta genera un campo magnético que atrae o repele el campo del embolo, generando una fuerza de desplazamiento la cual abre o cierra los contactos. Para restauradores triple-monofásicos, se utilizan generalmente tres actuadores para la desconexión de cada polo. Para restauradores trifásicos simples, se puede utilizar un solo actuador con mecanismos de transmisión que realicen la apertura o cierre de las tres fases de manera simultánea.

La operación del embolo del actuador por medio de la generación del campo electromagnético es en un solo sentido, por lo que se requiere de un mecanismo auxiliar para regresar al embolo a su posición original, comúnmente se utilizan resortes [9].

En la figura 2.4 se aprecia un actuador magnético con su mecanismo de transmisión y su mecanismo para el retorno del embolo a su posición original.

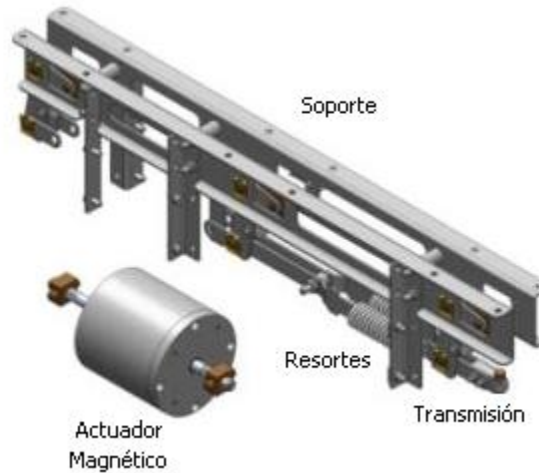


Fig. 2.4 Actuador Magnético con mecanismo de transmisión.

2.2. Unidad de control (DEI)

La unidad de control del restaurador es muy importante, ya que esta contiene el medio de comunicación con la central de control, realiza los registros de las fallas detectadas y guarda las configuraciones de protección. Debido a su importancia, esta unidad debe permanecer realizando sus funciones aún en ausencia de suministro de energía durante un periodo de tiempo razonable, por lo cual, esta unidad de control está constituida por una fuente de alimentación auxiliar, que pueden ser baterías y un cargador de baterías, un relevador de protección y una unidad de comunicación remota. Según la norma de CFE VH000-11 2007, este dispositivo también recibe el nombre de Dispositivo Electrónico Inteligente (DEI).

2.2.1. Fuente de alimentación auxiliar

Las baterías de ácido plomo siguen siendo el medio más eficiente para proveer el control del restaurador con una fuente de energía de corriente directa para operación del relevador de protección. La conexión más lógica para el

funcionamiento del control es que la corriente alterna se conecte al cargador de baterías, el cargador de baterías convierta la corriente alterna a corriente directa entregando una tensión menor para la alimentación del relevador de protección y para cargar las baterías. En ausencia de suministro de energía, las baterías deben proveer la tensión para el funcionamiento del relevador.

Las baterías de ácido plomo se suelen suministrar en tensiones de 6V, 12V o algún otro múltiplo de 2, ya que la tensión que suministra cada celda es de 2V[10].

El cargador de baterías puede tener la función, además, de suplir la tensión de los aparatos conectados a este y de cargar las baterías, de realizar pruebas a la batería para verificar su correcto funcionamiento y envío de señales al relevador como lo es la falta de potencial de corriente alterna, pero no siempre se tienen cargadores de baterías inteligentes ya que las funciones antes mencionadas, también las puede realizar el relevador de protección.

2.2.2. Relevador de protección

El relevador de protección del restaurador tiene el papel del cerebro y dentro del control, es la unidad que se encarga de todas las decisiones, ya que contiene las configuraciones para operación de su unidad interruptiva, almacena registros de falla y puede recibir comandos desde una unidad supervisora de control y de adquisición de datos también conocida como SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) de acuerdo a la norma CFE VH000-11.

El relevador de protección que se encuentra en los restauradores de última tecnología es del tipo digital (también conocido como relevador micro-procesado), con múltiples funciones para protección, control y medición. Las funciones del relevador digital emulan las funciones de relevadores electromecánicos y estáticos de distintos tipos como lo son los relevadores de sobrecorriente instantáneo y relevadores de sobrecorriente de tiempo.

Las funciones de protección, control y medición más destacadas de los fabricantes ABB, SIEMENS, BECKWITH ELECTRIC y ARTECHE, se mencionan a continuación así como una breve descripción de cada una de sus funciones.

- **Funciones de Protección:**

Protección de sobrecorriente instantánea y temporizada (con retardo) de fase o neutro.

Es la protección ante una sobrecorriente en el circuito eléctrico, que generalmente es causada por un cortocircuito. El relevador procesa el valor de corriente medido y manda una señal de apertura a la unidad interruptora cuando este valor alcanza un valor definido por el usuario. La señal de apertura puede ser instantánea para el caso en que el relevador detecte una falla dentro de su zona de protección o puede ser con retardo para el caso en que se requiere de una coordinación entre protecciones. El objetivo, es que la señal de retardo, permita a protecciones de otra sección “aguas abajo” operar[11]. El mismo tipo de protección instantánea y temporizada aplica tanto en sistemas trifásicos donde el neutro no se utiliza, como en sistemas con neutro a tierra.

Protección direccional de las funciones de sobrecorriente de fases y neutro.

La corriente, es una magnitud cuya dirección solo puede ser determinada en relación a otra y por este motivo, solo se puede afirmar si las corrientes tienen o no la misma dirección. Se puede configurar la dirección de la corriente como magnitud de medida para la coordinación entre protecciones, de esta manera, la protección puede detectar una falla y permitir que solo las protecciones en la sección con falla envíen señal de interrupción de circuito en base a la dirección de la corriente.

Protección de sobrecorriente de secuencia negativa.

La sobrecorriente de secuencia negativa se considera, cuando las componentes simétricas de la corriente de corto circuito (sobrecorriente) generan un giro en sentido inverso a la dirección de los componentes de corriente del sistema de potencia.

Protección de fase abierta.

La protección de fase abierta consiste en la desconexión del circuito cuando se detecta la ausencia de una fase para evitar el desbalance en el sistema. Esta condición, como su nombre lo indica, se puede presentar debido a la falta de continuidad en la línea eléctrica.

Protección de baja tensión de fases.

Cuando la tensión en el sistema se encuentra en valores por debajo del nivel nominal, la carga conectada a la red no disminuirá su potencia, por lo que el déficit de tensión se compensa con un aumento en la corriente. La protección (relevador) debe operar para proteger contra esta sobrecarga en la línea.

Protección de sobretensión de fases.

Es justo el caso contrario de la baja tensión de fases, la sobretensión puede generar perforaciones en los aislamientos de las líneas de distribución y generación (cebado) de arcos eléctricos.

Protección del desbalance de tensión.

El desbalance de tensión en el sistema puede generar calentamiento adicional de los equipos eléctricos limitándose la capacidad de carga, reducción de los sistemas de distribución en el transporte de potencia, propagación del desbalance a otros nodos de la red y pérdidas adicionales de potencia y energía. El desbalance suele presentarse debido principalmente a las cargas monofásicas sobre el sistema trifásico.

Protección de baja frecuencia y alta frecuencia.

La variación de la potencia activa (carga) afecta directamente la frecuencia del sistema, que en México debe ser de 60Hz. Si esta frecuencia se encuentra por fuera del valor de operación (tolerancia del $\pm 0.2\%$), puede tener efectos negativos en los aparatos eléctricos conectados, afectando principalmente a las maquinas rotativas.

Protección de falla de interruptor.

El principio de detección se basa en la medición de la corriente que circula por el interruptor, la cual debe ser cero al haberse efectuado la apertura exitosa del circuito en los tres polos, cuando esa corriente no es cero, quiere decir que falló en operar la protección de sobrecorriente instantánea y la protección temporizada, entonces se introduce la función de falla del interruptor, la cual hace que se abran los interruptores (restauradores) adyacentes para aislar un tramo del circuito.

Supervisión del interruptor.

La función de supervisión del interruptor mide la tensión del sistema de accionamiento interruptor. Cuando el nivel de tensión no es suficiente para operar la unidad interruptiva, el relevador envía una señal a las protecciones cercanas para operar y proteger el sistema de distribución.

- **Funciones de control:**

Control de intentos de restauración.

Los relevadores de protección fabricados con la función de control de equipos restauradores, permiten la configuración de los 4 intentos de restauración. Esta configuración puede ser del tiempo que transcurre entre operaciones de disparo y cierre y el ajuste del tipo de operación que pueden ser recierres instantáneos u operaciones de recierre con retardo. Para las operaciones de la señal de disparos

con retardo, ofrecen características de tiempo que se pueden seleccionar como lo es de tiempo definido o acorde a curvas de magnitud de corriente[12].

Verificación de sincronismo.

Permite definir las condiciones bajo las cuales se pueden conectar dos sistemas potencialmente independientes. Cuando se cumplen las condiciones establecidas por el usuario, se activa una señal interna de "permiso de cierre" y en caso contrario, la señal de "falla de sincronismo".

La función realiza la comparación de las señales de tensión de una misma fase en ambos lados del interruptor (barra o generación y línea o carga), por lo que deben tener iguales relaciones de transformación. El usuario puede seleccionar la fase para realizar la comparación. Las condiciones para que exista permiso de cierre son dos:

- Permiso por baja tensión.

Se da permiso si no hay tensión en uno o ambos lados del interruptor, de acuerdo con los siguientes ajustes:

- Permiso si no hay tensión en el lado línea ni en el lado carga.
- Permiso si no hay tensión en el lado línea y si en el lado carga.
- Permiso si no hay tensión en el lado carga y si en el lado línea.

Se considera que no hay tensión en un lado del interruptor cuando la tensión medida es inferior al valor programado como de "tensión mínimo" para ese lado. En caso de haber tensión en ambos lados, la función que actúa es la de "Permiso por sincronismo". El análisis de las condiciones de baja tensión sólo se realiza si la función "verificación de sincronismo" está habilitada. Si la función está deshabilitada, se da permiso de cierre.

- Permiso por sincronismo. Se da permiso si se cumplen simultáneamente, durante un tiempo programable, las condiciones siguientes:

- Diferencia entre latensión de línea y latensión de barra menor que el valor programado.
- Diferencia en ángulos de fase menor que el valor programado.
- Diferencia en frecuencias menores que el valor programado.

Fundir Fusibles.

Esta función hace que tras el ciclo de recierre programado (1 a 3), el equipo cambie automáticamente del grupo de ajuste actual, a uno nuevo, previamente programado por el usuario. Con este cambio de ajustes, se pueden incrementar los tiempos de operación de las funciones de protección y permitir que se fundan los fusibles de protección de la instalación antes de que el restaurador actúe. Al terminar el ciclo en curso vuelve a activarse el grupo de ajuste original.

Seccionalizador.

Es una alternativa para resolver varios problemas de coordinación de protecciones. Carecen de una característica tiempo corriente. El seccionalizador opera cuando se han completado un número de conteos preestablecidos. Para que un conteo sea realizado, deben cumplirse dos condiciones: Circulación previa de una sobrecorriente igual o mayor a la corriente mínima de actuación y que dicha corriente haya sido interrumpida. Al cumplirse estas dos condiciones, el seccionalizador abre sus contactos cuando la línea está desenergizada. Esto permite prever puntos de seccionamiento automático.

Falla de fusible.

Permite determinar cuándo se ha producido una pérdida de potencial debido a una falla de fusibles. En este caso, las funciones de sobrecorriente pierden la característica direccional, recuperando esta propiedad una vez que se recuperan los niveles de tensión. Esta condición se produce cuando la tensión de secuencia negativa es mayor que el valor de ajuste y la corriente de secuencia negativa es menor que su valor de ajuste.

Arranque con carga fría.

El objetivo de esta función es evitar disparos debido a los altos valores de corriente demandados por las cargas en el proceso de arranque o conexión al sistema de suministro de energía eléctrica. Esta función identifica cuándo se dan esas condiciones, y modifica los ajustes de disparo de las funciones de protección de sobrecorriente durante un tiempo programable.

La función se activa cuando la tensión en las 3 fases está por debajo del 5% de su valor nominal, comienza a contar el tiempo programado para determinar que se encuentra en la condición de "carga fría". Transcurrido ese tiempo sin que se haya recuperado la tensión a un valor superior al 10% del valor nominal, los valores de ajustes de la protección son sustituidos por los de carga fría durante el tiempo programado de activación de esta función. Al expirar ese tiempo, se reponen los ajustes normales.

Reconfiguración de circuitos de distribución.

Esta función permite esquemas de automatismo de redes de distribución, que pueden ser con comunicación o sin comunicación. El automatismo con comunicación requiere de un medio de comunicación que permita el intercambio de información entre los equipos que protegen la línea. En cambio, los mecanismos "sin comunicación" no requieren de tal medio. El mecanismo "sin comunicación" exige en ocasiones una operación adicional de cierre contra la falla para aislarla de forma efectiva o requiere que exista al menos un recierre para aislar correctamente una falla (suele también denominarse en algunos equipos como mecanismo "sin comunicación optimizado").

Telecontrol.

Por medio de un protocolo de comunicación del relevador, que por lo general es "peer to peer", también conocido como P2P por SMS, permite el intercambio de información de forma rápida, segura y optimizada. Este intercambio eficiente de información se utiliza para el control remoto entre relevadores, a fin de conformar

esquemas de protección que toman en cuenta el estado de otro equipo en la toma de decisiones. Los estados recibidos desde el otro extremo pueden ser combinados con estados locales para permitir obloquear disparos.

Localización de fallas.

La localización de fallas permite ubicar la distancia desde la protección hasta el lugar de la falla, para esto se determinan las corrientes de pre-falla, falla y las fases involucradas así como los valores de longitud de línea, impedancia de secuencia positiva e impedancia de secuencia cero.

El algoritmo de Takagi para la localización de fallas parte de multiplicar el término de la tensión en la falla por una magnitud tal, que el resultado sea real. Esa magnitud debe ser medible por el localizador, lo que requiere hacer ciertas aproximaciones para no considerar las magnitudes del terminal remoto de la línea[11].

En la Figura 2.5 se presentan los circuitos equivalentes de pre-falla (a) y de falla (b) de un sistema simple, suponiendo por simplicidad el caso de un cortocircuito trifásico. De estos circuitos se pueden determinar las componentes de pre-falla y las componentes de falla, y calcular por superposición las magnitudes totales de corriente de falla y tensión de falla.

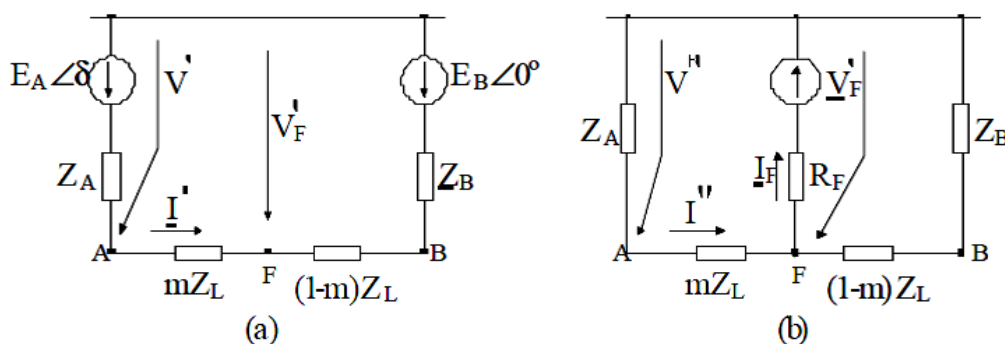


Fig. 2.5 Circuitos equivalentes de pre-falla (a) y de falla (b) para un corto circuito trifásico

Las variables y elementos representados en la figura 2.5 se describen a continuación:

m = longitud de la línea donde se localiza la falla.

Z_L = impedancia de secuencia positiva.

R_F = resistencia de falla.

I' = corriente de pre-falla.

I'' = corriente de falla.

V' = Tensión de pre-falla.

V'' = Tensión de falla.

I'_F = corriente en el punto de falla.

V'_F = tensión en el punto de falla.

A, B = puntos (ubicaciones) dentro del circuito.

F = punto de falla.

E_A, E_B = fuentes dentro del circuito.

Z_A, Z_B = impedancias de línea.

De la figura 2.5 se obtiene que la magnitud de corriente total I sea:

$$I = I' + I'' \quad \text{Ec. 2.1}$$

Takagi introduce el factor de variación de corrientes cuando ocurre una falla:

$$K = Ke^{j\alpha} = \frac{I_F}{I''} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Con lo cual se puede expresar la corriente de falla I_F , despreciando la componente compleja de la falla:

$$I_F = KI'' \quad \text{Ec. 2.3}$$

Al multiplicar la expresión de tensión medido en el extremo donde se ubica el localizador de fallas, por el conjugado de la corriente de falla, se obtiene:

$$VK^*I'' = mZ_LIK^*I'' + R_F I_F I_F^* \quad \text{Ec. 2.4}$$

De esta expresión se toma la parte de imaginaria para eliminar el término que involucra la resistencia de falla, la expresión resultante es:

$$I_{imag} = (VK^* I'') = m I_{imag}(Z_L I K^* I'') \quad \text{Ec. 2.5}$$

Entonces la expresión que se utiliza en este algoritmo para calcular la distancia a la falla es:

$$m = \frac{I_{imag}(VK^* I'')}{I_{imag}(Z_L I K^* I'')} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Representando el factor K en su forma compleja polar se obtiene:

$$m = \frac{I_{imag}(V I''^* e^{-j\alpha})}{I_{imag}(Z_L I I''^* e^{-j\alpha})} \quad \text{Ec. 2.7}$$

En esta expresión el ángulo α representa la relación angular entre dos componentes de corriente, una desconocida I_F y la otra conocida I'' , por lo que su valor no se puede conocer utilizando información de un solo extremo. Para eliminar este factor Takagi hace la suposición $\alpha = 0$, lo cual indica que todas las impedancias del sistema tienen la misma relación X/R, y resulta:

$$m = \frac{I_{imag}(V I''^*)}{I_{imag}(Z_L I I''^*)} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Se pueden presentar 3 posibles resultados:

- El valor de m es positivo y menor que 1. Esto indica que la falla está ubicada en la dirección de la línea hacia adelante y dentro de la longitud de la misma por lo que los resultados son correctos.
- El valor de m es negativo y menor que 1. En este caso hay que reevaluar el algoritmo considerando los parámetros de la línea con ajustes hacia atrás de la protección. Tras esta nueva evaluación que debe resultar también negativa se puede concluir que la localización es correcta pero en sentido contrario.

- El modulo del valor de m es mayor que 1. En este caso hay sobre alcance por lo que los resultados ofrecidos no son precisos ya que no se consideran los parámetros de impedancias reales hasta la localización de la falla.

Funciones de medición de la protección:

- Valores instantáneos de las corrientes de las tres fases, neutro y neutro sensible.
- Valores instantáneos de las tensiones de fase y de línea.
- Tensión auxiliar y tensión de la batería.
- Potencia activa, reactiva, aparente por fase y trifásica.
- Energía activa recibida y entregada.
- Energía reactiva en los cuatro cuadrantes.
- Factor de potencia por fase y trifásico.
- Frecuencia y secuencia de fases.
- Demandas de corrientes, tensiones, factor de potencia, potencia activa, reactiva y aparente por fase y trifásica.

2.2.3. Unidad de comunicación remota

El relevador de protección digital cuenta con todo el hardware y software necesario para realizar la comunicación alámbrica directa, pero se puede contar con funciones de telecontrol a través de un servicio de mensajes cortos SMS (Short Message Service) utilizados en la telefonía celular con redes de sistema global para las comunicaciones móviles GSM. Para esto es necesario contar con unidades de comunicación remota como módems GPRS, Radios y hasta comunicación por bluetooth (que no tiene el mismo rango de distancia que los radios o módems).

El protocolo de comunicación con mayor auge en México para los relevadores digitales es DNP 3.0 debido a la solicitud explícita de la CFE en normatividad aplicable a comunicación del control de restauradores. Los protocolos de comunicación, únicamente definen los lineamientos a seguir, para que esta comunicación sea efectiva. Los relevadores, incluyen estos lineamientos como

métodos de envío y recepción de información por paquetes digitales. Aparte del protocolo DNP, también existen los protocolos que se enlistan a continuación como referencia[13]:

- ModBus RTU.
- IEC 608070-5-101.
- Harris (5000).
- Procome.
- TCP/IP.

3. INTERPRETACIÓN DE LA NORMATIVIDAD APLICABLE A RESTAURADORES

La normatividad aplicable en México para restauradores es regida por dos organismos, que son:

- Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- Asociación de Normalización y Certificación, A.C. (ANCE).

La norma de la CFE aplicable a los equipos restauradores es la CFE VH000-11 “Restauradores”. Su alcance es aplicable para restauradores trifásicos con tensiones nominales de 13.8kV hasta 34.5kV y una capacidad interruptiva de 8000A y 12000A simétricos eficaces. Por supuesto, esta norma se limita a los requisitos de restauradores para instalaciones eléctricas aéreas de CFE. La última edición vigente a la fecha de publicación de este documento es de Febrero del 2007.

La norma ANCE aplicable a los equipos restauradores es la NMX-J-517-ANCE “Restauradores para sistemas de corriente alterna de 15kV hasta 38kV – Especificaciones y métodos de prueba”. Su alcance, como ya el título claramente lo especifica, es aplicable a: “especificaciones y métodos de prueba para restauradores en circuitos de corriente alterna de 15kV a 38kV aplicables en la protección de redes aéreas”. La última edición vigente a la fecha de publicación de este documento es de Marzo del 2007.

En el ámbito internacional, el cuerpo que rige la normatividad aplicable a restauradores es la “International Electrotechnical Commission” (IEC). La norma IEC para equipos restauradores es IEC 62271-111 “High-voltage switchgear and controlgear - Part 111: Automatic circuit reclosers and fault interrupters for alternating current systems up to 38 kV”. No existe una traducción oficial en español a la venta en la página de IEC, por lo que para fines prácticos se puede entender el título como “interruptores y controladores de altatensión - parte 111: restauradores e interruptores de circuitos de corriente alterna hasta 38kV”. Es

aplicable a todos los restauradores e interruptores para líneas aéreas (montados en poste), para pedestal, tanque seco o sumergible, monofásico o para más de una fase (la versión en inglés no especifica una cantidad de fases como la normatividad en México, ejemplo: trifásico), para tensiones nominales desde 1000V hasta 38kV. La última edición vigente a la fecha de publicación de este documento es la segunda edición, que fue publicada en septiembre del 2012.

Cabe aclarar que las referencias realizadas en este capítulo no sustituyen las normas mencionadas, sino únicamente recopilan la información más básica solicitada por las mismas, que ya también se encuentra disponible en los catálogos de los fabricantes de restauradores.

3.1. Requisitos generales del restaurador con medio de extinción por cámaras en vacío de acuerdo a IEC

Condiciones de servicio (en las que opera el restaurador)

Las condiciones de servicio para restauradores, en cuestión de temperatura, deben ser dentro de un rango desde -30°C hasta 40°C y la altitud en la que opera no debe exceder los 1000m sobre el nivel del mar. Se considera un servicio inusual si los restauradores deben operar rebasando las capacidades del restaurador en cuestión de su vida útil, su rango de temperatura, su altitud de operación, polvo excesivo o abrasivo, mezclas de gases o polvos explosivos, ambientes marinos o humedad extrema. Cuando la altitud de servicio se rebasa, se puede corregir la tensión de aguante al impulso por rayo, latensión nominal y la corriente nominal, multiplicando estos valores por un factor de corrección. Las demás propiedades interruptoras del restaurador no se ven afectadas cuando el servicio se debe proveer a mayor altitud[14].

Los valores nominales para el restaurador deben ser los siguientes:

- Tensión nominal.
- Frecuencia de operación.

- Corriente nominal.
- Corriente mínima de disparo.
- Corriente de interrupción nominal simétrica.
- Corriente de cierre nominal simétrica.
- Tensión de aguante al impulso por rayo.
- Tensión nominal del control.

Tensión nominal.

Los valores de tensión preferidos y los valores de ensayo son los indicados en la tabla 3.1, únicamente se recopilan los valores de interés para el tipo de restaurador referido en este capítulo.

Tabla 3.1 – Valores nominales de tensión preferidos y requisitos de prueba

Tensión nominal kV	Tensión de aguante al impulso por rayo kV	Tensión de aguante a frecuencia de operación kV Seco 1 min
15.5	95	35
27	125	40
38	150	50

Frecuencia de operación.

Los valores de frecuencia de operación preferidos son 50Hz y 60Hz.

Corriente nominal.

Los valores de corriente nominal preferidos se muestran en la tabla 3.2. Únicamente se recopilan los valores de interés para el restaurador trifásico de medio de extinción por cámara de vacío, con bobina conectada en serie con las líneas de distribución.

Tabla 3.2 – Valores nominales de corriente preferidos para restauradores con bobina en serie. Unidades en amperes

5	35	200
10	50	280
15	70	400
25	100	560
	140	

Corriente mínima de disparo.

La corriente mínima de disparo debe ser dos veces la corriente nominal, con una tolerancia de $\pm 10\%$.

Corriente de interrupción nominal simétrica.

La corriente de cierre nominal simétrica se basa en la capacidad del restaurador para interrumpir las corrientes asimétricas correspondientes en circuitos con valores de X/R y con tensión de restablecimiento a frecuencia nominal igual al valor de tensión nominal, y con tensión transitoria de restablecimiento (TTR) relacionada con la interrupción de la corriente de corto circuito nominal.

Para tener un entendimiento más claro de lo que es la tensión transitoria de restablecimiento, ver el apartado 3.1.1 y la capacidad de corriente de cierre. Para entender los valores de la relación X/R referirse al apartado 3.1.2.

La tabla 3.3 muestra los valores para corrientes de interrupción nominales simétricas de acuerdo a las tensiones nominales de operación de los restauradores.

La tabla 3.4 muestra los valores X/R para interrupción de la corriente nominal asimétrica.

Corriente de cierre nominal simétrica.

La corriente de cierre nominal simétrica debe ser el mismo valor que el de la corriente de interrupción nominal simétrica con máxima asimetría correspondiente al valor X/R en la columna 7 de la tabla 3.4.

Tensión de aguante al impulso por rayo

Los valores preferidos de tensión de aguante al impulso por rayo son los referidos en la columna dos de la tabla 3.1, para las polaridades positivas y negativas de prueba. La onda de tensión debe alcanzar su valor de cresta en $1.2\mu s$ y caer a la mitad de su cresta en $50\mu s$ como se ejemplifica en la figura 3.1.

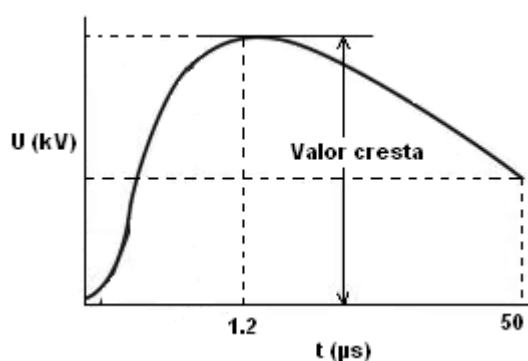


Fig. 3.1 Onda de prueba de tensión de aguante al impulso por rayo.

Tabla 3.3 – Valores preferidos de corrientes de cierre nominal continua simétricas para restauradores con bobina en serie[14].

Corriente nominal, (A)	Tensiones nominales del restaurador, (kV)					
	15.5	15.5	15.5	15.5 y 27	27	38
5	200	-	-	-	200	
10	400	-	-	-	400	
15	600	-	-	-	600	
25	1000	1500	1500	-	1000	1500
35	1400	2100	2100	-	1400	2100
50	2000	3000	3000	-	2000	3000
70	2000	4000	4000	-	2500	4200
100	2000	4000	4000	6000	2500	6000
140		4000	4000	8000		6000
200		4000	4000	8000		6000
280		4000	4000	8000		6000
400			4000	8000		6000
560				8000		

Tabla 3.4 – Valores preferidos de corrientes de interrupción nominal simétricas y características de operación[14].

		Ciclo de operación normal						
		Porcentaje del valor nominal de interrupción						Número total de operaciones unitarias
		15 a 20		45 a 55		90 a 100		
Tensión nominal máxima, kV	Corriente de interrupción simétrica, kA	X/R	Número de operaciones unitarias	X/R	Número de operaciones unitarias	X/R	Número de operaciones unitarias	
15.5	2.0	2	52	5	68	10	18	138
	6.0	3	48	7	60	14	16	124
	8.0	4	44	8	56	14 para 50Hz	16	116
	12.5					17 para 60Hz		
	16.0							
	20.0							
27	8.0	3	44	8	56	14 para 50Hz	16	116
	10.0	4				17 para 60Hz		
	12.5							
	16.0							
	20.0							
38	8.0	4	44	8	56	14 para 50Hz	16	116
	12.5					17 para 60Hz		
	16.0							
	20.0							

Tensión nominal de control

Los valores nominales de tensión preferidos para el control de los restauradores medidos en las terminales del mecanismo de operación son los que se mencionan en la tabla 3.5.

Se debe tomar en cuenta para los controles conectados a corriente directa, las bobinas de cierre, funciones auxiliares y de disparo deben ser conectados a la barra de control negativa para reducir el deterioro electrolítico. Las tensiones en directa de 24V o 48V se recomiendan solo cuando los dispositivos se encuentran cerca de las baterías. Para los controles conectados a corriente alterna, se incluyen los circuitos de calefacción en los valores de tensión.

Tabla 3.5 – Tensión de control nominal preferentes y rangos (V)[14].

Rango de tensiones de control preferidos en corriente directa		
Tensión nominal (V)	Funciones auxiliares y cierre	Función de disparo
24	-	14-28
48	38-56	28-56
125	100-140	70-140
250	200-280	140-280
Rango de tensiones de control preferidos en corriente alterna		
Tensión nominal monofásico (50/60Hz)	Cierres, disparos y funciones auxiliares	
120	104-127	
240	208-254	
480	416-508	
Más de una fase		
208 (estrella)/120	180(estrella)/104-220(estrella)/127	
240	208-254	
480	416-508	
480(estrella)/277	416(estrella)/240-508(estrella)/292	

Las pruebas mencionadas en adelante y hasta el término de esta sección 3.1 son requisito de la norma “IEC-62271-111”, solo se enlistan las pruebas que tienen mayor relevancia.

Pruebas al restaurador

Existen dos tipos de pruebas que se mencionan en las normas tanto nacionales como internacionales que se realizan a los restauradores[15]:

- Pruebas de rutina.
- Pruebas prototipo.

Las pruebas de rutina, se deben realizar a los equipos en el porcentaje solicitado, que para restauradores es común que sea del 100%, cada vez que son fabricados. Estas se trataran más adelante en este capítulo.

Las pruebas prototipo se realizan para asegurar la confiabilidad del diseño del restaurador y algunas de estas pruebas son de naturaleza destructiva ya que someten al equipo a las capacidades de diseño acorde a la norma de referencia. Una vez se considera que se han pasado estas pruebas, que son realizadas por un laboratorio certificado (ejemplo, LAPEM en México), se emite una constancia de aceptación del equipo que es válido a menos que se cambie el diseño para mejorar el desempeño del restaurador. Este trámite permite al fabricante del equipo restaurador ofertar su producto en el mercado, dando constancia de que su equipo cumple con las características normativas solicitadas (las pruebas prototipo se realizan antes de que el equipo sea comercializado). En este apartado se tratan las pruebas de manera descriptiva, sin ir mucho a detalle de los fenómenos observados de cada prueba.

Para la realización de las prueba prototipo, es necesario que el equipo presentado sea nuevo y que se encuentre en buenas condiciones. El control debe ser montado acorde al uso intencionado o a dos metros de las terminales de fase bajo prueba y debe ser conectado con su cable que no debe exceder los seis metros de longitud. El montaje del restaurador, debe ser en una estructura que simule la instalación para la que está diseñado. Todas las partes de puesta a tierra, deben ser aterrizadas de manera que no se disminuya la tensión de aguante. La frecuencia de la prueba, es la frecuencia para la que se ha diseñado el restaurador $\pm 5\%$ de tolerancia, o si este se ha diseñado para operar a ambas frecuencia, las pruebas pueden realizarse en cualquiera de estas dos. El control del restaurador, debe tener un buen desempeño con el rango especificado en la tabla 3.5.

Pruebas dieléctricas

Las pruebas dieléctricas se realizan para determinar el grado de aislamiento. El equipo restaurador las debe soportar sin presentar daños en el aislamiento. Las conexiones eléctricas deben realizarse con cable desnudo en cada terminal del restaurador, con el fin de no reducir la tensión de aguante. La temperatura de prueba, es la temperatura ambiente. Las pruebas que se realizan son:

- Tensión de aguante al impulso por rayo.
- Tensión de aguante a frecuencia nominal.

La prueba de tensión de aguante al impulso por rayo debe ser de $1.2 \times 50 \mu s$ de tensión de impulso como se muestra en la figura 3.1, el valor de cresta debe coincidir con los valores de la columna 2 de la tabla 3.1. La prueba consiste en aplicar al menos 3 impulsos negativos y 3 positivos al equipo. Si durante la aplicación de estos primeros impulsos, se detecta flameo en el restaurador, se aplicaran 9 pruebas consecutivas más, para determinar que el flameo fue aleatorio.

Debido a las propiedades de la interrupción en vacío, existe la posibilidad de que un interruptor en posición de abierto tenga un arqueo aleatorio no mayor al 25% debajo de la tensión nominal de aguante al impulso, pero estos arcos pasaran por los contactos abiertos, sin tener mayores repercusiones para la unidad interruptiva.

La prueba de tensión de aguante a frecuencia nominal se realiza a un valor igual a 1.414 veces la frecuencia nominal con los contactos secos, con una duración de un minuto.

Las pruebas mencionadas, deben realizarse una vez a todas las terminales de un lado del restaurador de forma simultánea con los contactos cerrados y con el tanque y componentes aterrizados. Después se deben abrir los contactos y realizar las pruebas de tensión de aguante, de manera simultánea, a todas las terminales de un lado del restaurador, el tanque y otros componentes se debe aterrizar. Revertir las conexiones una vez realizada la prueba y volver a probar. Se repite la prueba de tensión también en la fase media (únicamente la fase media) con el contacto cerrado, después se abre el contacto y se realiza la prueba, primero a un lado del restaurador y después del otro.

Pruebas de operación (apertura y cierre)

Este tipo de pruebas se realiza para demostrar las capacidades del equipo para interrumpir las corrientes de carga e incluyendo la corriente nominal asignada. Las corrientes de carga incluyen la componente capacitiva de las corrientes asociadas con la línea y cable de carga y las corrientes de magnetización de los transformadores sin carga.

Las capacidades de operación se determinan en base a las condiciones de prueba de tensión, corriente, circuito y número de operaciones. Ya sea el neutro o la fuente deben ser aterrizados en esta prueba, pero no ambos. Se permite un tiempo no especificado entre aperturas y cierres del circuito para dejar que el restaurador recupere sus propiedades y no se realiza mantenimiento entre corridas de prueba. La corriente a ser interrumpida debe ser simétrica despreciando la compensación de corriente directa. Los contactos del restaurador no deben ser abiertos hasta que las corrientes transitorias debidas al establecimiento del circuito hayan disminuido.

La corriente de prueba, debe ser el valor promedio eficaz de las corrientes interrumpidas en todos los polos. Las tres corrientes en cada polo no deben variar en más de un 10% de valor promedio.

La tensión de prueba a frecuencia nominal es el promedio de la tensión de fase a fase, y debe ser medida en un intervalo de 1 ciclo y 1.5 ciclos después de la extinción del arco de fase final.

La tensión de prueba debe ser igual o mayor que la frecuencia nominal del restaurador. Las tensiones de las 3 fases (individualmente) no deben variar más de un 10%. La tensión de prueba a frecuencia nominal, debe mantenerse por al menos 0.1s después de la extinción del arco[14].

Debido a que los restauradores podrían tener que operar para cualquiera de las denominaciones que se muestran en la tabla 3.6, las pruebas deben ser las mostradas en dicha tabla sin realizar mantenimientos al restaurador, la prueba de operación por carga debe ser la primera.

Tabla 3.6 – Operaciones (apertura-cierre) de prueba

Tipo de prueba	Número de operaciones	Corriente de prueba
Operaciones por carga	10	100% de la continua nominal Nota: Equipo sujeto a tensión en C.D. cuando se conecta a cable
Operación por línea en vacío	20	100% de la línea en vacío nominal

Prueba de operaciones con carga

El restaurador debe ser capaz de operar en todas las corrientes de carga incluyendo su operación por corriente de carga nominal de acuerdo con la tabla 3.6. La prueba de operaciones con carga, debe ser conducida de acuerdo con el circuito de la figura 3.2, el ciclo del restaurador debe ser como se muestra en la tabla 3.6.

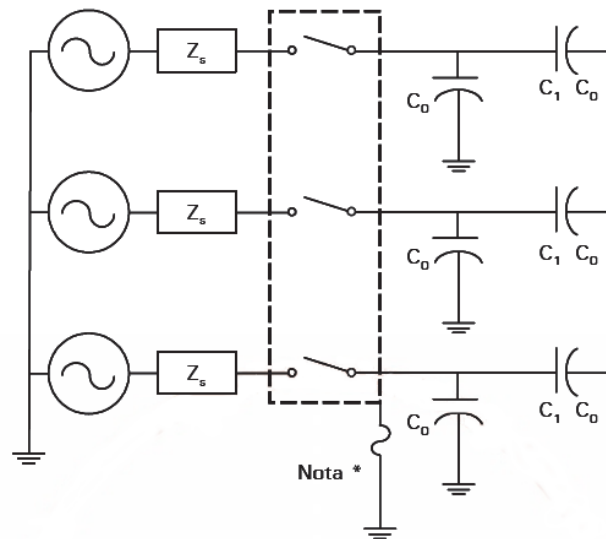


Fig. 3.2 Circuito de prueba de operación por corriente de carga.

$$Z_s = 10\% \text{ a } 20\% \frac{(\text{tensión nominal máxima})}{(\sqrt{3} \text{ corriente de prueba})} \quad \text{Ec. 3.1}$$

La corriente de prueba debe ser la corriente de operación del restaurador. La impedancia de la fuente X/R debe ser entre 5 y 7. El circuito del lado fuente y las componentes del circuito de control de la TTR deben permanecer constantes para pruebas que se especifican a una corriente menor que la nominal.

Prueba de corriente

Las pruebas de interrupción de corriente de línea en vacío se relacionan con la capacidad que se requiere de los restauradores para interrumpir la componente capacitiva de las corrientes asociadas con los valores de corriente. La cresta de la sobretensión transitoria que se produce durante una prueba interruptiva de corriente de línea en vacío no debe exceder 2.5 veces la cresta de la tensión de la línea a tierra, si el primer polo que abre no re-cierra. El funcionamiento del restaurador es adecuado si interrumpe las corrientes capacitivas que se requieren donde la cresta de la sobretensión transitoria excede 2.5 por unidad en no más de una de 20 interrupciones. La cresta de la sobretensión transitoria para cada prueba debe medirse entre las terminales del restaurador y tierra. El factor de sobretensión transitoria para cada prueba debe calcularse dividiendo la cresta de la tensión transitoria entre el valor cresta de tensión de fase a tierra del circuito abierto.

Si un restaurador pasa las pruebas de interrupción de falla y de operación (cierre-apertura), se asume que este será capaz de interrumpir las corrientes magnetizantes de los transformadores sin carga, desde 38kV hacia abajo y de 2500kVA o menos.

Capacidad de corriente de cierre

El propósito de la prueba de ciclo de operación, para la interrupción de la capacidad de corriente de cierre, es determinar si el restaurador demuestra la capacidad de cierre y establecimiento de la corriente interruptiva simétrica nominal.

La tensión transitoria de restablecimiento relacionada con la interrupción de la corriente de cortocircuito nominal se considera la tensión de referencia que constituye el límite que la prospectiva TTR que el restaurador debe soportar bajo condiciones de falla.

La forma de onda de las TTR varía de acuerdo con el arreglo de los circuitos reales. En sistemas donde los restauradores se utilizan con tensiones nominales

hasta 38kV, las TTR, se aproximan a una oscilación amortiguada de una sola frecuencia. Esta forma de onda se representa por una envolvente que consiste en dos segmentos de línea que se definen por medio de dos parámetros; un parámetro de tensión y un parámetro de tiempo (figura 3.3). Esta envolvente es el límite de la línea recta de la TTR con una forma de onda de un coseno que se produce por los circuitos típicos de distribución. La influencia de la capacitancia propia en el lado fuente del interruptor produce un valor promedio menor de la tensión durante los primeros microsegundos de la TTR. Esto se tiene que tomar en cuenta para introducir un tiempo de retardo.

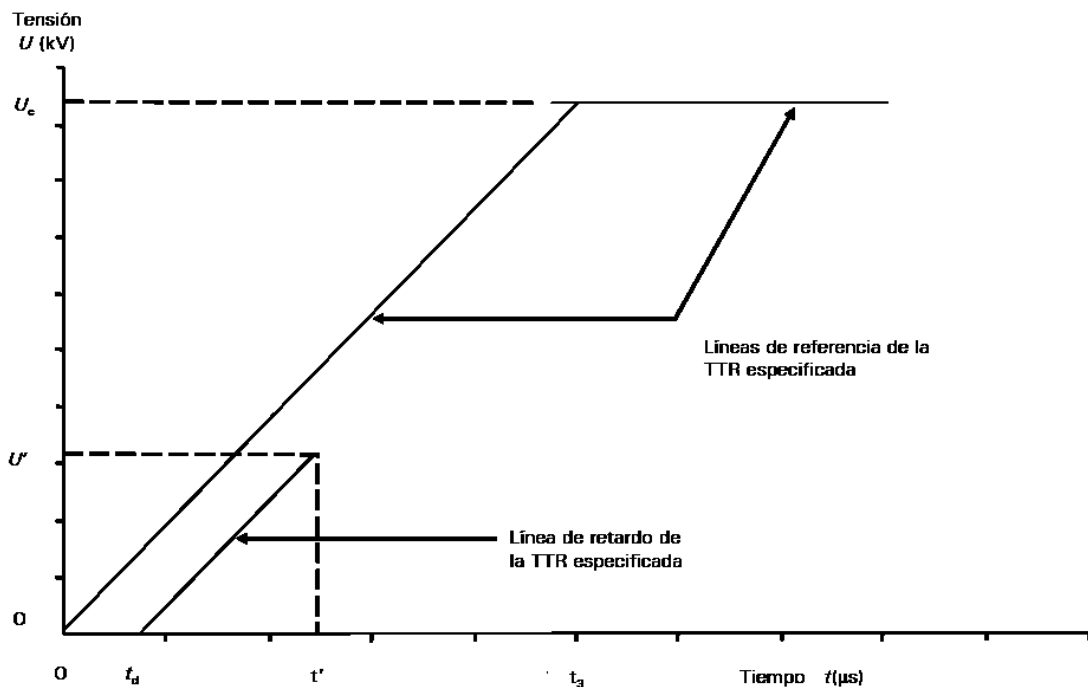


Fig. 3.3 Representación de la TTR.

$$u_c = k_{pp} \times k_{af} \times U_r \times \sqrt{2/3} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Dónde:

u_c = Tensión de referencia (valor cresta de la TTR) en kV.

k_{pp} = Factor de “primer polo en evitar falla” (primer polo en abrir).

k_{af} = Factor de amplitud (1.54 de falla de terminal).

U_r = Tensión (Tensión) nominal.

La ecuación 3.2 representa la TTR en función de la tensión nominal, el factor del “primer polo en abrir”, y el factor de amplitud. De la figura 3.3 se entiende que t_3 es el tiempo necesario para alcanzar el valor cresta de la TTR, $\frac{u_c}{t_3}$ es la razón de incremento de la tensión de restablecimiento (RITR), el cual es especificado como una función del sistema de tensión basado en mediciones de sistemas típicos.

t_3 es derivado de u_c y el valor especificado de la razón de incremento $\frac{u_c}{t_3} = RITR$ como $t_3 = u_c / RITR$.

Se entiende también lo siguiente:

t_d = tiempo de retardo.

u' = tensión de referencia.

t' = tiempo transcurrido para u' .

La línea de retardo de la TTR inicia en el tiempo de retardo nominal t_d y corre paralelo a la primera sección de la línea de referencia de la TTR nominal terminando hasta alcanzar la tensión de referencia u' (coordenada del tiempo t').

El tiempo transcurrido para alcanzar la tensión de referencia u' de acuerdo a la figura 3.3 está dado por la ecuación:

$$t' = t_d + \frac{u'}{RITR} \quad \text{Ec. 3.3}$$

La tensión transitoria de restablecimiento correspondiente a la interrupción de la corriente de cortocircuito nominal cuando la falla ocurre en terminales, se utiliza para probar la interrupción de las corrientes de cortocircuito nominales iguales al valor nominal. Sin embargo, para pruebas de interrupción de corrientes de cortocircuito menores al 100% del valor nominal, la TTR alcanza un valor cresta más alto y tiene una RITR más rápida[5].

El desempeño de interrupción requerido, es que el restaurador sea capaz de interrumpir de manera automática todas las corrientes con un valor igual a la mínima configuración de interrupción e incluyendo corrientes de interrupción simétricas como se muestra en la tabla 3.4.

La prueba de operación (apertura-cierre) es la base para verificar la corriente simétrica de interrupción nominal si al menos hay dos interrupciones con el ciclo inicial teniendo máxima asimetría como se determina con el factor de X/R adecuado.

Operaciones automáticas (comportamiento de operación)

El número total de operaciones que deben ocurrir durante esta prueba se muestran en la tabla 3.4 (ultima columna). Para las operaciones requeridas, al menos debe ocurrir una operación rápida de apertura seguida de una operación con retardo de apertura a una corriente no menor que la corriente de interrupción simétrica nominal.

El restaurador debe ser ajustado para realizar el número máximo de operaciones permitidas, incluyendo al menos la operación de apertura rápida y la operación de apertura con retardo, antes del bloqueo permanente. Si los intervalos de recierre son ajustables, estos deben ser configurados al mínimo intervalo de recierre para los que el restaurador fue diseñado, pero no mas rápido que las recomendaciones del fabricante.

Pruebas de descargas parciales

Las pruebas de descargas parciales aplican para los restauradores que utilizan un dieléctrico no recuperable como aislamiento primario. Su objetivo es probar el medio aislante contra deterioros. La norma internacional para la realización de estas pruebas es la IEC 60270-200 “High-Voltage test techniques – Partial discharge measurements” que se traduce como “Técnicas de prueba de alta tensión – mediciones de descargas parciales” y aplica para la medición de descargas parciales que ocurren en aparatos eléctricos, componentes o sistemas,

cuando se prueban con frecuencia de tensión hasta 400Hz o con tensión directa. Estas pruebas se tratan en más detalle en el siguiente capítulo, pero con el enfoque específico de las pruebas a los polos de corte del restaurador. Cabe destacar únicamente que la prueba de descargas parciales debe realizarse a 105% de la tensión de línea a tierra, correspondiendo al valor nominal máximo de tensión del restaurador. La mínima detección de sensibilidad para estas pruebas debe ser de 10pC (pico Coulomb).

Prueba de sobrecorriente

Las pruebas de sobrecorriente para restauradores con bobina de disparo serie tienen el objetivo de probar que el restaurador es capaz de resistir dos sobrecorrientes de 65000A cresta con una onda del orden de $4 \times 10\mu s$. Estas dos sobrecorrientes se aplican a cada una de las fases. Después se prueba a la mínima corriente de disparo para causar que el restaurador se bloquee. Al finalizar la prueba, las condiciones mecánicas deben ser similares a las iniciales con excepción de marcas pequeñas por arcos en el electrodo de la bobina de derivación. No deben existir marcas de flameo en la bobina, ni en cualquier otra parte del restaurador. Eléctricamente, la bobina de derivación debe ser capaz de soportar la tensión nominal máxima y cuando esté en la posición de cerrado, debe funcionar correctamente con sobrecorrientes llevándolo a una secuencia típica de bloqueo.

Pruebas de tiempo-corriente

Las pruebas de tiempo-corriente tienen el objetivo de verificar el tiempo de reacción del restaurador ante la detección de una sobrecorriente. El intervalo de corriente a la cual se obtienen datos es a partir de la corriente mínima de disparo a la corriente de interrupción nominal.

La separación de contactos por prueba de tiempo-corriente debe ocurrir a cualquier tensión arriba de la tensión máxima (nominal) de diseño, probado con un arreglo de circuito, de manera que la corriente a través del restaurador sea constante. El tiempo de despeje de la falla (separación de contactos) se puede

obtener tomando en los oscilogramas el cierre de contra falla o de las pruebas de ciclos de operación. De manera alternativa, el tiempo de despeje de falla se puede obtener midiendo el tiempo total de apertura desde los oscilogramas de las pruebas de interrupción, tomadas desde la tensión nominal máxima y a corrientes desde la mínima de disparo hasta la corriente de interrupción nominal simétrica.

La figura 3.4 muestra las fases de tiempo de operación del interruptor desde el inicio del cortocircuito hasta el restablecimiento del servicio de distribución.

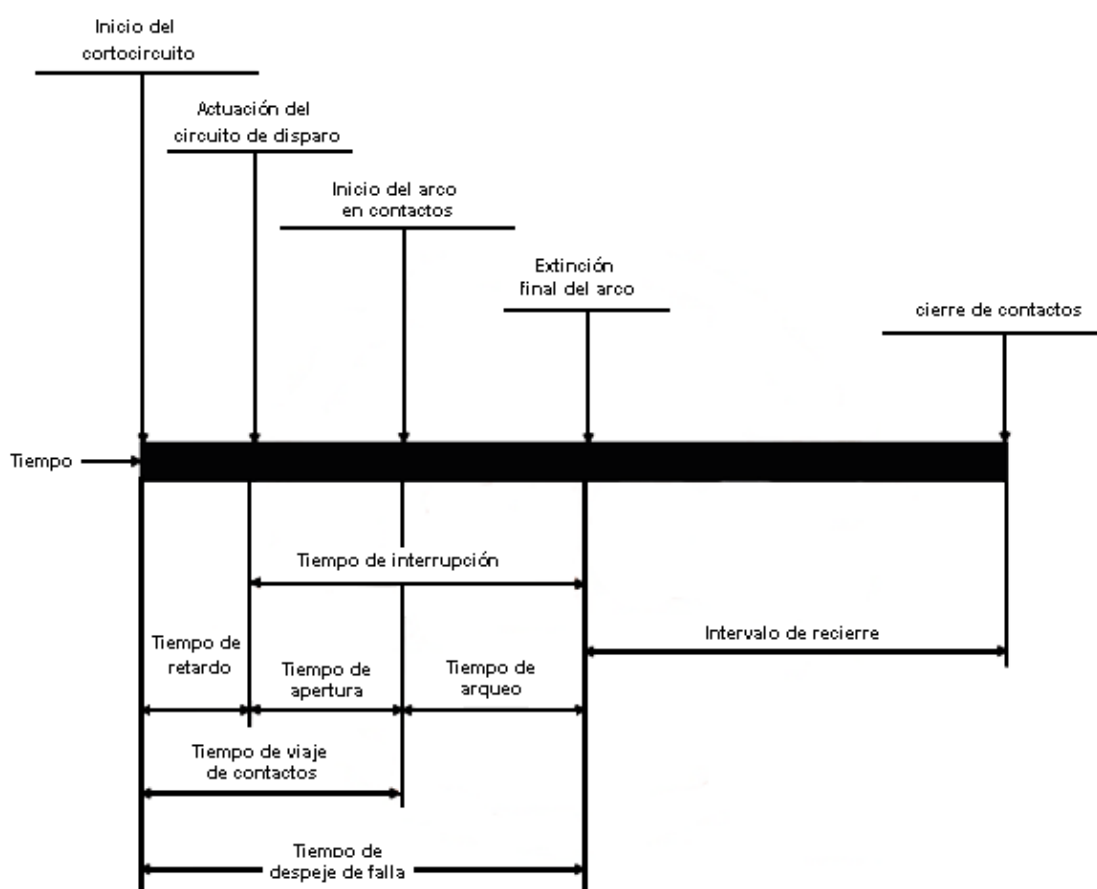


Fig. 3.4 Tiempos de operación del restaurador.

Prueba de ciclo mecánico

El restaurador debe soportar un mínimo de 2000 operaciones de cierre y apertura sin mantenimiento y 200 de estas utilizando un mecanismo de apertura y cierre manual. Durante esta prueba la resistencia entre terminales no debe incrementarse por más del 50% o $100\mu\Omega$, lo que sea mayor, debe pasar una

prueba de aguante a frecuencia nominal de acuerdo a los valores de la columna 3 de la tabla 3.1.

Requisitos de construcción del restaurador

El tanque del restaurador y todas las partes expuestas al medio ambiente deben ser elaborados de un material resistente a la corrosión o provistos de un acabado resistente a impactos y corrosión, y deben ser adecuados para un almacenamiento externo sin ninguna protección. Ninguna parte externa debe atrapar agua y los contenedores deben evitar la filtración de agua. El soporte del restaurador debe ser firme y proveer anclaje para los componentes del mismo. Debe proveer agarraderas para levantarlo, de tal manera que este pueda ser nivelado en todo momento y el mecanismo de izaje no interfiera con los componentes de maniobra de manera que el contenedor se pueda dañar. Si el conductor es metálico, este debe estar diseñado para alojar un conductor a tierra que permita conducir la corriente nominal simétrica del restaurador por 2 segundos sin dañarse el conector o conductor. Los gabinetes de control se pueden instalar por separado, teniendo su propio medio para conexión a tierra.

El interruptor del restaurador debe contener un método para su apertura o cierre por medio de pértiga. Así mismo, contener un indicador de posición que indique claramente si el circuito se encuentra cerrado o abierto y un contador de operaciones.

Las placas de datos deben incluir la información siguiente:

- a) Nombre o marca del fabricante.
- b) El tipo o número de identificación del fabricante.
- c) Frecuencia nominal (si este solo puede operar en una frecuencia).
- d) Tensión nominal.
- e) Mínima corriente de interrupción.
- f) Corriente simétrica de interrupción.
- g) Tensión de aguante al impulso por rayo.
- h) Número de serie o fecha de manufactura.

i) Peso del equipo.

3.1.1. Método para trazar la envolvente de la prospectiva tensión transitoria de restablecimiento de un circuito y determinar los parámetros representativos

Una onda de tensión transitoria de restablecimiento puede tomar forma oscilatoria o no oscilatoria. Se define por medio de una envolvente compuesta por dos segmentos de línea consecutivos; cuando la onda se aproxima a una oscilación amortiguada en una sola frecuencia, la envolvente debe reflejar la forma real de la TTR[5].

Para trazar la onda, el primer segmento de línea pasa a través del origen y es tangencial a la curva (segmento OA). El segundo segmento es una línea horizontal tangencial a la curva en su cresta máxima (segmento AC).

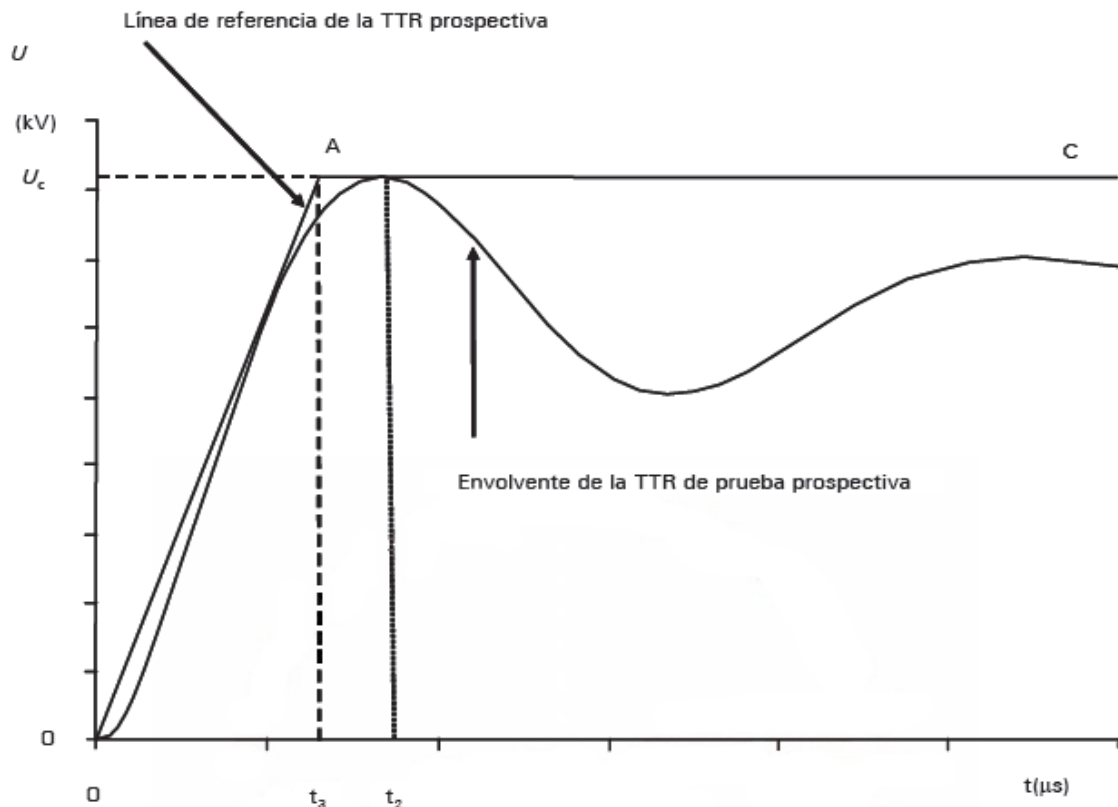


Fig. 3.5 Representación de la TTR esperada en un circuito de prueba.

Los dos parámetros representados son las coordenadas de intersección de los segmentos de línea que constituyen la envolvente. Cuando esta se compone de dos segmentos de línea, los parámetros U_c y t_3 que se muestran en la figura 3.5 pueden obtenerse como coordenadas del punto de intersección A.

$$E_2 = \text{Tensión cresta de TTR} = U_c \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$T_2 = \text{Tiempo en } E_2 = 1.138t_3 \quad \text{Ec. 3.5}$$

En la ecuación 3.5, t_3 es menor que T_2 ; por lo tanto pueden encontrarse valores equivalentes a T_2 y t_3 utilizando la última ecuación para cualquier forma de onda 1-coseno.

3.1.2. Relaciones X/R

Un conocimiento general de la constante de tiempo del circuito (τ_{cc}), la relación X/R y las corrientes cresta asociadas son necesarias para un diseño apropiado, pruebas y aplicación de equipos de restauración. Los esfuerzos mecánicos asociados con la resistencia (aguante) a la falla o cierre contra falla, está en relación con el cuadrado de la corriente de cresta (i_p^2) y los esfuerzos térmicos del pre arco o la interrupción de la corriente de falla, es una relación compleja de la tensión del arco, el tiempo del arco y la carga total[6].

Un circuito eléctrico se puede definir por una serie de componentes principales que son la inductancia, (L o X , $X = 2\pi fL$) y la resistencia. La constante de tiempo del circuito se define por la relación L/R . La relación X/R depende de la frecuencia.

Para fallas trifásicas, las componentes de secuencia positiva del circuito deben considerarse:

$$\tau_{cc} = R_1/L_1, X/R = X_1/R_1 \quad \text{Ec. 3.6}$$

Para una falla de fase a tierra debe considerarse:

$$\tau_{cc} = \frac{[2L_1+L_0]}{[2R_1+R_0]}, \frac{X}{R} = \frac{[2X_1+X_0]}{2R_1+R_0} \quad \text{Ec.3.7}$$

Dónde:

R_0 = resistencia de secuencia cero.

R_1 = resistencia de secuencia positiva.

L_0 = inductancia de secuencia cero.

X_0 = reactancia de secuencia cero.

L_1 = inductancia de secuencia positiva.

X_1 = reactancia de secuencia positiva.

La maxima corriente asimetrica está asociada con la iniciacion de falla a tensión cero. Esta puede estar asociada con una descarga atmosférica, con un desconectador, un cierre de interruptor, un cierre en un circuito fallado o a tierra temporal. Si se utiliza un desconectador trifásico, puede ocurrir una corriente de falla asimétrica en una de las fases, la corriente asimetrica maxima esta entre 87% y 100% de su valor.

La corriente instantanea de una fase del circuito esta dada por la siguiente ecuación:

$$i = \frac{\sqrt{2}}{\left[\sin(\omega t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi) e^{-t/\tau_{cc}} \right]} \quad \text{Ec. 3.8}$$

donde:

i = corriente instantanea.

I = valor eficaz de la corriente.

ω = frecuencia angular ($2\pi f$).

φ = ángulo de fase del circuito = $\tan^{-1}(X/R)$.

θ = ángulo entre la tensión cero y el tiempo de inicio de falla.

t = tiempo.

τ_{cc} = constante de tiempo del circuito.

La cresta de la corriente asimétrica (i_p) es el valor máximo de la formula de abajo.

El factor de cresta es i_p/I . El factor del valor eficaz de corriente puede obtenerse

a partir de:

$$\text{Factor eficaz de corriente} = \sqrt{1 + (\sqrt{2}e^{-t_p/\tau_{cc}})^2} \quad \text{Ec. 3.9}$$

En el que t_p es el tiempo para alcanzar la cresta, o el tiempo máximo de la formula anterior.

La tabla 3.7 muestra los factores cresta y factor eficaz de corriente para 50Hz y 60Hz ambos sobre el intervalo de las constantes de tiempo.

Tabla 3.7 – Factores cresta y eficaz de corriente[14].

Constante de tiempo $ \tau_{cc} $ (ms)	Relación X/R		Factor cresta [i_p/I]		Factor eficaz de corriente	
	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz	60Hz	50Hz
10.6	4.0	3.3	2.09	2.01	1.21	1.16
21.2	8.0	6.7	2.38	2.31	1.39	1.35
31.8	12.0	10	2.51	2.46	1.49	1.45
45	17.0	14.1	2.59	2.55	1.55	1.52
60	22.6	18.9	2.65	2.61	1.59	1.56
90	33.9	28.3	2.70	2.68	1.63	1.61
120	45.3	37.7	2.73	2.72	1.66	1.64
150	56.6	47.1	2.75	2.74	1.67	1.66

3.1.3. Pruebas de rutina

Las pruebas de rutina requeridas son[14]:

- Calibración.
- Control, cableados secundario y pruebas de componentes.
- Aguante dieléctrico.
- Prueba de descargas parciales.

- e) Operaciones mecánicas sin carga.
- f) Prueba de hermeticidad.

Calibración de re-cierre e interrupción de sobrecorriente

Los restauradores deben ser sujetos a la calibración de las curvas de operación publicadas tiempo-corriente. El efecto de la calibración debe ser reconocido y probado con la unidad completa para asegurar que el restaurador cumplirá su función. Para la prueba, se utilizará una onda de corriente sinusoidal a una tensión conveniente. La calibración debe realizarse para los siguientes:

Mínima corriente de interrupción.

Ajuste de interrupción.

Pruebas de tiempo-corriente.

Pruebas de secuencia.

Características remotas.

Características especiales.

Control, cableados secundarios y pruebas de componentes

Se debe verificar la correcta conexión de los componentes como son el control, los cableados secundarios y los demás accesorios. Los componentes y relevadores, deben ser verificados con operaciones reales para asegurar su correcto funcionamiento cuando sea posible. Aquellos circuitos cuyo funcionamiento no puede ser comprobado, deben probarse por continuidad.

Aguante dieléctrico

Se debe realizar la prueba de tensión de aguante a frecuencia nominal por un minuto en seco, la cual puede ser a componentes modulares. El fabricante debe especificar los límites de prueba apropiados.

Pruebas mecánicas (operaciones mecánicas sin carga)

La inspección mecánica debe incluir la inspección de partes externas, interrupciones manuales (por palanca de accionamiento manual). Se requieren al menos 25 operaciones consecutivas para verificar el mecanismo, el secuenciado, y los dispositivos de tiempo.

Prueba de hermeticidad

La prueba de hermeticidad debe asegurar que se cumplen las condiciones para servicio del restaurador, sometiéndose a una prueba de lluvia en la que el criterio de aceptación es booleano. La prueba consiste en simular una lluvia durante una hora con aspersores colados a 45°. El agua no debe estancarse en ninguna parte de los elementos constitutivos del restaurador y ni permear al interior de los gabinetes.

3.2. Requisitos generales del restaurador con medio de extinción en vacío de acuerdo a normatividad ANCE

La norma ANCE aplicable a restauradores no presenta muchas diferencias con respecto a la norma IEC. La diferencia que se encuentra radica meramente en el alcance de las normas.

La norma internacional IEC 62271-111 es aplicable a restauradores para líneas aéreas, de montaje en pedestal, de tanque seco o sumergible, monofásicos o de más de una fase, y tensiones nominales desde 1000V hasta 38kV.

La norma mexicana NMX-J-517 ANCE, se limita a restauradores para protección de líneas aéreas, desde 15kV hasta 38kV y otros valores de operación que aplican únicamente para México como lo es:

El rango de temperatura de servicio, que en ANCE es de -15°C a 40°C mientras que en IEC es desde -30°C a 40°C.

La frecuencia nominal de operación para ANCE es únicamente 60Hz ± 2 Hz de tolerancia mientras que para IEC la frecuencia puede ser de 50Hz o 60Hz y no se

especifica una tolerancia. Esto por supuesto también se hace claro en las pruebas que se realizan a restauradores acorde a ANCE, ya que estas solo realizan con frecuencia de 60Hz.

Las normas de referencia ANCE son normas nacionales y únicamente cuando no existe normatividad aplicable nacional se hace referencia a normas internacionales.

Las pruebas prototipo y de rutina que se realizan, y los valores para estas pruebas prototipo y de rutina, se mantienen iguales. Por lo que no es necesario describir las pruebas solicitadas por la norma ANCE.

3.3. Requisitos generales del restaurador con medio de extinción en vacío de acuerdo a normatividad de laCFE

La normatividad de CFE para restauradores “CFE VH000-11” describe requisitos que deben cumplir los restauradores, adicionales a los requisitos de la norma ANCE. Su campo de aplicación se limita a restauradores trifásicos con tensiones nominales desde 13.8kV hasta 34.5kV y con capacidades interruptivas desde 8000A hasta 12000A simétricos eficaces.

Los requisitos adicionales que realmente hacen que esta norma se diferencie de las dos anteriores son:

- a) Medio de extinción y medio aislante.
- b) Funciones de control.
- c) Fuente de alimentación.

Existen por supuesto en esta norma otras pequeñas diferencias pero no se hará referencia a estas debido al alcance de este trabajo. Se explican estas diferencias de interés en los siguientes sub-temas.

En cuestión de pruebas prototipo y de rutina, esta norma no especifica, más que valores de ajuste para las pruebas.

3.3.1. Medio de extinción y medio aislante

Se especifica que el medio de extinción del arco eléctrico debe ser el vacío o hexafluoruro de azufre (SF₆), el medio aislante solo puede ser SF₆o sólido y dicho aislamiento debe de pasar las pruebas con los valores de distancia de fuga y niveles de contaminación como se muestran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 – Distancias de fuga y niveles de contaminación

Niveles de contaminación	Distancia específica mínima de fuga mm/kVf-f	Concentración de contaminación para porcelana kg/m³	“Tracking” y erosión para material sintético kg/m³
Media	20	14	10
Alta	25	40	7

3.3.2. Control del restaurador

El control del restaurador debe ser micro-procesado, con comunicación externa con el usuario, almacenamiento de eventos de falla y que funcione en tiempo real. Además el control debe contar con funciones de dispositivos ANSI como se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 – Funciones de protección

Función	Descripción
50	Sobrecorriente instantánea
51	Sobrecorriente con retardo
50N	Sobrecorriente de neutro instantáneo
51N	Sobrecorriente de neutro con retardo
79	Re-cierre automático
81	Frecuencia

La frecuencia de operación del dispositivo electrónico inteligente (DEI) se especifica a 48Hz y 62Hz. Debe incluir el registro de eventos como lo es un cambio en el estado de las salidas y las entradas digitales, la activación y desactivación de los elementos de protección control y monitoreo, y generar un reporte de los mismos que contenga la información de fecha y hora del evento. Esto mismo se requiere para el caso de fallas, reteniendo información de la magnitud de la corriente de falla y de las protecciones operadas.

Se requiere que el control también sea capaz de enviar alarmas de las fallas por cada función de protección y que la comunicación sea por medio del protocolo DNP3.0.

3.3.3. Fuente de alimentación

La norma CFE específica que la fuente de alimentación del controlador debe poder realizarlas siguientes tareas:

La Fuente debe tener función de cargador de baterías.

Detectar los niveles de tensión para tomar la decisión de operar con baterías únicamente o restablecer la alimentación de alterna.

Enviar alarmas y generar eventos.

Realizar pruebas de autodiagnóstico.

Mantener el control operando y protegiendo las baterías al mismo tiempo contra una descarga profunda.

4. PRUEBAS DE RUTINA

Para el cumplimiento con las especificaciones de las tres normas tratadas en cuestión de las pruebas de rutina, es necesario tomar el enfoque de la norma más específica y los valores de prueba solicitados más estrictos. La norma que cumple estos criterios es de la CFE.

Llegado a este punto, las pruebas prototipo, ya han validado que el diseño es funcional en cuestión de los requisitos específicos para el restaurador, por lo que ya no es necesario repetir ninguna de estas pruebas. Las pruebas de rutina solicitadas por la norma pueden realizarse al conjunto terminado o a sub-componentes; con objeto de seccionar las pruebas acorde a los componentes del restaurador, estas se resumen en pruebas al control y pruebas a la unidad interruptiva (bancada ensamblada con polos).

Las técnicas de prueba para la tensión aplicada deben estar acorde a las normas NMX-271/1-ANCE “Técnicas de prueba en alta tensión parte 1: Definiciones Generales y Requisitos de Prueba” y NMX-271/2-ANCE “Técnicas de prueba en alta tensión parte 2: Sistemas de Medición”. Para la medición de las descargas parciales, se debe cumplir con la norma IEC 60270-200 “High-Voltage Test Techniques-Partial Discharge Measurements”, ya que no existe una norma nacional para la aplicación de estas pruebas.

4.1. Pruebas al gabinete de control

Las pruebas que aplican, según la normatividad discutida, son:

- a) Calibración.
- b) Pruebas a los accesorios, dispositivos de control y alambrado secundario.

La calibración solo puede verificarse por medio de mandos de operaciones, inyección de tensiones e inyección de corrientes. Las pruebas del inciso b), se

llevan a cabo según la descripción verificando primero los accesorios y/o componentes del control por separado y después probando la lógica del circuito de alambrado.

La forma más eficiente de probar, es verificando la funcionalidad de todo el conjunto del control. La razón por la que no se realiza de esta manera en todos los casos, es debido a errores humanos en el alambrado de estos dispositivos de control. Estos errores pueden causar graves daños a los componentes, en especial, porque la mayoría de los componentes del control (electrónicos) se conectan en corriente directa, en los que una inversión de polaridad puede causar el daño permanente de los mismos, representando mayor costo de fabricación del restaurador.

Los componentes más destacables en un gabinete de control, como se han mencionado antes son:

- a) Fuente.
- b) Relevador de protección (micro-procesado, según CFE).
- c) Unidad de comunicación remota.

Entre estos componentes, el único que conviene probar de manera independiente es la fuente (que realmente no es una fuente, pero alimenta al control a través de fuentes reales, como baterías y VCA de la línea de baja tensión), ya que debido a las funciones que debe realizar, su alambrado es lo suficientemente complicado para requerir de un tiempo considerable, pero sus funciones no son tantas como las del relevador, para requerir de varios equipos para probar su lógica.

La unidad de comunicación remota, solo requiere de cables de alimentación desde la fuente, que por lo general solo son dos(positivo y negativo) y un cable de comunicación, por lo que puede ser probada en el conjunto completo, y en caso de falla, puede ser reemplazada con mucha facilidad.

En la figura 4.1 se muestran los bornes de una “fuente” que es en realidad un cargador de baterías, que cumple con los requisitos de la CFE. De derecha a

izquierda, podemos ver una sección de alimentación en corriente alterna, salidas de tensión en corriente directa y una sección de alarmas.

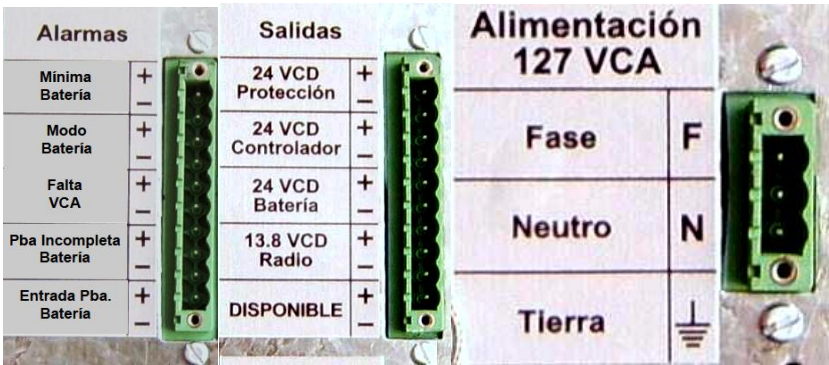


Fig. 4.1 Borne de conexión de un cargador de baterías o "fuente".

Para la prueba de este dispositivo, es necesario primero que se encuentre alimentado por sus dos fuentes reales. Una fuente es la corriente alterna que proviene de la línea baja tensión que se deriva del circuito de distribución y la otra fuente son las baterías que mantienen al control funcionando aún en la ausencia de VCA.

En la figura 4.1, la salida marcada como "24 VCD Bateria" funciona como entrada y como salida a la vez. Es una entrada en ausencia de VCA, ya que debe alimentar el control para mantenerlo en operación, y en presencia de VCA, es una salida para cargar las baterías. Paraprobar esta función; conectar la entrada de VCA, y sin las baterías conectadas, medir el tensión de salida en "24 VCD Bateria" con un voltímetro. El valor medido debe ser igual o mayor (solo ligeramente mayor) que latensión requerida de las baterías, para que estas se carguen. Una vez verificado que existe unatensión en corriente directa de salida, medir las demás salidas, estas deben coincidir con los valores marcados con una tolerancia razonable.

Continuando con la alimentación únicamente de VCA, verificar las alarmas. Lo lógico es que la alarma de "Mínima Bateria" se encuentre activada. La forma de verificarlo, ya que son contactos normalmente cerrados o normalmente abiertos, es, únicamente probar continuidad.

Una vez verificadas las salidas y las alarmas con alimentación de VCA, alimentar con baterías únicamente (VCD) y quitar la corriente alterna. La función debe ser la misma. Las salidas de tensión en corriente directa para todos los dispositivos que se conectan a este, deben tener los valores de tensión marcados y en la prueba de continuidad, lo lógico, sería que las alarmas activas para el cargador de la figura 4.1 con VCD, sean las de “Falta VCA” y “Modo Batería”.

Después se tendría que probar con las dos fuentes conectadas (VCA y VCD), y verificar todas las salidas y alarmas, para estar seguro de que el funcionamiento es correcto.

Posteriormente, verificar que la “fuente”, puede realizar su función de autodiagnóstico y protección de las baterías contra descarga profunda. Para verificar la función de autodiagnóstico, uno tendría que referirse al manual del fabricante, y aunque existen muchas formas de mandar una señal de autodiagnóstico, una forma de señal podría ser a través de un contacto seco o un contacto mojado.

En un contacto mojado, se requiere de una entrada de tensión, misma que podría suplir el relevador cada determinado tiempo o para efectos de simplicidad, vamos a suponer que la prueba de autodiagnóstico, señalizada como “Entrada Pba Batería” requiere una tensión de 24 VCD. En ese caso, podríamos utilizar una de las salidas de 24VCD que entrega la misma “fuente” y conectarla en la entrada de prueba. El diagnóstico lleva tiempo, y por supuesto, este sería una señal al relevador, por lo que tendríamos que esperar y verificar el estado del contacto después del tiempo que debe realizar la “fuente” para su diagnóstico.

La última prueba para la “fuente”, sería la de protección contra la descarga profunda de las baterías. A lo que se refiere este punto, es que la “fuente”, al detectar que la tensión de corriente alterna, no se ha restituido y que las baterías siguen funcionando, esta debe detener sus funciones como “fuente”, evitando que las baterías se drenen por completo y ya no puedan volver a ser cargadas. Para esto, sería necesario sustituir las baterías por una fuente manipulable de tensión e iniciar el cargador únicamente con la entrada de baterías, después bajar la tensión

poco a poco. Si las baterías dan un tensión de 24VCD, vamos a suponer que un nivel de baterías bajo, son 18VCD. Se puede bajar la tensión en la fuente y al llegar a los 18VCD, la fuente debe apagarse, simulando que ha dejado de consumir las baterías para evitar la descarga profunda.

Una vez probada la fuente, se puede agregar este componente al gabinete de control y continuar con una prueba de continuidad del alambrado secundario (alambrado de los componentes). La prueba de alambrado únicamente requiere de saber interpretar la cédula de cableado (especificación de ingeniería) y verificar que las puntas físicamente se conectan en las entradas de los dispositivos marcados.

El objetivo del restaurador se resume en abrir y cerrar contactos, claro que para llegar a esto, el relevador debe configurarse y medir niveles de falla o eventos (lo cual no es sencillo), pero al final, el control solo manda una señal de tensión que abre o cierra contactos. Si no se tiene un dispositivo para abrir y cerrar contactos, se puede sustituir por un simulador con mucha facilidad. En el extremo izquierdo de la figura 4.2 se muestra un simulador con lámparas, su función es tomar la señal de tensión que enviaría el control para abrir y cerrar los contactos de la unidad interruptiva y representar un estado (abierto o cerrado) de los contactos a través de lámparas de señalización.

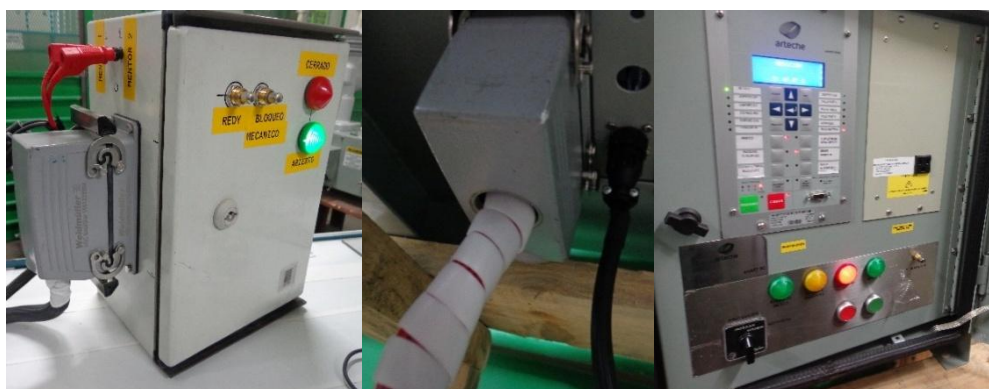


Fig. 4.2 De izquierda a derecha, cuadro de control de un restaurador marca "ARTECHE", conexión del control (alimentación y mandos lógicos), y un simulador del estado de los contactos de la unidad interruptiva.

Por la parte inferior del cuadro de control que se muestra en la imagen intermedia de la figura 4.2, se pueden ver dos conexiones, una es la alimentación de

corriente alterna (cable negro) y el otro conector, conduce las señales lógicas del control a la unidad interruptiva, por lo que su terminal se conecta en la entrada del simulador del extremo izquierdo de esta misma figura.

Para verificar que el control puede enviar señales a la unidad interruptiva, también se necesitaría un dispositivo para la inyección de tensiones y corrientes. Un buen dispositivo es un “Mentor”, aunque es un dispositivo caro, este puede ser programable, facilitando las secuencias de prueba.

Recordemos que la unidad de control, no detecta los niveles de falla reales, sino que estos son disminuidos por los transformadores de corriente y potencial de los polos de corte de la unidad interruptiva. Únicamente se tiene que inyectar las corrientes y tensiones nominales de la unidad de control y sus niveles de falla para verificar funcionalidad. Lo primero sería comunicar con la unidad de control a través de una computadora personal con el software del control instalado.

Inyectar al control los niveles de corriente y tensión nominales para este y ver su medición en el software como se muestra en la figuras 4.3y en el display del cuadro de control, estos deben ser prácticamente los mismos en cada una de las fases. Al mismo tiempo, se pueden distinguir los ángulos de cada fase para verificar que no existen errores de conexión (inversión).

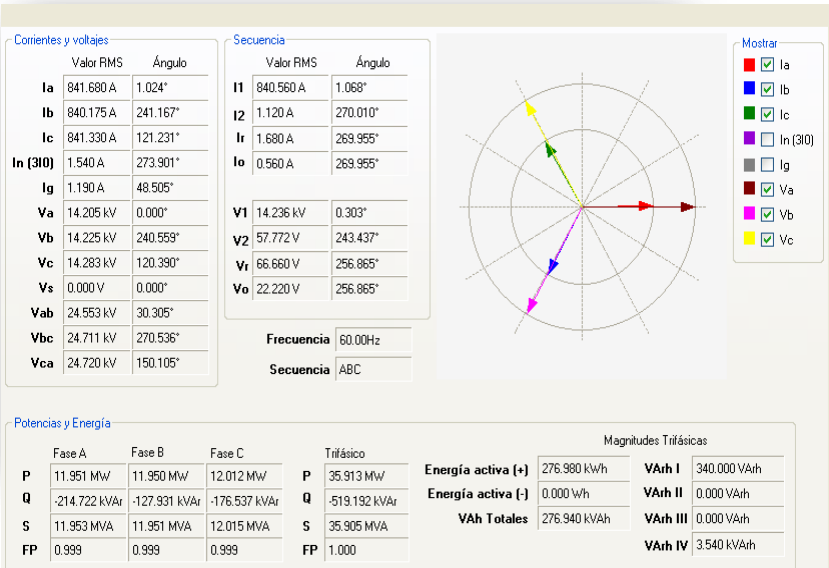


Fig. 4.3, Ángulos de fase de corriente y tensión que leen algunos relevadores micro-procesados, la representación de cada uno depende de los fabricantes.

En el control deben existir dos modos de mando, uno es de manera local, para el cual únicamente los comandos locales pueden ser utilizados (por seguridad) y un mando remoto, para el cual funciona la protección y por supuesto, los comandos que recibe de manera remota a través de la unidad supervisora o por SMS cuando se utilizan otros medios de mando.

Iniciando con los mandos de manera remota, quitar latensión, esto debe generar que la unidad interruptiva opere, abriendo el interruptor (el simulador únicamente prende la lámpara de circuito abierto). Posteriormente, inyectar las tensiones de cada fase, lo lógico es que se mande la señal de cerrar.

Ingresar las corrientes de falla que debe leer el control (sobrecorriente), estas se pueden programar para cada uno de los modos de falla que debe detectar el control acorde a lo solicitado por las normas, por lo que no tiene caso repetir cada uno, lo único que debe hacer el simulador es cambiar el estado de los contactos en la secuencia de abierto y cerrado para cada simulación de falla detectada. Si se simula una falla transitoria el restaurador debe restablecer el circuito (cerrar los contactos) y continuar operando. Si se agotan los intentos de restablecimiento y se simula que los niveles de falla perduran, el restaurador operará de manera definitiva, bloqueando el recierre y teniendo que resetear la unidad interruptiva (o simulador) para que se puedan continuar las pruebas.

Lo mismo que con la corriente, se debe probar con las tensiones. Los restauradores pueden detectar los niveles de sobretensión y baja-tensión y por lo tanto es crucial asegurarse de la operación correcta de la unidad interruptiva.

Para el caso de inversión del ángulo de fase o falla de una sola fase, lo más simple es bajar o subir la tensión de una sola fase a un nivel que no acepte el control. El control mandará una señal a la unidad interruptiva. De igual manera, probar el caso de falla transitoria y falla permanente.

Mientras que se realizan las pruebas de falla del control, también se debe verificar que las señales como disparo instantáneo, disparo de tiempo, disparo instantáneo

por neutro, y todos los modos de operación del relevador son registrados y se señalizan en la unidad de control y en el software.

Para finalizar con el control, únicamente es necesario probar la comunicación de manera remota a través de los modos aceptables del control. Uno de los protocolos de comunicación demandados por la normatividad de CFE es el protocolo DNP3. La comunicación puede ser alámbrica o inalámbrica, por un cable de Ethernet u otro medio aceptable según el modelo del relevador y por radios o módems GPRS. Por supuesto que el fin de la comunicación remota, es supervisar la red eléctrica y dar los mismos mandos de apertura y cierre de la unidad, por lo que basta con operar los contactos desde el ordenador y asegurarse del cambio de estado y señales del relevador.

4.2. Pruebas a la unidad interruptiva

Las pruebas de rutina a la unidad interruptiva se realizan para probar el aislamiento e incluyen pruebas como la tensión de aguante, la prueba de descargas parciales y pruebas de operaciones mecánicas. Estas pruebas se realizan en base a las normas mencionadas en este documento, “IEC-62271-111”, “NMX-J-517-ANCE” y “CFE-VH-00011”.

La prueba de tensión de aguante y descargas parciales, deben incluir la corrección de la altitud de operación en caso de estar a más de 1000m sobre el nivel del mar. Debido a que este documento se escribe para la B.U.A.P. en la ciudad de Puebla, aplica la corrección del factor de altitud.

- a) Para los restauradores de 15kV, con los polos de corte en posición cerrado, se aplicará una tensión de aguante del aislamiento a 60 Hz en seco de 42.12kV con una duración de 1 minuto. Para la posición de los polos en abierto, la tensión debe ser de 50 kV.
- b) Para los restauradores de 27kV, con los polos de corte en posición cerrado, se aplicará una tensión de aguante del aislamiento a 60 Hz en

seco de 50.54kV con una duración de 1 minuto. Para la posición de los polos en abierto, la tensión debe ser de 60kV.

- c) Para los restauradores de 38kV, con los polos de corte en posición cerrado, se aplicará una tensión de aguante del aislamiento a 60 Hz en seco de 58.97kV con una duración de 1 minuto. Para la posición de los polos en abierto, la tensión debe ser de 70kV.

Para la aplicación de la tensión se requiere de un equipo de aplicación de alta tensión (Hi-Pot), que consta de un regulador de tensión y un transformador de alta tensión.

La primera prueba de tensión de aguante se realiza con los polos de corte cerrados, aplicando la tensión a la fase central (fase B) del lado carga, con las tres fases cortocircuitadas (tensión en todas las fases) y la bancada aterrizada como se muestra en la figura 4.4 en el extremo izquierdo.

La segunda prueba de tensión de aguante, se realiza con los polos de corte cerrados, aplicando la tensión a la fase central (fase B) del lado carga, con las fases A, C, y bancada aterrizada como se muestra en la figura 4.4 en el extremo derecho.

La tercera prueba de tensión de aguante, se realiza con los polos de corte en posición abierto cortocircuitando la tensión en el lado carga, el lado fuente, y la bancada deben estar aterrizados, como se muestra en la figura 4.5 extremo izquierdo.

La cuarta prueba de tensión de aguante, se realiza de igual manera, con los polos abiertos, aplicando la tensión a la fase central del lado fuente con las demás fases del lado fuente cortocircuitadas y con todas las fases del lado carga y la bancada aterrizada.

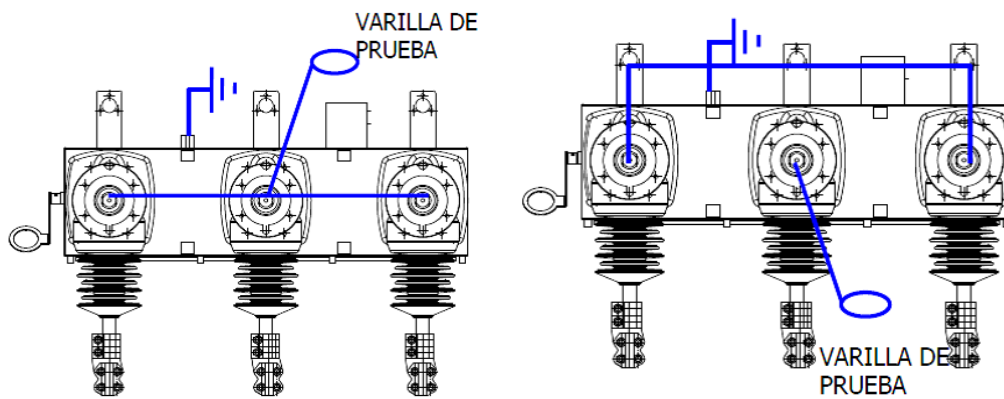


Fig. 4.4, Vista superior de un restaurador al que se le aplica la prueba de tensión de aguante con los polos de corte en posición cerrada.

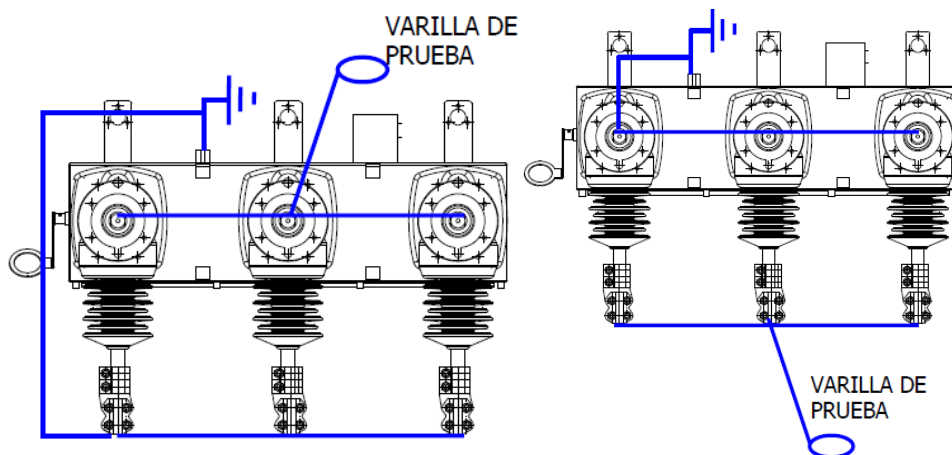


Fig. 4.5, Vista superior de un restaurador al que se le aplica la prueba de tensión de aguante con lado fuente o lado carga cortocircuitados, con posición de los polos de corte abierto,

La quinta prueba de tensión de aguante, se realiza con los polos de corte en posición abiertos, solamente se aplica la tensión a la fase B del lado carga, las fases A y C del lado carga, las tres fases del lado fuente, y la bancada se conectan a tierra como se muestra en la figura 4.6 en el extremo izquierdo.

La última prueba de tensión de aguante se realiza con los polos de corte en posición abierto, la tensión de prueba se aplica a la fase B del lado fuente, con las fases A y C del lado fuente, las tres fases del lado carga, y la bancada aterrizadas como se muestra en la figura 4.6 en el extremo derecho.

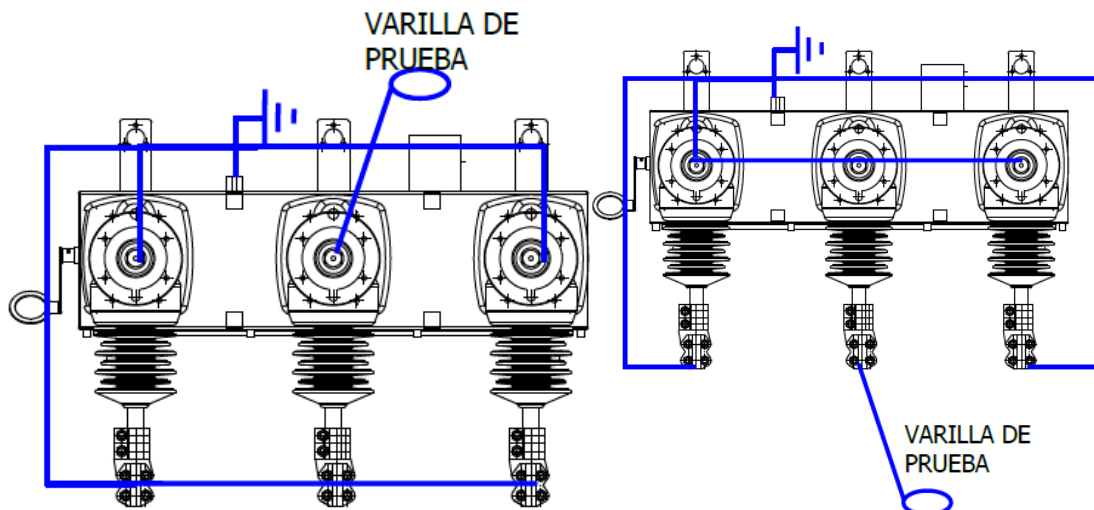


Fig. 4.6, Vista superior de un restaurador al que se le aplica la prueba de tensión de aguante únicamente a la fase central, con posición de los polos de corte abierto.

La siguiente prueba a la unidad interruptiva, prueba la resistencia del circuito principal de la unidad.

Para la realización de esta prueba se requiere de un microhmetro con capacidad de inyección de corriente directa de hasta 100A como mínimo, o en su defecto una fuente de corriente alterna con un puente rectificador de características similares y un multímetro o voltmetro digital o analógico de corriente directa.

Estando el restaurador cerrado y utilizando el microhmetro adecuado, conectar el microhmetro a la fase A del polo de corte conforme al diagrama de conexión de la figura 4.7. Seguir las instrucciones de prueba indicadas en el manual del microhmetro para realizar la prueba. Aplicar una corriente de 100A de corriente directa y leer el valor de la resistencia indicado en la pantalla del microhmetro. Seguir con el mismo procedimiento para los polos de la fase B y fase C. Los valores de las resistencias de contacto según especificación NMX-J-517-ANCE deben ser menor al 200% del valor medido antes de la prueba de la secuencia de prueba.

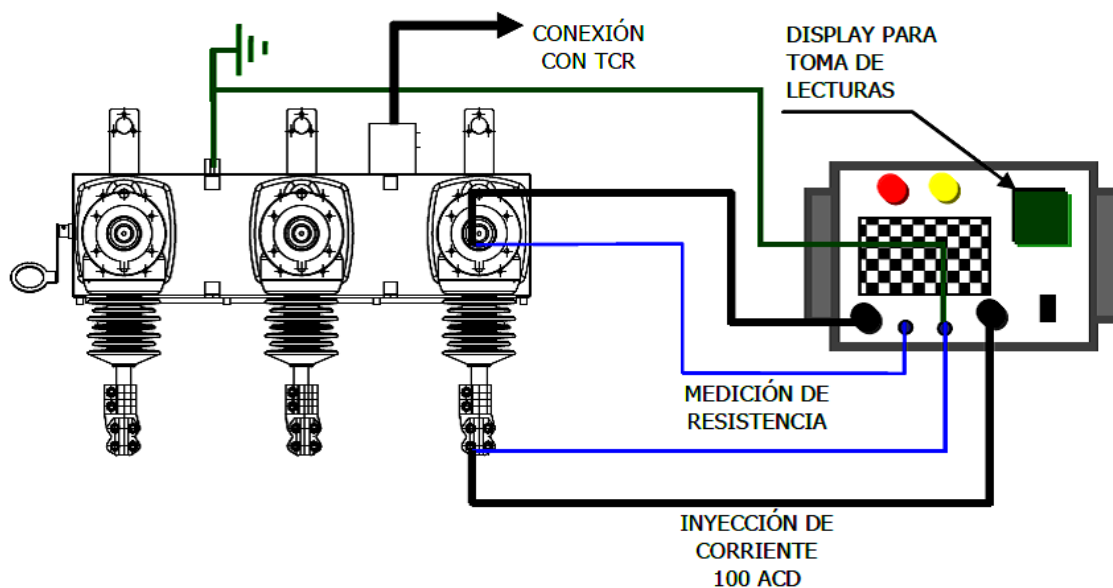


Fig. 4.7, Vista superior de un restaurador al que se le aplica la prueba de medición de resistencia.

Las siguientes pruebas, son las pruebas de descargas parciales, las cuales prueban la calidad del medio aislante, asegurando que no existe fuga en este medio, debidas a una incorrecta formación durante el proceso de moldeo. La prueba se realiza de forma similar a la prueba de tensión de aguante, con la única variante de que la tensión se manda por pulsos.

Para realizar esta prueba, se requiere primero de elevar la tensión de prueba a frecuencia nominal durante 10 segundos, después bajar la tensión, dividiendo esta tensión entre la raíz de tres por 1.05. Para todos los casos, las descargas deben ser menores a 10pC (pico-Coulombs).

La primera prueba de aplicación de descargas parciales se realiza aplicando tensión en la fase A del lado carga, con los polos en posición cerrados, aterrizando las fases B y C del lado carga, lado fuente y así como la bancada, como se muestra en la figura 4.8.

La segunda prueba de aplicación de descargas parciales se realiza aplicando tensión en la fase B del lado carga, con los polos en posición cerrados, aterrizando la fases A y C del lado fuente únicamente, así como la bancada.

La tercera prueba de aplicación de descargas parciales se realiza aplicando tensión en la fase C del lado carga, con los polos en posición cerrados, aterrizando las fases B y C del lado carga, lado fuente y la bancada.

Las tres primeras pruebas, se ejemplifican en las figura 4.8, comenzando con la primera prueba en el extremo izquierdo y terminando la tercera en el extremo derecho.

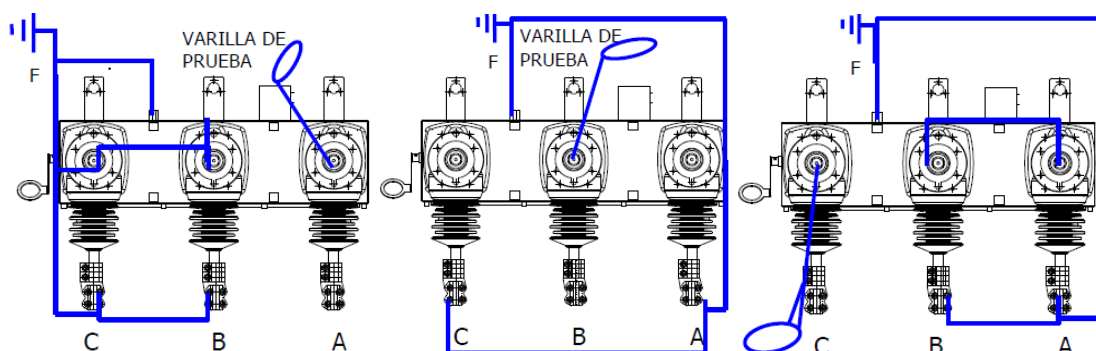


Fig. 4.8, Vista superior de un restaurador al que se le aplica la prueba de medición de descargas parciales con los polos en posición cerrado.

La cuarta prueba de aplicación de descargas parciales se realiza aplicando la tensión en la fase A del lado fuente, con los polos en posición abierto, y aterrizando la fase A lado carga, las fases B y C lado carga y lado fuente y la bancada.

La quinta prueba de descargas parciales se realiza aplicando la tensión en la fase B del lado fuente, con los polos en posición abierto, y aterrizando la fase B lado carga, las fases A y C, lado carga y lado fuente y la bancada.

La sexta prueba de descarga parciales se realiza aplicando la tensión en la fase C del lado fuente, con los polos en posición abierto y aterrizando la fase C lado carga, las fases B y A, lado carga y lado fuente y la bancada.

Las pruebas desde la cuarta a la sexta se ejemplifican en la figura 4.9, siendo el extremo izquierdo de la figura la cuarta prueba y la del extremo derecho la sexta.

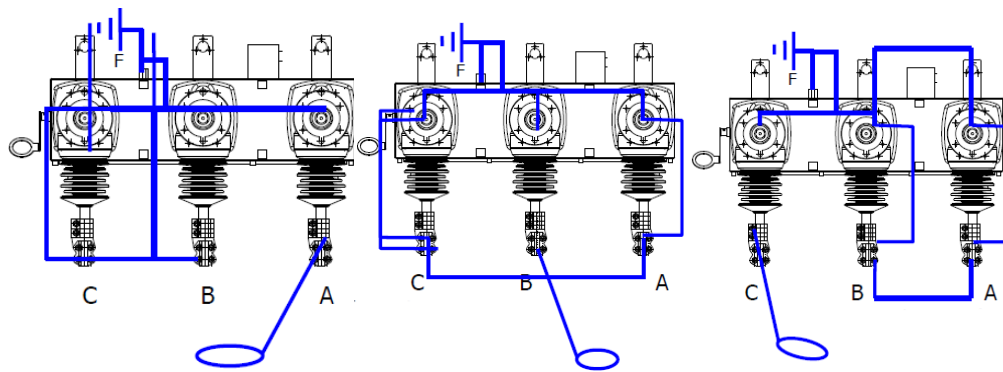


Fig. 4.9, Vista superior de un restaurador al que se le aplica la prueba de medición de descargas parciales en el lado fuente, con los polos en posición abierto.

La séptima prueba de descargas parciales se realiza aplicando la tensión en la fase A del lado carga, con los polos en posición abierto, aterrizando la fase A del lado fuente, las B y C, del lado carga y lado fuente, y la bancada.

La octava prueba de descargas parciales se realiza aplicando la tensión en la fase B del lado carga, con los polos en posición abierto, aterrizando la fase B del lado fuente, las fases A y C del lado carga y lado fuente y la bancada.

La novena y última medición de descargas parciales se realiza a la fase C del lado carga, con los polos en posición abiertos, aterrizando la fase C del lado fuente, las fases A y B del lado fuente y lado carga y la bancada.

Estas tres últimas pruebas se ejemplifican en la figura 4.10, siendo la séptima la del extremo izquierdo y la novena la del extremo derecho.

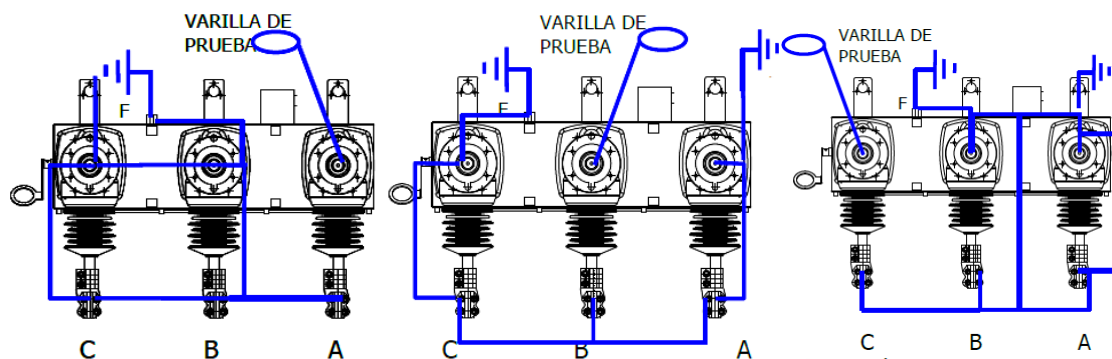


Fig. 4.10, Vista superior de un restaurador al que se le aplica la prueba de medición de descargas parciales en el lado carga, con los polos en posición abierto.

Las siguiente prueba, se realizan conectando el gabinete de control y se confirma que la unidad interruptiva realice 50 operaciones de apertura y cierre.

Por ultimo, la unidad interruptiva debe ser sometida a la prueba de hermeticidad, que es una simulación de lluvia durante una hora. Despues de esta simulación, si la unidad no contiene agua en el interior de la bancada, se confirma que la unidad ha pasado todas las pruebas requeridas.

4.3. Dossier (compendio) de calidad

Una vez que se han pasado todas las pruebas de control de calidad, se puede decir que el restaurador cumple con los requisitos necesarios del cliente final. Las pruebas de rutina se realizan en presencia del cliente final o por alguna tercería si es un requisito del cliente. Para el caso de CFE, este cuenta con su propio servicio de inspección del LAPEM, quien verifica en fábrica que se efectúen las pruebas de rutina.

Por supuesto, lo primero que se revisa, es que el certificado de pruebas prototipo al restaurador se encuentre vigente. Posteriormente, el inspector de LAPEM, necesitará lo siguiente:

- a) Copia del contrato de CFE.
- b) Copia de los planos prototipo aprobados.
- c) Constancia de proveedor confiable CFE (emitida por LAPEM).
- d) El reporte (resultado) de las pruebas de rutina al restaurador.
- e) Reportes de las pruebas de rutina de los componentes críticos.
- f) Certificado de calibración de los equipos de medición utilizados.

Todo esto se guarda en una carpeta y se le llama dossier de calidad, la cual evidencia la calidad del producto, asegurando que este será funcional a la hora de instalarlo en la red de distribución contribuyendo a un mejor servicio.

Bibliografía

- [1] M. S. S. T. J. O. J. Duncan Glover, Power System Analysis & Design, CENGAGE Learning, 2011.
- [2] S. R. Castaño, Redes de Distribución de Energía, Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2004.
- [3] E. J. H. Juan M. Gers, Protection of Electricity Distribution Networks, Londres, Inglaterra: Institution of Engineering and Technology, 2004.
- [4] M. F. Gaylord, "RM REPS Co.," 2007. [Online]. Available: <http://rmreps.com/html/reclosers.html>. [Accessed 17 Septiembre 2013].
- [5] D. N. V. Badri Ram, Power System Protection and Switchgear, New Dhelil: Tata McGraw-Hill, 1995.
- [6] Q. S. R. E. James, Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment, Reino Unido: Institute of Engineering Technology, 2008.
- [7] P. G. Slade, The Vacuum Interrupter Theory, Design, and Application, Florida: CRC Press, 2008.
- [8] ABB,
"http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/8d9d3dfebccb2ba4c2256c780052e37f/\$file/abb-sensores%20de%20corriente%20y%20tensi%C3%B3n.pdf,"
[Online]. Available: <http://www.abb.com/abblibrary/downloadcenter>. [Accessed 17 Septiembre 2013].
- [9] R. Bosh, Manual de la Técnica del Automóvil, Düsseldorf, Alemania: Reverte, 1996.
- [1] YUASABATTERIES, "YUASABATTERIES," 2009. [Online]. Available:
0] <http://www.yuasabatteries.com/>. [Accessed 9 Octubre 2013].
- [1] V. Gurevich, Digital Protective Relays Problems and Solutions, Florida, USA: Taylor
1] & Francis Group, 2011.
- [1] C. Werstiuk, The Relay Testing Handbook, California, USA: Valence Electrical
2] Training Services LLC, 2012.
- [1] ARTECHE, "www.artech.com," [Online]. Available: www.artech.com. [Accessed
3] 19 Octubre 2013].
- [1] NMX-J-517-ANCE, *Restauradores para sistemas de corriente alterna de 15kV hasta*
4] *38kV – Especificaciones y métodos de prueba*, Asociación de Normalización y
Certificación (ANCE), 2006.

- [1 IEC-62271-111, *High-Voltage switchgear and controlgear - Part 111: Automatic*
5] *circuit reclosers and fault interrupters for alternating current systems up to 38kV*,
International Electrotechnical Commision (IEC), Ed. 2, 2012.
- [1 VH-00011, *Restauradores*, Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2007.
6]
- [1 IEC-60270-200, *High-Voltage test techniques – Partial discharge measurments*,
7] International Electrotechnical Commision (IEC).
- [1 NMX-271/1-ANCE, *Técnicas de prueba en alta tensión parte 1: Definiciones*
8] *Generales y Requisitos de Prueba*, Asociación de Normalización y Certificación
(ANCE).
- [1 NMX-271/2-ANCE, *Técnicas de prueba en alta tensión parte 2: Sistemas de*
9] *Medición*, Asociación de Normalización y Certificación (ANCE).