

**PROTECCIÓN DE FALLAS EN RECONECTADORES DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE LAS EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN
E.S.P.**

**EDISON ANDRÉS RESTREPO PÉREZ
DAYAN DAVID ARROYO LÓPEZ
SANDRA ELIZABETH LOTERO CASTILLO**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2013**

**PROTECCIÓN DE FALLAS EN RECONECTADORES DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA DE LAS EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN
E.S.P.**

**EDISON ANDRÉS RESTREPO PÉREZ
DAYAN DAVID ARROYO LÓPEZ
SANDRA ELIZABETH LOTERO CASTILLO**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Electricista**

**Asesor
JAIR VÉLEZ
Ingeniero Electricista, Especialista**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2013**

Nota de Aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Medellín, 22 de Noviembre de 2013

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
2. JUSTIFICACIÓN	15
3. OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GENERAL	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4. REFERENTES TEÓRICOS	17
4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS RECONECTADORES	17
4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RECONECTADORES	17
4.2.1 RECONECTADORES HIDRÁULICOS	17
4.2.2 RECONECTADORES ELECTRÓNICOS	18
4.2.3 RECONECTADORES MICROPROCESADOS	18
4.3 RECONECTADORES UTILIZADOS EN EPM	19
4.4 ESTADO ACTUAL DE LOS RECONECTADORES INSTALADOS EN EPM	22
4.4.1 FALLAS PRESENTADAS EN RECONECTADORES DE EPM	25
4.4.2 FALLAS DETECTADAS	32
4.4.2.1 MÓDULO UPS EN CONTROL PARA RECONECTADOR ENTEC	32
4.4.2.2 POLO CENTRAL EN RECONECTADOR TRIFÁSICO MARCA NULEC	33
4.4.2.3 RECONECTADOR MONOFÁSICO MARCA JOSLYN	34
4.4.2.4 TARJETA MAINBOARD EN CONTROL PARA RECONECTADOR JOSLYN	35
4.5 RECOMENDACIONES DE LOS FABRICANTES PARA INSTALACIÓN DE RECONECTADORES	36
4.5.1 INSTALACIÓN DE RECONECTADORES MARCA ENTEC	36
4.5.2 INSTALACIÓN DE RECONECTADORES MARCA COOPER	37
4.5.3 INSTALACIÓN DE RECONECTADORES MARCA NOJA POWER	39
4.5.4 INSTALACIÓN DE RECONECTADORES MARCA JOSLYN	40
4.5.5 INSTALACIÓN DE RECONECTADORES MARCA NULEC	40
4.6 VIDA ÚTIL DE LOS RECONECTADORES	44
4.7 SOBRETENSIONES	45
4.7.1 DESCARGAS DE RAYOS	45
4.7.1.1 CAÍDA DIRECTA	45
4.7.1.2 CAÍDA INDIRECTA	45
4.7.2 CONMUTACIONES DE EQUIPOS ELÉCTRICOS	46
4.7.3 DESCARGAS ELECTROSTÁTICAS	47

5. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO	48
6. METODOLOGÍA	49
7. RESULTADOS	51
7.1 CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA INSTALACIÓN DE LA PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES	51
7.1.1 INSTALACIÓN DE DPS	51
7.1.2 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	52
7.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES	55
7.2.1 DPS PARA MEDIA TENSIÓN (13.2 KV Y 44 KV)	55
7.2.2 DPS PARA BAJA TENSIÓN (240 V Y 120 V)	57
7.2.3 DPS PARA PROTECCIÓN DE SOBRETENSIONES DE DATOS (ETHERNET)	57
7.3 ESQUEMA DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES	58
8. CONCLUSIONES	59
BIBLIOGRAFÍA	60
CIBERGRAFÍA	62

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Características de los reconectores de EPM a 13.2 kV	20
Tabla 2. Características de los reconectores de EPM a 44 kV	21
Tabla 3. Cantidad de reconectores fallados por controles marca ENTEC	25
Tabla 4. Cantidad de reconectores fallados por controles marca NULEC Tipo PTCC	26
Tabla 5. Cantidad de reconectores fallados por controles marca Joslyn	27
Tabla 6. Cantidad de reconectores fallados por controles marca Cooper	28
Tabla 7. Cantidad de reconectores fallados por control marca Cooper Tipo Nova 15 monofásicos	29
Tabla 8. Cantidad de reconectores fallados por controles marca Noja Power	29
Tabla 9. Cantidad de reconectores fallados por potencia marca Nulec tipo U27	29
Tabla 10. Cantidad de reconectores fallados por potencia marca Noja Power	30
Tabla 11. Cantidad de reconectores fallados por potencia marca Cooper	30
Tabla 12. Cantidad de reconectores fallados por potencia marca Joslyn	31
Tabla 13. Principales recomendaciones de los fabricantes	43
Tabla 14. Condiciones técnicas de las normas EPM antes y después del planteamiento de este proyecto.	54

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Valores de puesta a tierra Norte Metropolitano	22
Gráfica 2. Valores de puesta a tierra Norte Bajo Cauca	23
Gráfica 3. Valores de puesta a tierra Norte Urabá	23
Gráfica 4. Valores de puesta a tierra Centro Metropolitano	23
Gráfica 5. Valores de puesta a tierra Sur Oriente	24
Gráfica 6. Valores de puesta a tierra Sur Oeste	24
Gráfica 7. Cantidad de reconectores instalados	31
Gráfica 8. Relación de reconectores fallados	32
Gráfica 9. Comparación del frente de onda 10/350 μ s con el frente de onda 8/20 μ s	46
Gráfica 10. Curva de probabilidad acumulada de corriente de retorno negativa, comparativa entre países ubicados en zonas templadas (CIGRE) y ubicados en zonas tropicales	56

LISTA DE FOTOS

	pág.
Foto 1. Módulo UPS reconectador ENTEC fallado	33
Foto 2. Reconectador trifásico marca NULEC de Schneider Electric fallado	34
Foto 3. Reconectador monofásico marca JOSLYN fallado	35
Foto 4. Tarjeta Main Board para control Joslyn 351J fallada	35

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Instalación recomendada por el fabricante para reconectador marca ENTEC	37
Ilustración 2. Instalación recomendada por el fabricante para reconectador marca COOPER	38
Ilustración 3. Instalación recomendada por el fabricante para reconectador marca Noja Power	39
Ilustración 4. Instalación recomendada por el fabricante para reconectador marca JOSLYN	40
Ilustración 5. Instalación recomendada por el fabricante para reconectador marca NULEC, general para todas las instalaciones	41
Ilustración 6. Instalación recomendada por el fabricante para reconectador marca NULEC con transformador de alimentación auxiliar	42
Ilustración 7. Diagrama de flujo del proceso de protección contra sobretensiones	49
Ilustración 8. Instalación recomendada de los DPS	52
Ilustración 9. Esquema de protección seleccionado	58

GLOSARIO

AISLADOR: elemento de mínima conductividad eléctrica, diseñado de tal forma que permita dar soporte rígido o flexible a conductores o a equipos eléctricos y aislarlos eléctricamente de otros conductores o de tierra.

AISLANTE ELÉCTRICO: material de baja conductividad eléctrica que puede ser tomado como no conductor o aislador.

BIL: nivel básico de aislamiento ante impulsos tipo rayo.

CONDUCTOR A TIERRA: también llamado conductor del electrodo de puesta a tierra, es aquel que conecta un sistema o circuito eléctrico intencionalmente a una puesta a tierra.

DESCARGA DISRUPTIVA: falla de un aislamiento bajo un esfuerzo eléctrico por superarse un nivel de tensión determinado que hace circular una corriente. Se aplica al rompimiento del dieléctrico en sólidos, líquidos o gases y a la combinación de estos.

DPS: dispositivo diseñado para limitar las sobretensiones transitorias y conducir las corrientes de impulso. Poseen elementos no lineales que permiten pasar de una impedancia muy elevada a una impedancia muy baja en presencia de una sobretensión, descargando la corriente a tierra.

ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA: es el conductor o conjunto de conductores enterrados que sirven para establecer una conexión con el suelo.

ENSAYO: conjunto de pruebas y controles a los cuales se somete un bien para asegurarse que cumple normas y pueda desempeñar la función requerida.

EQUIPOTENCIALIZAR: el proceso, práctica o acción de conectar partes conductivas de las instalaciones, equipos o sistemas entre sí a un sistema de puesta a tierra, mediante una baja impedancia, para que la diferencia de potencial sea mínima entre los puntos interconectados.

FALLA: degradación de componentes. Alteración intencional o fortuita de la capacidad de un sistema, componente o persona, para cumplir una función requerida.

MANIOBRA: conjunto de procedimientos tendientes a operar una red eléctrica en forma segura.

POTENCIAS: parte del reconectador donde se encuentra el mecanismo de apertura y cierre, la botella de vacío y los aisladores con sus respectivos conectores.

PUESTA A TIERRA: grupo de elementos conductores equipotenciales, en contacto eléctrico con el suelo o una masa metálica de referencia común, que distribuye las corrientes eléctricas de falla en el suelo o en la masa. Comprende electrodos, conexiones y cables enterrados.

RAYO: fenómeno físico que se caracteriza por una transferencia de carga eléctrica de una nube hacia la tierra, de la tierra hacia la nube, entre dos nubes, al interior de una nube o de la nube hacia la ionosfera.

RED DE DISTRIBUCIÓN: conjunto de circuitos y subestaciones con sus equipos asociados, destinados al servicio de los usuarios de un municipio.

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA: es la relación entre el potencial del sistema de puesta a tierra a medir, respecto a una tierra remota y la corriente que fluye entre estos puntos. La unidad de medida es el ohmio (Ω).

SISTEMA DE PUESTA A TIERRA: conjunto de elementos conductores continuos de un sistema eléctrico específico, sin interrupciones, que conectan los equipos eléctricos con el terreno o una masa metálica. Comprende la puesta a tierra y la red equipotencial de cables que normalmente no conducen corriente.

SOBRETENSIÓN: tensión anormal existente entre dos puntos de una instalación eléctrica, superior a la tensión máxima de operación normal de un dispositivo, equipo o sistema.

SOBRETENSIÓN PERMANENTE: aumento de tensión superior al 10 por ciento de la tensión nominal y de duración indeterminada, generalmente debido a la descompensación de las fases.

SOBRETENSIÓN TRANSITORIA: los picos de tensión que pueden alcanzar valores de decenas de kilovoltios y una duración del orden de microsegundos. Pueden ser originados por el impacto de un rayo o fenómenos atmosféricos o por conmutaciones en la red.

TENSIÓN: la diferencia de potencial eléctrico entre dos conductores, que hace que fluyan electrones por una resistencia. Tensión es una magnitud, cuya unidad es el voltio (V).

TENSIÓN A TIERRA: para circuitos puestos a tierra, la tensión entre un conductor dado y el conductor del circuito puesto a tierra o a la puesta a tierra; para circuitos no puestos a tierra, la mayor tensión entre un conductor dado y algún otro conductor del circuito.

TENSIÓN DE CONTACTO: diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de un metro.

TENSIÓN DE SERVICIO: valor de tensión, bajo condiciones normales, en un instante dado y en un nodo del sistema. Puede ser estimado, esperado o medido.

TENSIÓN MÁXIMA DE UN SISTEMA: valor de tensión máxima en un punto de un sistema eléctrico, durante un tiempo, bajo condiciones de operación normal.

TENSIÓN NOMINAL: valor convencional de la tensión con el cual se designa un sistema, instalación o equipo y para el que ha sido previsto su funcionamiento y aislamiento. Para el caso de sistemas trifásicos, se considera como tal la tensión entre fases.

TENSIÓN DE PASO: diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre dos puntos de la superficie del terreno, separados por una distancia de un paso.

VIDA ÚTIL: tiempo durante el cual un bien cumple la función para la que fue concebido.

INTRODUCCIÓN

Empresas Públicas de Medellín E.S.P. posee en la actualidad un sistema de distribución de energía de gran magnitud, con el cual se atiende las zonas rurales y urbanas de los 125 municipios del departamento de Antioquia, además los municipios Riosucio, Carmen del Darién, Murindó y Vigía del Fuerte del departamento del Chocó y Los Córdoba del departamento de Córdoba.

En el sistema de distribución de EPM se utilizan reconectores en las zonas donde la incidencia de fallas en los circuitos es frecuente, ya que estos equipos pueden despejar fallas en una de las operaciones de recierre y evita que el interruptor principal del circuito actúe, minimizando así la cantidad de usuarios afectados ante una falla.

El número actual de reconectores instalados en el sistema de distribución es de aproximadamente 586 equipos, los cuales son atendidos por mantenimiento preventivo o correctivo en el Equipo Gestión Técnica adscrito al Área Ingeniería Distribución, ubicado en la Calle 30 N° 65-315 de la ciudad de Medellín.

En la actualidad el número de fallas presentadas por sobretensiones está en aumento, esto es debido a que no se tienen definidas las características y los esquemas de protección adecuados. Para el año 2013 se proyecta incrementar el número de reconectores instalados en 252 unidades para dar cumplimiento con la resolución CREG 043 de 2010, por lo cual es necesario detallar y/o definir los esquemas de protección para sobretensiones con el objeto de proteger los equipos.

Teniendo en cuenta el costo de un reconector nuevo, el cual es de aproximadamente \$21'000.000 y tomando el costo del repuesto más económico para su reparación, el cual es de \$2'441.000 más la mano de obra, es necesario establecer una metodología adecuada para la instalación y mantenimiento de los equipos que ayude a reducir las reparaciones efectuadas durante la vida útil del equipo, disminuyendo así los costos adicionales por mantenimiento donde en el primer semestre del año 2013 se invirtieron \$124.491.000 aproximadamente.

El proyecto se enmarca en las siguientes normas: “Requisitos para reconectores automáticos de circuito aéreos, montaje tipo pedestal, de bóveda seca y sumergibles e interruptores de falla para sistemas de corriente alterna hasta de 38 kV” referenciada como NTC 5426 y la Guía para la instalación, operación y mantenimiento de reconectores automáticos de circuito referenciada como ANSI/IEEE C37.61 1973. Estas normas definen los criterios mínimos para la realización de ensayos eléctricos a reconectores, los cuales son utilizados para el despeje de fallas eléctricas en las redes de distribución de EPM.

1. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Empresas Públicas de Medellín tiene al 01 de Junio de 2013 en el Equipo Gestión Técnica 205 reconectores fallados, de los cuales el 17% son hidráulicos y 83% microprocesados y operan en tensiones nominales de 13.2 kV y 7.62kV. En las revisiones técnicas se ha detectado que cerca al 25% de los equipos presentan fallas en la fuente de alimentación, en la Main Board o CPU y en la tarjeta de comunicaciones, el 75% restante presentan fallas por mala operación del personal, vandalismo y por obsolescencia tecnológica.

En el año 2012 se repararon 213 equipos, de los cuales cerca del 30% de las fallas fueron causadas por sobretensiones.

Actualmente EPM no cuenta con un esquema detallado de protección contra sobretensiones para los reconectores que incluya dispositivos óptimos como DPS y sistemas puesta a tierra apropiados que garanticen un adecuado aterrizamiento de los equipos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario analizar, proponer y definir un esquema de protección donde se indiquen los valores mínimos de puesta a tierra requeridos para la instalación de los reconectores, los tipos de dispositivos a utilizar contra sobretensiones y las especificaciones técnicas de los elementos, además de definir los esquemas de equipotencialización con el fin de reducir los índices de falla.

2. JUSTIFICACIÓN

El análisis y especificación de las protecciones contra sobretensiones para reconectadores ayudará a reducir notablemente las fallas eléctricas y electrónicas presentadas en estos equipos, además aumentará notablemente su vida útil, mejorará la calidad en el servicio y se reducirán los tiempos de suspensión para realizar el cambio de los equipos fallados.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un esquema de protecciones para sobretensión y especificación de los elementos de protección para reconectores utilizados en las redes de distribución de las Empresas Públicas de Medellín E.S.P.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar mediciones de resistencia de puesta a tierra de los equipos instalados en subestaciones y redes de distribución de varias regiones de Antioquia.
- Realizar un histograma con el registro de fallas presentadas en los reconectores durante el primer semestre del año 2013, clasificándolos por tipo de falla, marca y tipo de reconector.
- Evaluar las posibles causas de falla y tomar las acciones preventivas.
- Revisar las recomendaciones de los fabricantes y establecer los criterios técnicos de protección contra sobretensiones.
- Realizar una simulación de falla para verificar que las protecciones seleccionadas actúen correctamente.
- Determinar el valor máximo de puesta a tierra permitido para el aterrizamiento de los reconectores.
- Definir las características de los elementos de protección de acuerdo a las condiciones ambientales de la zona de localización, la resistencia de puesta a tierra y el tipo de apantallamiento del circuito.
- Modificar las normas RA2-008 y RA3-008 de las Empresas Públicas de Medellín para la instalación de reconectores en las redes eléctricas de acuerdo a los resultados obtenidos.

4. REFERENTES TEÓRICOS

4.1 DESCRIPCIÓN DE LOS RECONECTADORES

Los reconectadores son dispositivos interruptores de falla, automáticos capaz de detectar sobrecorrientes, interrumpirlas y recerrar un número de veces predeterminados. Ante fallas transitorias estos equipos evitan salidas prolongadas de los circuitos y ante fallas permanentes presentan una apertura definitiva después de ejecutar los recierres predeterminados.

Estos equipos se utilizan generalmente en zonas donde la incidencia de fallas transitorias sea considerable, ya que pueden despejar fallas en una de las operaciones de recierre y evita que el interruptor principal del circuito actúe, minimizando así la cantidad de usuarios afectados ante una falla.

4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS RECONECTADORES

Los reconectadores se clasifican por el número de fases, por el tipo de control y por el tipo de interrupción.

Los reconectadores monofásicos generalmente se utilizan para proteger circuitos o ramales monofásicos, en algunas ocasiones se utilizan en circuitos trifásicos donde la carga es predominantemente monofásica.

4.2.1 Reconectadores hidráulicos. Estos reconectadores tienen como medio de extinción de arco una cámara de vacío y como medio aislante utilizan aceite dieléctrico.

Las corrientes de falla son sensadas por la llamada “bobina de disparo” que inicia la operación de apertura, soltando un resorte llamado “resorte de apertura”. La energía para el cierre es suministrada por la energización de una bobina llamada “bobina de cierre” la cual simultáneamente carga los resortes de apertura, preparando el reconectador para una operación de disparo o apertura.

Algunas de las ventajas de estos reconectadores son:

- No requiere una fuente externa de voltaje para el control.
- La energía para iniciar la operación de disparo es tomada directamente de la línea.

Como desventajas se tiene:

- Para cambiar las configuraciones predeterminadas del número de recierres a ejecutar es necesario desenergizar el circuito para efectuar los ajustes mecánicos correspondientes.
- Requieren alto mantenimiento
- Dificulta la coordinación con otros elementos

4.2.2 Reconectores electrónicos. Generalmente estos reconectores también poseen como medio de interrupción del arco una cámara de vacío y como medio aislante aceite dieléctrico. Los reconectores de control electrónico ofrecen más exactitud de operación que los reconectores hidráulicos, ya que permiten cambiar los ajustes de operación sin desenergizar el circuito o sin desmontar el equipo.

Las ventajas de estos equipos son:

- Ofrecen una óptima garantía de coordinación con los relés de la subestación por tener facilidad de programar las curvas de disparo.
- Para cambiar los parámetros de operación no necesitan desenergizar el circuito o desmontar el equipo.
- Mayor precisión
- Requieren de menor mantenimiento.

Algunas desventajas:

- Elevados costos de inversión
- Altos costos en los repuestos electrónicos
- Versatilidad limitada por uso de tarjetas
- Gama limitada en las curvas de protección respecto a los microprocesados.

4.2.3 Reconectores microprocesados. Los reconectores poseen interrupción en vacío y aislamiento sólido o en SF6. Estos reconectores ofrecen muy buena exactitud de operación, además poseen funciones adicionales de registro de fallas, reporte de eventos, curvas de protección modificables entre otras. Al igual que los reconectores electrónicos se pueden hacer ajustes sin necesidad de desenergizar el circuito o desmontar el equipo.

Estos reconectores poseen un conjunto de elementos que son gobernados por un módulo (relé), el cual envía las órdenes de apertura o recierre de acuerdo a los parámetros configurados y a las señales que recibe de los transformadores de corriente y en algunos casos de los transformadores capacitivos de voltaje, los cuales están instalados dentro de cada reconector.

Estos equipos pueden ser controlados y monitoreados desde un centro de control por medio de sistemas SCADA ya que cuentan con puertos de comunicación serial y Ethernet (RJ45) con protocolos de tales como DNP3 e IEC-870.

Ventajas de este tipo de reconectadores:

- Facilidad de programar varias funciones de protección
- Ofrecen una fácil coordinación con los relés de subestación
- No es necesario desenergizar el circuito o desmontar el equipo para cambiar ajustes de operación.
- Mayor precisión.
- Menor mantenimiento
- Poseen funciones adicionales tales como registro de eventos, registro de medidas de corriente y de tensión entre otras.
- Pueden ser controlados y monitoreados de forma remota

Desventajas de estos reconectadores:

- Elevados costos de inversión
- Los costos de los repuestos son muy costosos y algunos casos no son comerciales.

4.3 RECONECTADORES UTILIZADOS EN EPM

En la siguiente tabla se resumen las características técnicas de los reconectadores más utilizados en las redes de EPM.

Tabla 1. Características de los re conectadores de EPM a 13.2 kV

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE RECONECTADORES UTILIZADOS EN EPM									
MARCA	TIPO	FASES	TIPO DE CONTROL	CORRIENTE NOMINAL (A)	TENSIÓN NOMINAL (kV)	TENSIÓN MÁXIMA OPERATIVA	BIL (kV)	MEDIO DE INTERRUPCIÓN	MEDIO DE AISLAMIENTO
COOPER	VXE	1	Electrónico	400	13.2	15.5	110	Vacío	Aceite
	NOVA 15	1	Electrónico	630	13.2	15.5	110	Vacío	Sólido
	NOVA 15	3	Microprocesado	630	13.2	15.5	110	Vacío	Sólido
	NOVA 27	3	Microprocesado	630	13.2	27	110	Vacío	Sólido
JOSLYN	POWER MAX	1	Microprocesado	630	13.2	17.1	110	Vacío	Sólido
	SEL 351J	1	Microprocesado	630	13.2	15	110	Vacío	Sólido
NOJA POWER	OSM15-16-630	3	Microprocesado	630	13.2	15.5	110	Vacío	Sólido
ENTEC	EPR	3	Microprocesado	630	13.2	15	110	Vacío	Sólido
NULEC	W27	1	Microprocesado	400	13.2	21	125	Vacío	Sólido
	U27	3	Microprocesado	630	13.2	15.5	110	Vacío	Sólido

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 2. Características de los re conectadores de EPM a 44 kV

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE RECONECTADORES UTILIZADOS EN EPM									
MARCA	TIPO	FASES	TIPO DE CONTROL	CORRIENTE NOMINAL (A)	TENSIÓN NOMINAL (kV)	TENSIÓN MÁXIMA OPERATIVA	BIL (kV)	MEDIO DE INTERRUPCIÓN	MEDIO DE AISLAMIENTO
JOSLYN	651R	3	Microprocesado	600	46	48.3	250	Vacío	Sólido

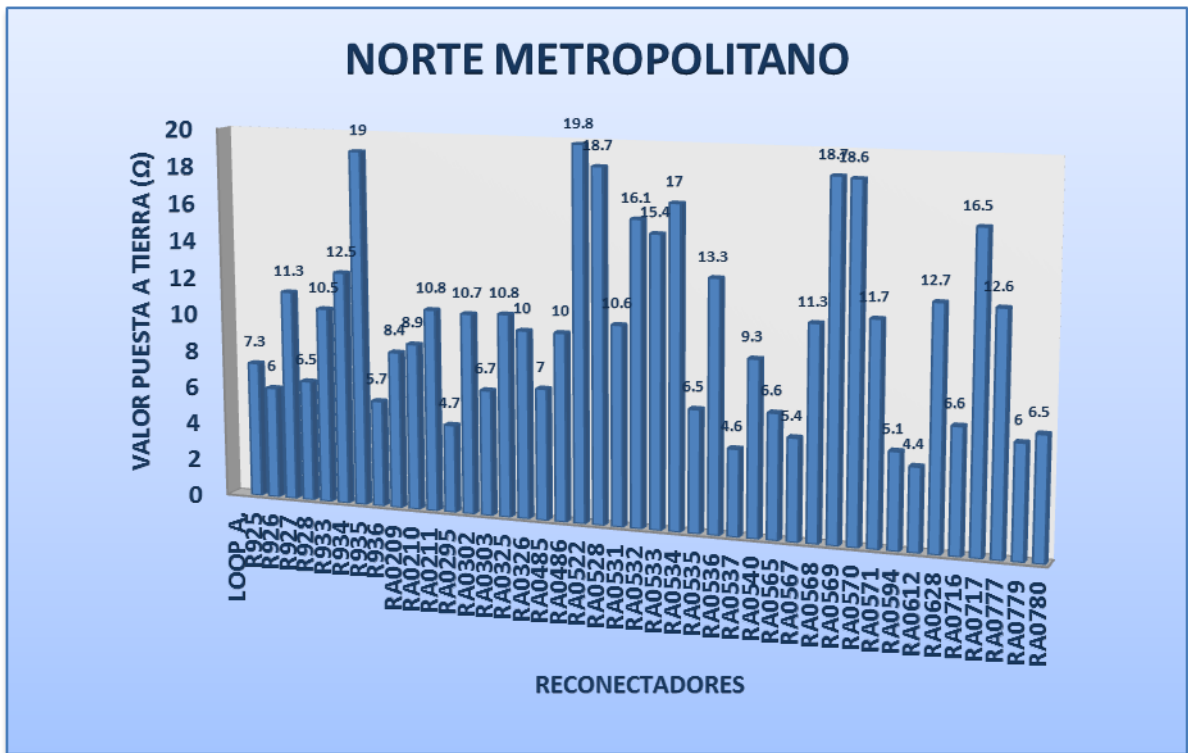
Fuente: Elaborado por el autor

4.4 ESTADO ACTUAL DE LOS RECONECTADORES INSTALADOS EN EPM

Empresas Públicas de Medellín tiene instalados en las redes de distribución aproximadamente 730 reconectores. Para la ejecución del proyecto se realizaron mediciones de puesta a tierra en equipos instalados en las regiones del departamento de Antioquia con el fin de determinar si cuentan con un adecuado aterrizamiento para prevenir fallas por sobretensiones.

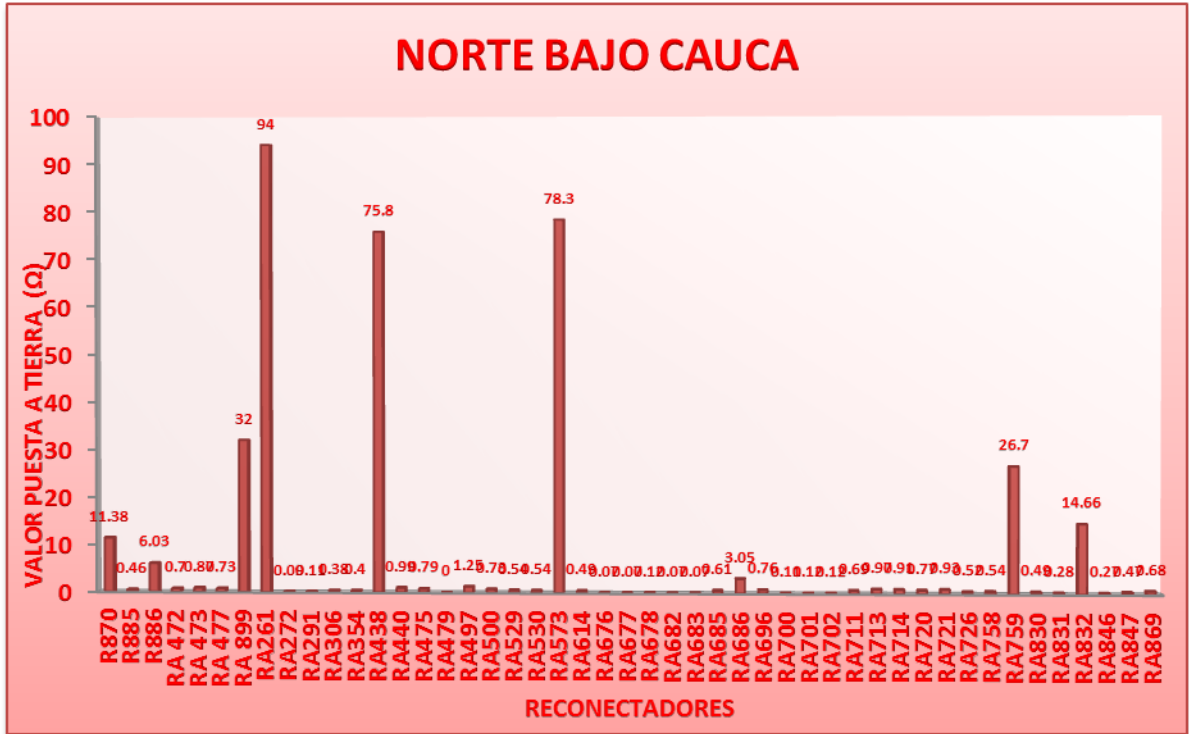
En las siguientes gráficas se ilustran los valores de puesta a tierra de los equipos instalados a Junio 30 de 2013.

Gráfica 1. Valores de puesta a tierra Norte Metropolitano



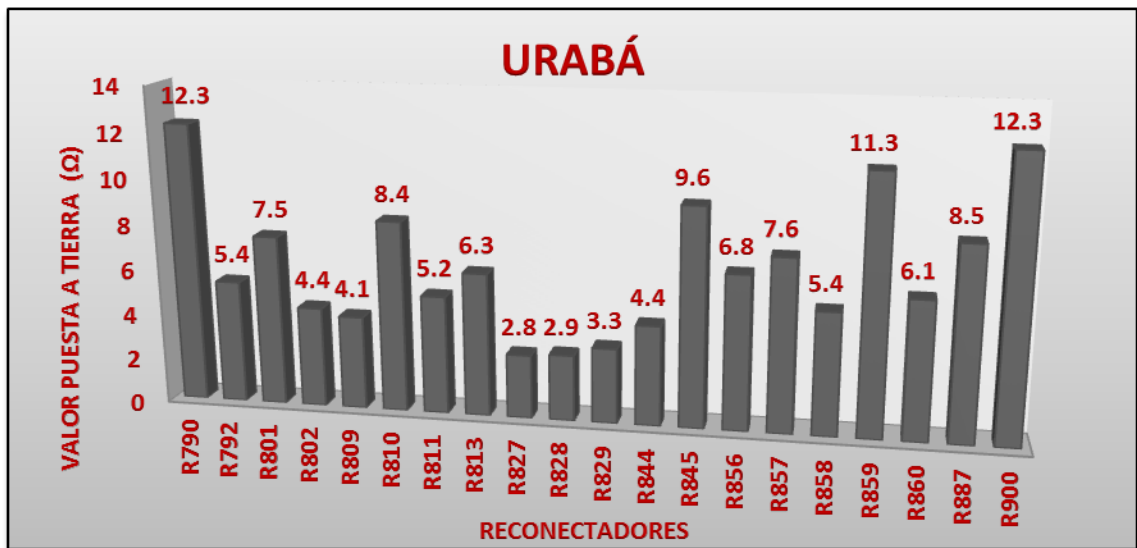
Fuente: Elaborado por el autor

Gráfica 2. Valores de puesta a tierra Norte Bajo Cauca



Fuente: Elaborado por el autor

Gráfica 3. Valores de puesta a tierra Norte Urabá



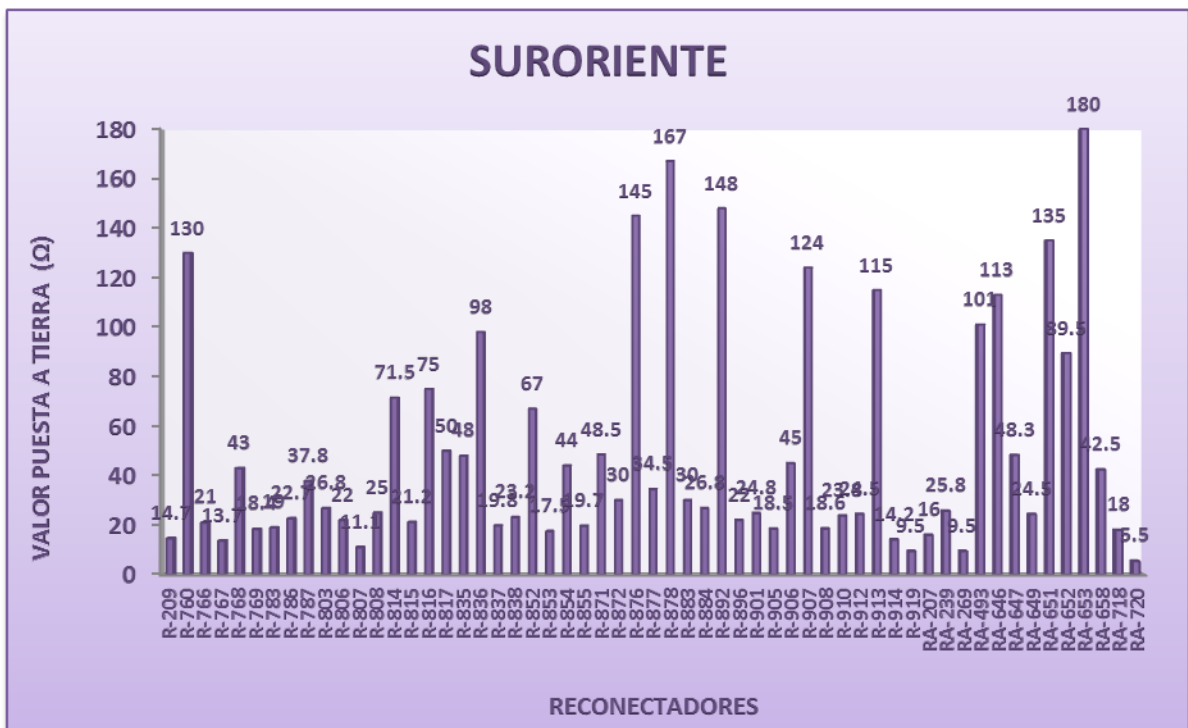
Fuente: Elaborado por el autor

Gráfica 4. Valores de puesta a tierra Centro Metropolitano



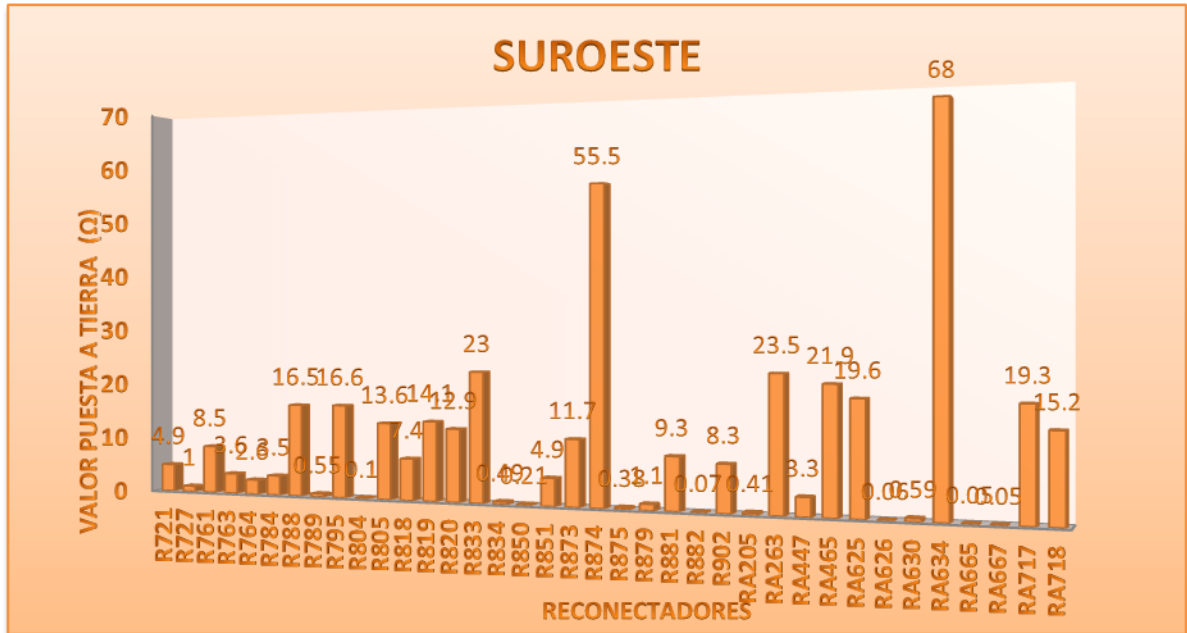
Fuente: Elaborado por el autor

Gráfica 5. Valores de puesta a tierra Sur Oriente



Fuente: Elaborado por el autor

Gráfica 6. Valores de puesta a tierra Sur Oeste



Fuente: Elaborado por el autor

4.4.1 Fallas presentadas en re conectadores de EPM. En las siguientes tablas se muestra la cantidad de re conectadores fallados durante el primer semestre del año 2013, los cuales están instalados en las redes de distribución de las Empresas Públicas de Medellín. Los registros fueron tomados desde el primero de Enero de 2013 hasta el 30 de Junio del mismo año.

Tabla 3. Cantidad de re conectadores fallados por controles marca ENTEC

CONTROLES FALLADOS MARCA ENTEC				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	MARCA	NÚMERO DE SERIE	Total
2216615	CONTROL	ENTEC EPR	SC: E10030049	1
2216618	CONTROL	ENTEC EPR	SC: E10030054	1
2216621	CONTROL	ENTEC EPR	SC: E10030051	1
2216633	CONTROL	ENTEC EPR	SC: E09110113	1
2216640	CONTROL	ENTEC EPR	SC: E10030053	1
2270014	CONTROL	ENTEC EPR	SC: PR112120437	1

CONTROLES FALLADOS MARCA ENTEC				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	MARCA	NÚMERO DE SERIE	Total
2284787	CONTROL	ENTEC EPR	SC: E09110115	1
2326007	CONTROL	ENTEC EPR	SC: E10030041	1
Total general				8

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 4. Cantidad de reconectores fallados por controles marca NULEC Tipo PTCC

CONTROLES FALLADOS MARCA NULEC-PTCC				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	MARCA	NÚMERO DE SERIE	Total
2217112	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 181884	1
2217149	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 181898	1
2217168	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 186580	1
2217250	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 186578	1
2217264	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 181889	1
2217269	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 181905	1
2217276	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 181906	1
2217280	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 181885	1
2217282	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 181888	1
2217287	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 181895	1
2217293	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 181897	1
2217300	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 181899	1
2217305	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 181909	1
2217308	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 185456	1

CONTROLES FALLADOS MARCA NULEC-PTCC				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	MARCA	NÚMERO DE SERIE	Total
2217312	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 185462	1
2217320	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 185482	1
2217324	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 186574	1
2302007	CONTROL	NULEC PTCC	SC: 185480	1
Total general				18

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 5. Cantidad de reconectores fallados por controles marca Joslyn.

CONTROLES FALLADOS MARCA JOSLYN				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	REFERENCIA	NÚMERO DE SERIE	Total
2214647	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X101909	1
2214676	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X98009	1
2214686	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X17710	1
2214710	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X100909	1
2214726	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X20310	1
2214741	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X99809	1
2214756	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X99709	1
2214763	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X95609	1
2214780	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X17410	1
2214860	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X96309	1
2214864	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X18810	1
2214867	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X19910	1
2216900	CONTROL	JOSLYN POWER MAX	SC: X004908	1
2216913	CONTROL	JOSLYN POWER MAX	SC: X007108	1
2216918	CONTROL	JOSLYN POWER MAX	SC: X006208	1
2216930	CONTROL	JOSLYN POWER MAX	SC: X006008	1
2216942	CONTROL	JOSLYN POWER MAX	SC: X006108	1
2216951	CONTROL	JOSLYN POWER MAX	SC: X005108	1
2216957	CONTROL	JOSLYN	SC: X005408	1

CONTROLES FALLADOS MARCA JOSLYN				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	REFERENCIA	NÚMERO DE SERIE	Total
2216968	CONTROL	POWER MAX JOSLYN	SC: X004408	1
2216977	CONTROL	POWER MAX JOSLYN	SC: X004508	1
2216986	CONTROL	POWER MAX JOSLYN	SC: X006908	1
2217016	CONTROL	POWER MAX JOSLYN	SC: X004808	1
2217040	CONTROL	POWER MAX JOSLYN	SC: X006308	1
2217044	CONTROL	POWER MAX JOSLYN	SC: X004708	1
2217047	CONTROL	POWER MAX JOSLYN	SC: X006408	1
2272196	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X97909	1
2293013	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X18310	1
2293028	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X101509	1
2302014	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X102309	1
2305749	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X18210	1
2319538	CONTROL	JOSLYN 351J	SC: X101009	1
Total general				32

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 6. Cantidad de reconectores fallados por controles marca Cooper

CONTROLES FALLADOS MARCA COOPER				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	REFERENCIA	NÚMERO DE SERIE	Total
2217978	CONTROL	COOPER FORM 6	SC: CP571078066	1
2217987	CONTROL	COOPER FORM 6	SC: CP571078123	1
2285670	CONTROL	COOPER FORM 6	SC: CP571078104	1
2296684	CONTROL	COOPER FORM 6	SC: CP571078101	1
2298326	CONTROL	COOPER FORM 6	SC: CP571078090	1
2319517	CONTROL	COOPER FORM 6	SC: 10546	1

CONTROLES FALLADOS MARCA COOPER				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	REFERENCIA	NÚMERO DE SERIE	Total
2302004	CONTROL	COOPER FORM 5	SC: 8688	1
Total general				7

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 7. Cantidad de reconectores fallados por control marca Cooper Tipo Nova 15 monofásicos

CONTROLES FALLADOS MARCA COOPER MONOFÁSICOS				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	REFERENCIA	NÚMERO DE SERIE	Total
2215741	CONTROL	NOVA 15	SC: CP571051149	1
2215744	CONTROL	NOVA 15	SC: CP571051153	1
2215746	CONTROL	NOVA 15	SC: CP571051147	1
2215752	CONTROL	NOVA 15	SC: CP571051146	1
Total general				4

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 8. Cantidad de reconectores fallados por controles marca Noja Power.

CONTROLES FALLADOS MARCA NOJA POWER				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	MARCA	NÚMERO DE SERIE	Total
2216688	CONTROL	NOJA POWER	SC: 102478	1
Total general				1

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 9. Cantidad de reconectores fallados por potencia marca Nulec tipo U27

POTENCIAS FALLADAS MARCA NULEC				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	REFERENCIA	NÚMERO DE SERIE	Total
2217416	POTENCIA	NULEC U27	SP: 224475	1
2217423	POTENCIA	NULEC U27	SP: 296093	1
2217424	POTENCIA	NULEC U27	SP: 296091	1
2217428	POTENCIA	NULEC U27	SP: 185278	1

POTENCIAS FALLADAS MARCA NULEC				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	REFERENCIA	NÚMERO DE SERIE	Total
2217431	POTENCIA	NULEC U27	SP: 224471	1
2217435	POTENCIA	NULEC U27	SP: 185254	1
2217438	POTENCIA	NULEC U27	SP: 185258	1
2217440	POTENCIA	NULEC U27	SP: 185255	1
2217442	POTENCIA	NULEC U27	SP: 185269	1
2324230	POTENCIA	NULEC U27	SP: 185273	1
Total general				10

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 10. Cantidad de reconectadores fallados por potencia marca Noja Power

POTENCIAS FALLADAS MARCA NOJA POWER				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	MARCA	NÚMERO DE SERIE	Total
2216694	POTENCIA	NOJA POWER	SP: 154123	1
Total general				1

Fuente: Elaborado por el autor

Tabla 11. Cantidad de reconectadores fallados por potencia marca Cooper

POTENCIAS FALLADAS MARCA COOPER				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	REFERENCIA	NÚMERO DE SERIE	Total
2218173	POTENCIA	NOVA 27	SP: 3031	1
2218174	POTENCIA	NOVA 27	SP: 3065	1
2218177	POTENCIA	NOVA 27	SP: 3018	1
2218181	POTENCIA	NOVA 27	SP: 3044	1
2218187	POTENCIA	NOVA 27	SP: 3029	1
2218188	POTENCIA	NOVA 27	SP: 3059	1
2218189	POTENCIA	NOVA 27	SP: 3071	1
Total general				7

Fuente: Elaborado por el autor

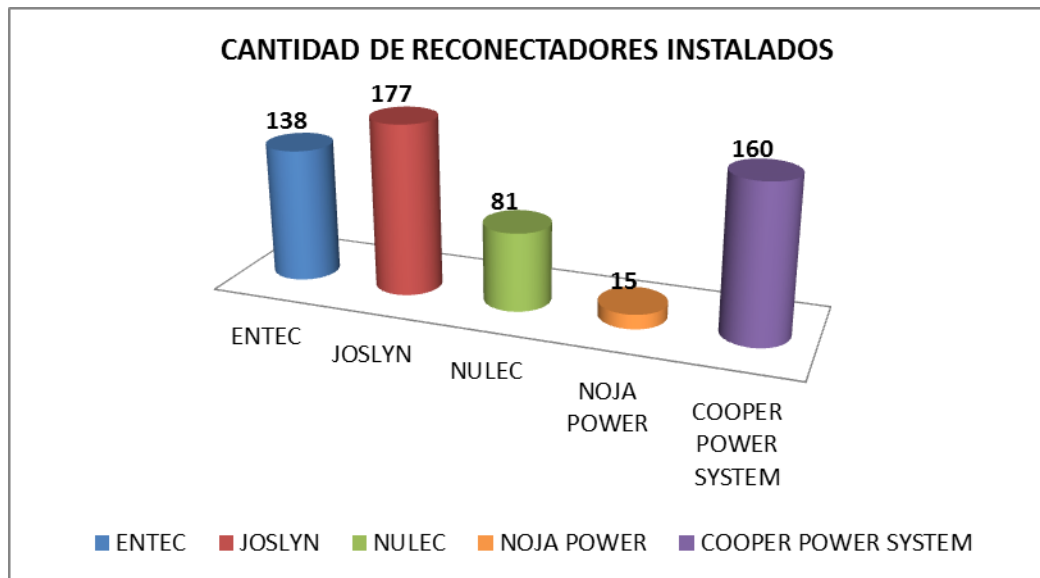
Tabla 12. Cantidad de reconectadores fallados por potencia marca Joslyn

POTENCIAS FALLADAS MARCA JOSLYN				
NÚMERO DE OT	ELEMENTO	REFERENCIA	NÚMERO DE SERIE	Total
2216727	POTENCIA	JOSLYN POWER MAX	SP: BT2608	1
2216731	POTENCIA	JOSLYN POWER MAX	SP: BT1308	1
2216753	POTENCIA	JOSLYN POWER MAX	SP: BT3008	1
2216757	POTENCIA	JOSLYN POWER MAX	SP: BT2708	1
2216771	POTENCIA	JOSLYN POWER MAX	SP: BT2908	1
2216774	POTENCIA	JOSLYN POWER MAX	SP: BT3508	1
2216842	POTENCIA	JOSLYN POWER MAX	SP: BT3608	1
Total general				7

Fuente: Elaborado por el autor

En la siguiente gráfica se detalla la cantidad de reconectadores instalados en las redes de distribución al 30 de Junio de 2013.

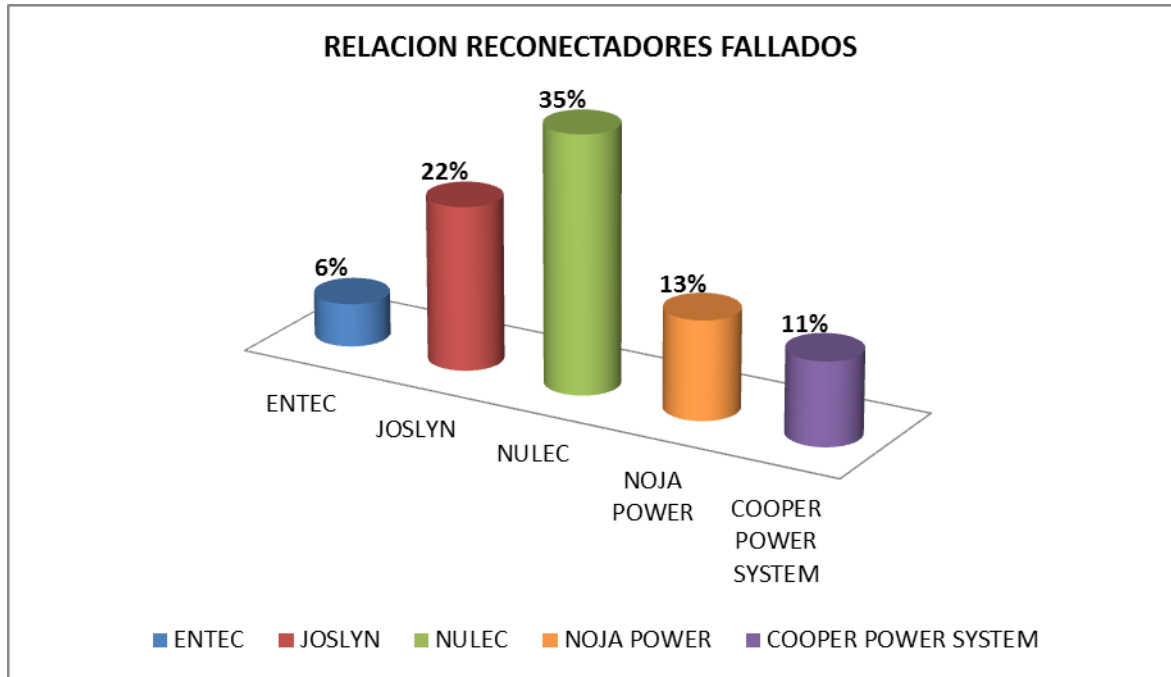
Gráfica 7. Cantidad de reconectadores instalados



Fuente: Elaborado por el autor

En la siguiente gráfica se relaciona el porcentaje de equipos fallados respecto a la cantidad de equipos existentes al 30 de Junio de 2013.

Gráfica 8. Relación de reconvertadores fallados



Fuente: Elaborado por el autor

4.4.2 Fallas detectadas. En la reparación y mantenimiento de los equipos atendidos en el Equipo Gestión Técnica durante el año 2013 se han evidenciado fallas que pueden ser causadas por sobretensiones en la red de alimentación.

A continuación se describen las fallas encontradas:

4.4.2.1 Módulo UPS en control para reconvertador ENTEC. Cuando falla el módulo UPS el control no puede ejecutar las órdenes de apertura o cierre del equipo y en algunos casos se apaga completamente debido a que este módulo realiza las siguientes funciones:

El módulo UPS carga los capacitores para abrir o cerrar el reconvertador a de 120 VDC.

El módulo es alimentado a 120 VAC, cuando hay ausencia de tensión se alimenta a 24 VDC por las baterías que tiene de respaldo.

El control es alimentado a 120 VAC por un transformador de 0.5 kVA externo, el cual está conectado a la red primaria (generalmente a 7620 V ó 13200 V).

Foto 1. Módulo UPS reconectador ENTEC fallado



Fuente: Tomada por el autor

4.4.2.2 Polo Central en reconectador trifásico marca NULEC. Esta falla no es muy frecuente en este tipo de reconectores, en este caso en particular se desconoce exactamente la causa de la falla, ya que el equipo se encontraba en condiciones normales de operación y en una de las inspecciones de rutina se encontró el polo central del reconectador averiado con señales de arco eléctrico en el interior del polo.

Foto 2. Reconectador trifásico marca NULEC de Schneider Electric fallado.



Fuente: Tomada por el autor

4.4.2.3 Reconectador monofásico marca Joslyn. Esta falla se asocia a una posible sobretensión debido a que el equipo se encontraba en condiciones normales de operación, instalado con DPS en el lado de fuente y en el lado de carga con su respectiva descarga a tierra.

Se desconoce si los elementos de protección del equipo actuaron ya que éstos quedaron destruidos por el arco eléctrico generado en el momento de la falla.

Foto 3. Reconectador monofásico marca JOSLYN fallado



Fuente: Tomada por el autor

4.4.2.4 Tarjeta MainBoard en control para reconectador Joslyn. Esta es una falla muy frecuente en estos reconectadores, generalmente falla un transformador que tiene la tarjeta en la parte central (ver ilustración 4). Esta tarjeta es la encargada de cargar el sistema de baterías y otras afunciones adicionales.

Foto 4. Tarjeta Main Board para control Joslyn 351J fallada.



Fuente: Tomada por el autor

4.5 RECOMENDACIONES DE LOS FABRICANTES PARA INSTALACIÓN DE RECONECTADORES

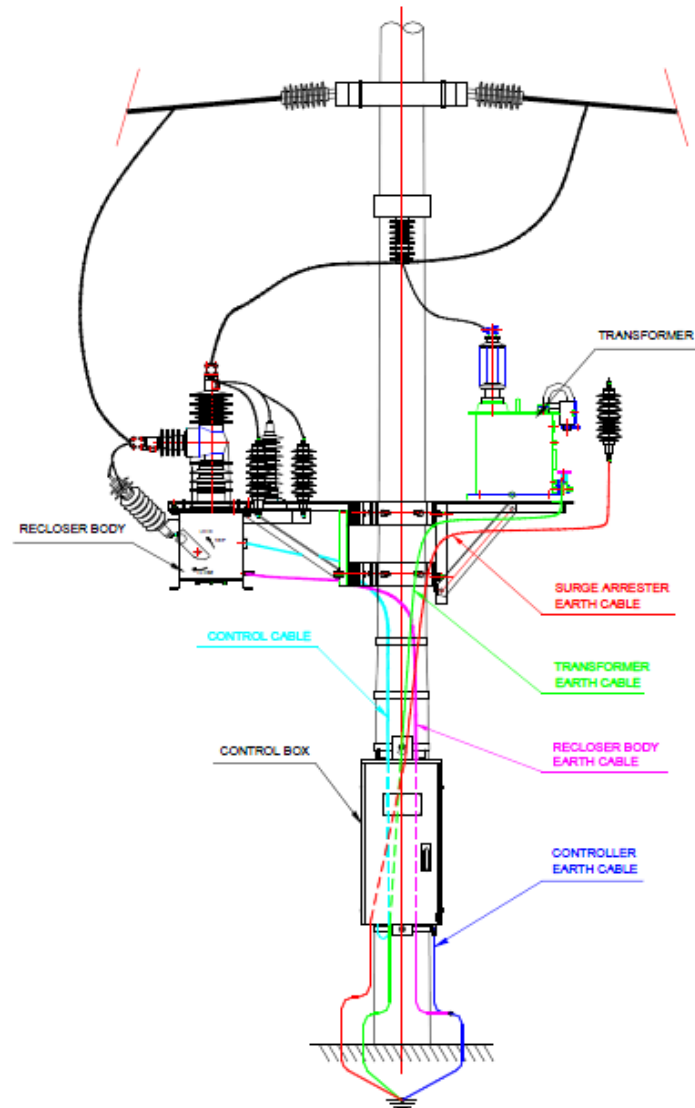
En las redes de distribución de EPM hay instalados diferentes tipos y marcas de reconectadores tal como se muestra en la tabla 1, por lo cual cada fabricante indica o recomienda un esquema a utilizar en la instalación del equipo. Actualmente los reconectadores para redes aéreas se instalan de acuerdo a las normas de EPM RA2-008 y RA3-008.

4.5.1 Instalación de reconectadores marca ENTEC. Estos equipos pueden ser instalados en postes mediante crucetas o plataformas y en una estructura en las subestaciones de transformación.

Para obtener una adecuada protección contra sobretensiones el fabricante recomienda lo siguiente:

- Instalar DPS para proteger el equipo contra sobretensiones en la entrada y salida de cada fase del reconectador.
- Instalar DPS en el devanado de alta tensión del transformador de alimentación.
- El control está equipado internamente dos DPS de baja tensión (fase-tierra y neutro-tierra) para una tensión nominal de 230 V, una tensión máxima de operación de 275 V y una corriente nominal de descarga de 20 kA.
- Para la conexión al sistema de puesta a tierra recomienda un punto común para evitar un diferencial de gradiente entre el tanque, el control y los DPS.
- Los bajantes del sistema de puesta a tierra deben estar separados del cable de control con una separación considerable.
- El tamaño del conductor de puesta a tierra (bajante) debe ser de al menos 60mm².
- El fabricante no recomienda un valor de resistividad del sistema de puesta a tierra.

Ilustración 1. Instalación recomendada por el fabricante para reconector marca ENTEC



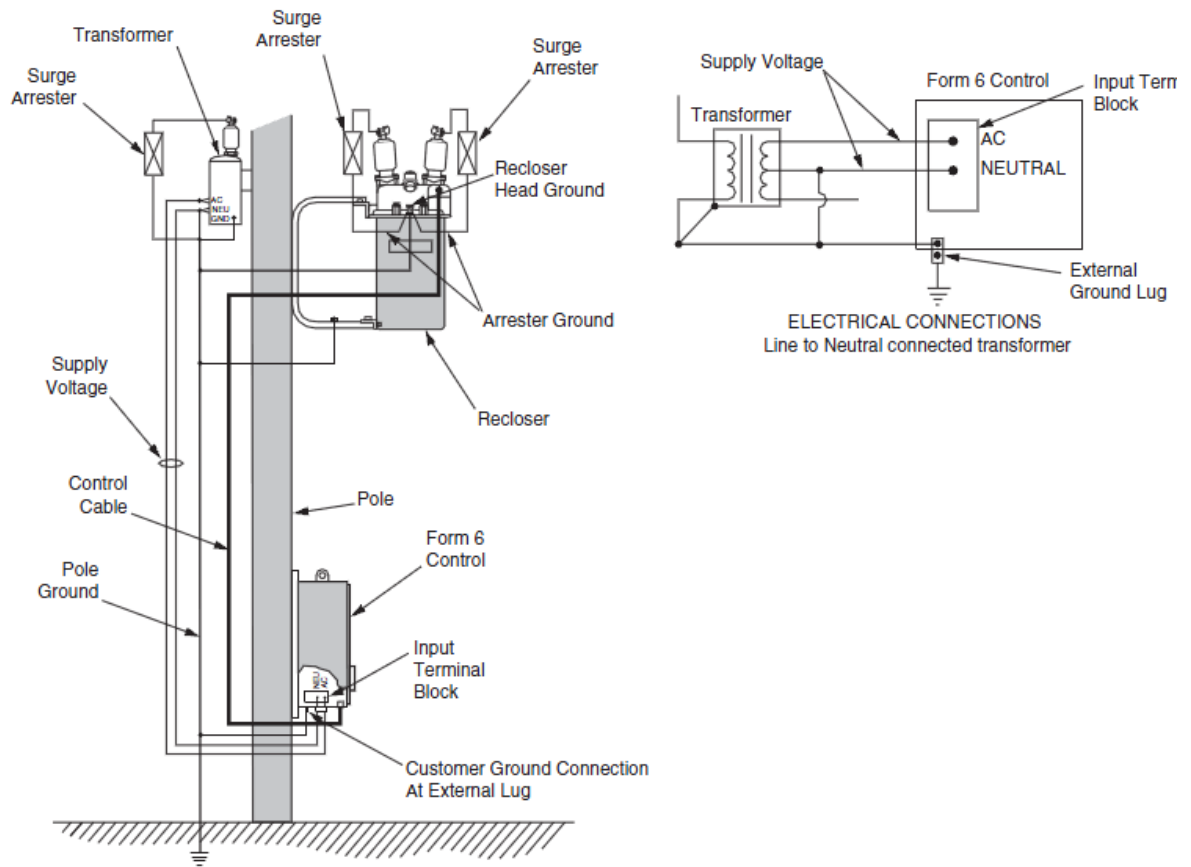
Fuente: Tomado de Entec Electric & Electronic co. Ltd. Manual EPR Automatic Recloser.

4.5.2 Instalación de reancladores marca COOPER. Para una protección eficaz contra sobretensiones, todos los elementos del reanclador deben colocarse en paralelo a un solo camino de tierra, por lo cual el transformador de alimentación de corriente alterna debe estar puesto a tierra en paralelo con el aterrizamiento del control y este a su vez conectado en paralelo con el aterrizamiento del reanclador, el calibre del conductor de puesta a tierra puede ser N° 4 AWG en todo el recorrido (Ver Ilustración 5).

Otras recomendaciones complementarias son:

- El cable de control debe estar separado de la bajante de puesta a tierra.
- El reconectador se debe proteger con DPS en la entrada y salida de cada fase al igual que el transformador de alimentación.
- Si se tiene el equipo comunicado con un sistema SCADA, todos los elementos de comunicación deben estar puestos a tierra.
- El valor de la resistencia del sistema de puesta a tierra depende de los valores establecidos por el operador de red, pero siempre se debe buscar reducir al mínimo el valor de la resistencia.

Ilustración 2. Instalación recomendada por el fabricante para reconectador marca COOPER

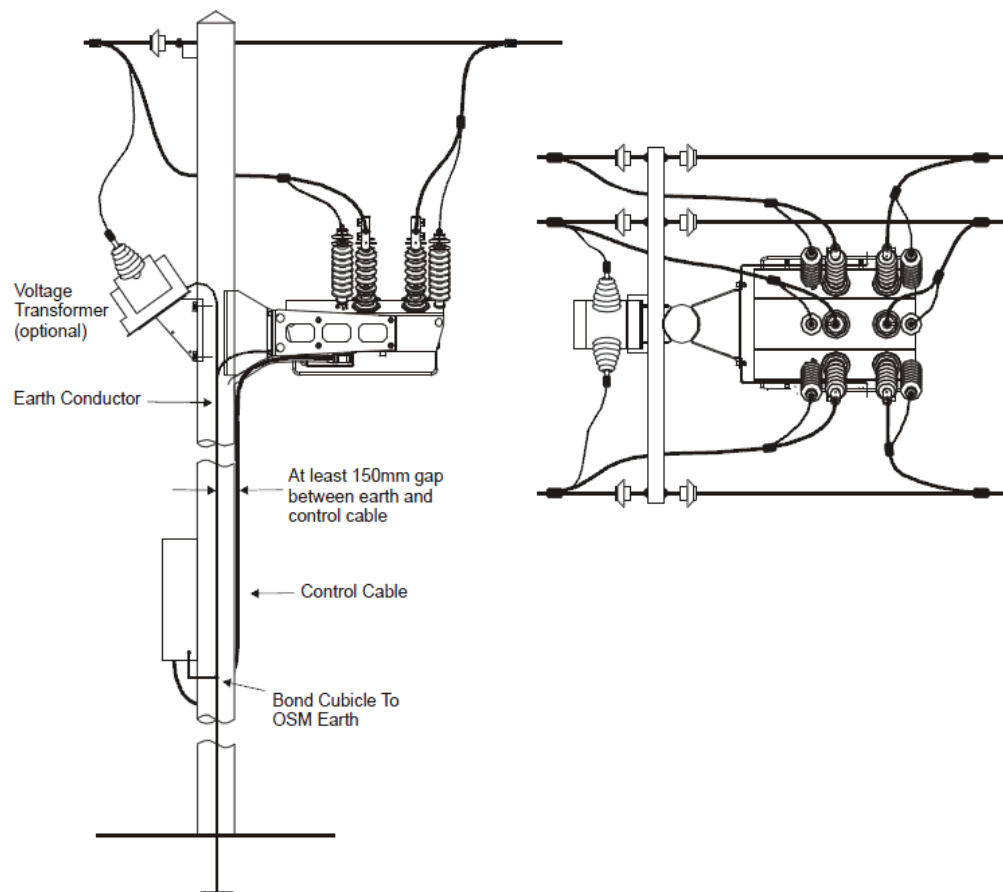


Fuente: Tomado de Cooper Power System. Manual Reclosers Form 6 Microprocessor.

4.5.3 Instalación de reconectores marca NOJA POWER. Para la instalación de estos reconectores el fabricante recomienda:

- Instalar DPS para proteger el equipo contra sobretensiones en la entrada y salida de cada fase del reconector.
- Instalar DPS en el devanado de baja tensión del transformador de alimentación.
- Todos los elementos deben estar conectados a un sistema de puesta a tierra en paralelo con una sola bajante.
- El conductor de la puesta a tierra debe tener un diámetro mínimo de 35mm² en cobre.
- Para comunicar el equipo se debe utilizar cable blindado debidamente aterrizado.
- El cable de control debe estar separado de la bajante de puesta a tierra.
- El fabricante no recomienda un valor de resistividad del sistema de puesta a tierra.

Ilustración 3. Instalación recomendada por el fabricante para reconector marca Noja Power

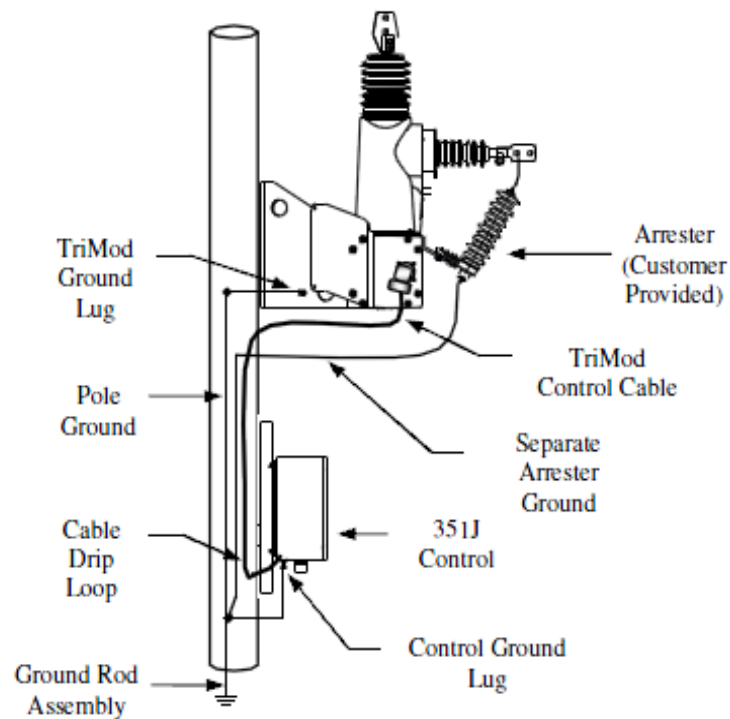


Fuente: Tomado de Noja Power Switchgear Pty Ltd. Manual reconector automático OSM.

4.5.4 Instalación de reconectores marca JOSLYN. Para obtener una adecuada protección de los elementos del reconector ante una descarga eléctrica, el fabricante recomienda:

- El reconector y el control deben estar conectados a un sistema de puesta a tierra en paralelo con una sola bajante.
- Se deben instalar DPS en la entrada del reconector con un conductor de descarga a tierra separado de la tierra del control y el reconector.
- El fabricante no describe el calibre del conductor de puesta a tierra y no recomienda un valor de resistividad del sistema de puesta a tierra.

Ilustración 4. Instalación recomendada por el fabricante para reconector marca JOSLYN



Fuente: Tomado de Joslyn Hi-Voltage Corporation. Manual recloser trimond 100.

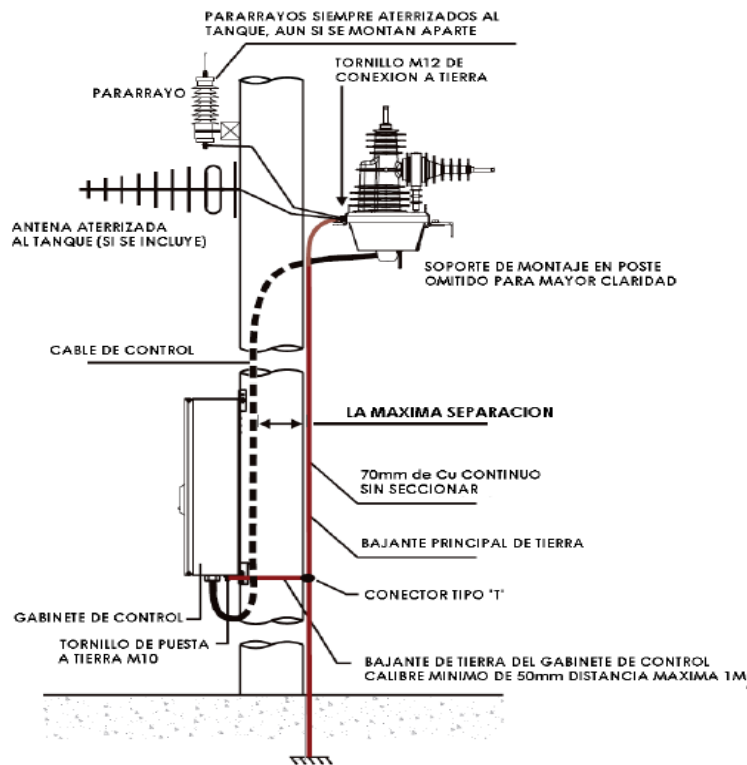
4.5.5 Instalación de reconectores marca NULEC. Para obtener una protección eficaz de los elementos del reconector contra sobretensiones, el fabricante recomienda un riguroso sistema de puesta a tierra para el aterrizamiento del equipo.

- Cuando se presenta la posibilidad de que las condiciones de suicheo de la red pueden producir picos de voltaje excesivos de alrededor del 70% del nivel de

Resistencia de Voltaje al Impulso (BIL), el fabricante recomienda el uso de DPS adecuados a las capacidades del sistema conectados a cada terminal del reconectador, es decir en la entrada y salida de cada fase.

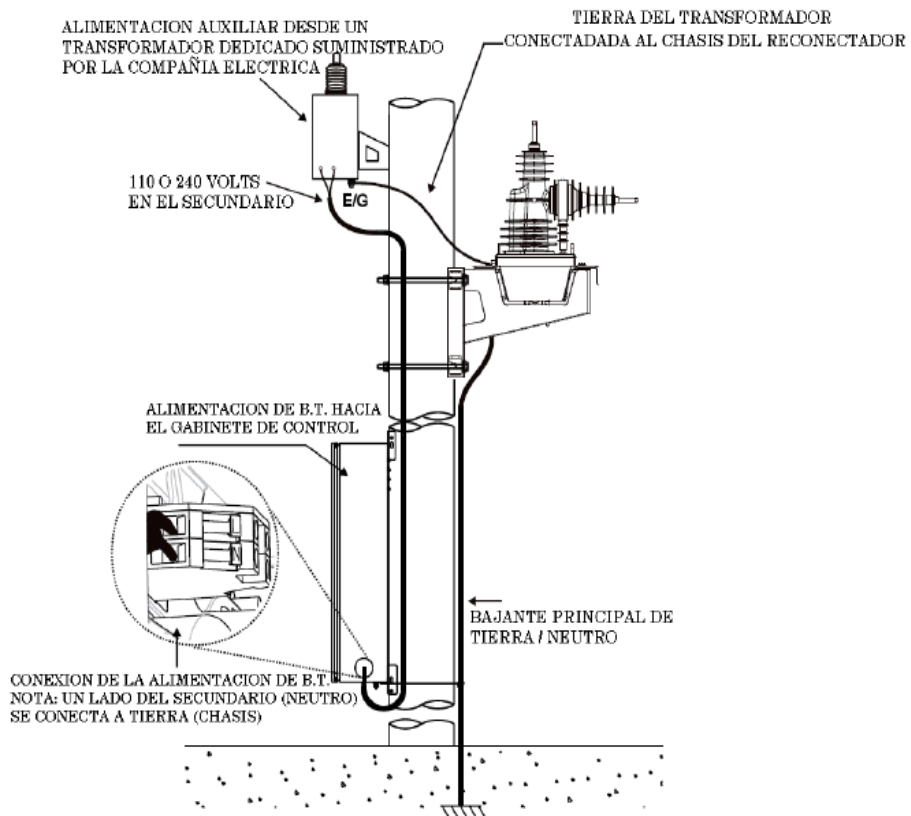
- Todos los elementos del reconectador y los DPS deben estar conectados a tierra a través del bajante principal el cual deberá de ser de al menos 70mm² en cobre.
- La electrónica interna del control se encuentra protegida de diferencias de potencial que puedan ocurrir entre la estructura del reconectador y la del controlador mientras circulan corrientes de descarga por el bajante principal de tierra.
- No se permiten otras conexiones a tierra desde el control ya que las corrientes de descarga también circularán por esos caminos.
- El bajante de tierra principal de estar separado físicamente del cable de control con un espacio mínimo de 150mm.
- El transformador de alimentación y cualquier estructura metálica debe estar conectado al bajante principal de tierra, además un lado del secundario del transformador se aterriza a la tierra del panel de equipamiento dentro del gabinete de control.

Ilustración 5. Instalación recomendada por el fabricante para reconectador marca NULEC, general para todas las instalaciones.



Fuente: Tomado de Schneider Electric. Manual Reconectador Serie U.

Ilustración 6. Instalación recomendada por el fabricante para reconector marca NULEC con transformador de alimentación auxiliar.



Fuente: Tomado de Schneider Electric. Manual Reconector Serie U.

En la siguiente tabla se contrastan las principales recomendaciones de los diferentes fabricantes.

Tabla 13. Principales recomendaciones de los fabricantes

FABRICANTE	DISPONIBILIDAD Y ESPECIFICACIONES DE DPS INTERNOS PARA TARJETAS DE CONTROL	VALOR DE PUESTA A TIERRA RECOMENDADO (Ohm)	SECCIÓN MÍNIMA DEL CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA (mm²)	DISTANCIA DE SEPARACIÓN DEL CABLE DE PUESTA A TIERRA Y EL CABLE DE CONTROL (mm)	UNIFORMIDAD A UN SOLO CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA (S/N)	CONDUCTORES DE PUESTA A TIERRA EN PARALELO
ENTEC	-Tensión nominal: 230 V. -Tensión máxima de operación: 275 V. -Corriente nominal de descarga: 20 kA.	No especifica	60	No especifica	No especifica	3
COOPER	No especifica	No especifica	21.15	No especifica	Si	1
NOJA POWER	No especifica	No especifica	35	No especifica	Si	1
JOSLYN	No especifica	No especifica	No especifica	No especifica	Si	1
NULEC	No especifica	No especifica	70	150	Si	1

Fuente: Elaborado por el autor

4.6 VIDA ÚTIL DE LOS RECONECTADORES

La vida útil de los reconectadores se determina de acuerdo a las condiciones técnicas del equipo y a la viabilidad económica de la reparación o actualización tecnológica del equipo basado en criterios técnicos definidos para ello, de no cumplir con los parámetros establecidos el equipo se retira de la red y se da de baja.

Los criterios para determinar la obsolescencia tecnológica o la vida útil del reconectador son:

- Interruptores de vacío fallados cuando presentan fallas en las piezas mecánicas como desgaste de la capa erosionable menor o igual a 3.2 mm, fallas físicas como fisura que permiten la pérdida del vacío, fallas eléctricas como la resistencia de contacto mayor a la establecida en la norma o el manual del equipo, prueba de integridad con resultados de corriente de fuga igual o mayor a 10 mA.
- Mecanismo de apertura y cierre en mal estado cuando las piezas que lo integran están reventadas y con fisuras, oxidación, mecanismo pegado, con desgaste y desajuste, (contactor de alta tensión de la bobina de cierre) además no se cuenta con repuestos (sin forma de remplazo). Número de operaciones mayores a las establecidas en el manual del equipo.
- Daños en el aislamiento sólido debido al deterioro de los soportes aislantes con caminos de corriente de fuga, prueba de resistencia de aislamiento con resultados por debajo de lo permitido, quemadas por arco eléctrico y/o reventadas por caídas del equipo.
- Bobina actuadora de alta tensión quemada y/o transformadores de corriente dañados. (sin forma de remplazo).
- Cuba dañada o gabinete dañado, (sin forma de remplazo).
- Cuando los reconectadores ya no cumplen con las características técnicas de protección y de comunicaciones necesarias para la operación del sistema. (Mecanismo de conteo de tiempo Hidráulico - mecánico, curvas de protección definidas no ajustables, sistemas de comunicación y protocolos inexistentes u obsoletos).
- Cuando el equipo sobrepasa las operaciones para las cuales está diseñado, de acuerdo al manual del fabricante. En este punto toda la parte mecánica del equipo se encuentra desgastada.
- Cuando los costos de reparación y/o actualización tecnológica superan el 50% del costo de reposición de uno nuevo.

4.7 SOBRETENSIONES

Las sobretensiones son perturbaciones presentadas en la red eléctrica que se superponen a la tensión nominal de un circuito, por lo cual se incrementa la tensión de manera transitoria, pueden aparecer entre fases o entre circuitos (llamadas de modo diferencial) y entre fases y tierra (llamadas de modo común).

Las sobretensiones se pueden producir por descargas de rayos, conmutaciones de equipos eléctricos y descargas electrostáticas.

4.7.1 Descargas de rayos. Los rayos se pueden producir durante tempestades, tormentas de nieve y otros fenómenos naturales. Las tempestades son la causa más frecuente de descargas de rayo debido a que producen descargas eléctricas dentro de la nube, entres nubes y entre nube y tierra, siendo las descargas entre nube y tierra las que afectan las líneas de distribución.

Una de las particularidades de los rayos es la polarización, generalmente son negativos donde las nubes están cargadas negativamente y el suelo se encuentra cargado positivamente. También se puede presentar rayos positivos, los cuales son mucho más violentos pero menos frecuentes que los negativos.

Las descargas de rayo se distinguen entre rayos con caída directa y rayos con caída indirecta sobre la línea.

4.7.1.1 Caída directa. Se manifiesta por la inyección de corriente en grandes proporciones sobre una línea provocando un aumento en la tensión del circuito.

Las corrientes conducidas provocadas por rayos directos suelen representarse con una forma de onda conocida como 10/350 μ s y que se detalla en las normas IEC 61643-1 e IEEE C62.41.2.

El voltaje generado por el rayo alcanza valores tan altos que no son soportados por ninguna línea por lo que se estima que muy pocas veces se generan sobretensiones en las redes de media tensión por caídas de rayo directas.

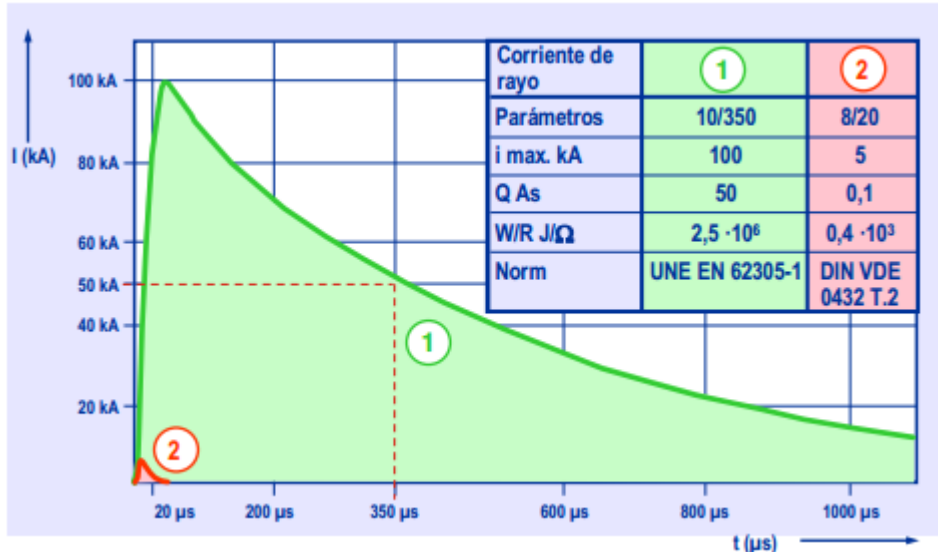
4.7.1.2 Caída indirecta. Se produce cuando un rayo cae sobre una torre, cable de guarda o cerca de las redes eléctricas generando sobretensiones considerables. La sobretensión se produce porque el paso de la corriente del rayo determina un aumento de potencial en las estructuras metálicas con respecto a tierra.

Cuando esta tensión alcanza el valor que supera el aislador se produce un retorno de la tensión entre la estructura metálica y las fases.

Las corrientes conducidas provocadas por rayos indirectos suelen representarse con una forma de onda 8/20 μ s.

La siguiente gráfica se compara el frente de onda 10/350 μ s con el frente de onda 8/20 μ s.

Gráfica 9. Comparación del frente de onda 10/350 μ s con el frente de onda 8/20 μ s.



Fuente: Tomado de http://www.dehn.es/pdf/newsletter/nl2_2012/coordinacion_energetica.pdf

4.7.2 Conmutaciones de equipos eléctricos. Cuando se accionan máquinas de alto rendimiento (grandes potencias) o equipos de maniobra con carga en las redes eléctricas se producen cambios de corriente muy altos en pequeños periodos de tiempo, ocasionando la aparición de una onda de sobretensión o de un tren de ondas de alta frecuencia oscilatorias.

Las sobretensiones provocadas por el establecimiento o la interrupción de pequeñas corrientes inductivas tiene tres fenómenos generadores: la supresión brusca de la corriente, el recebado y el precebado.

Las sobretensiones generadas por los reconectores son en función del ángulo de fase, en el momento de la maniobra se establece un arco entre los contactos y el circuito queda sujeto a una impulsión de tensión correspondiente a la anulación brutal de las tensiones entre los bornes del equipo. Esta impulsión puede ocasionar oscilaciones en los circuitos paralelos existentes como descargas oscilantes de capacidades parásitas, así como reflexiones en las rupturas de impedancia y por tanto la manifestación de corrientes de frecuencia elevada a través del arco.

Las sobretensiones que resultan por la maniobra del reconectador dependen de:

- Las características del interruptor como propiedades dieléctricas, aptitud para interrumpir una corriente de alta frecuencia entre otros.
- La impedancia de los conductores.
- La frecuencia del circuito de carga.

En general, no se pueden hacer predeterminaciones de las sobretensiones generadas en el accionamiento de los equipos porque es muy difícil calcularlas ya que intervienen elementos difícilmente cuantificables y variables de una y otra parte, por lo que es necesario un modelo matemático muy preciso.

Se recomiendan instalar DPS con frente de onda de $8/20 \mu\text{s}$ porque las corrientes inducidas se representan con una forma de onda de este tipo, tal y como se indica en la normas IEC 61643-1 e IEEE C62.41.2. Aunque los picos de tensión producidos por las conmutaciones del equipo son menores en intensidad, su mayor frecuencia puede provocar daños a largo plazo sobre el equipo.

4.7.3 Descargas electrostáticas. Las sobretensiones generadas por descargas electrostáticas tienen lugar a una transmisión de carga eléctrica por una aproximación o contacto de un cuerpo con diferente potencial electrostático.

Este fenómeno ocurre particularmente en las redes aisladas, por ejemplo, durante los minutos que preceden a la caída de un rayo, cuando una nube cargada a un cierto potencial se encuentra encima de una línea, ésta toma una carga de sentido contrario antes de que se produzca la caída del rayo, por lo cual, entre la línea y el suelo se genera un campo eléctrico que puede alcanzar 30 kV/m , bajo cuyo efecto se carga el condensador línea/tierra a un potencial del orden de 150 a 500 kV , según la altura de la línea con relación al suelo. Después de la caída del rayo entre la nube y la tierra, el campo eléctrico desaparece y las capacitancias se descargan.

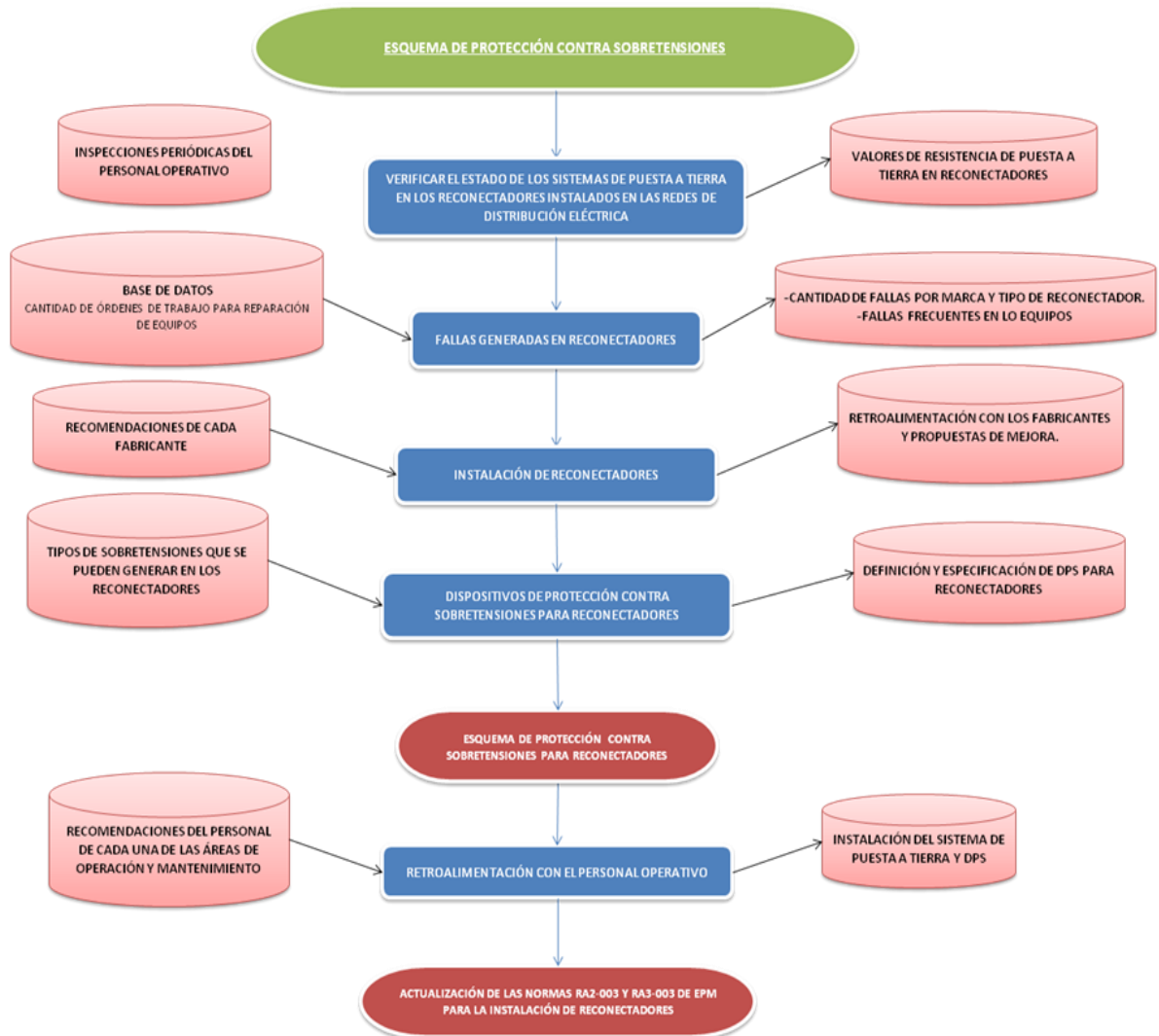
5. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO

El proyecto establece un esquema de protecciones para sobretensiones y especificación de los elementos de protección para re conectadores utilizados en las redes de distribución eléctrica de Empresas Públicas de Medellín E.S.P. Este esquema incluye el análisis de protecciones y las recomendaciones para la instalación de los elementos seleccionados con el fin de proteger los equipos contra sobretensiones para prevenir fallas y prolongar su vida útil.

6. METODOLOGÍA

En este proyecto se define la siguiente metodología para el proceso de identificación de mejora en los sistemas de protección contra sobretensiones para los equipos reconectadores. Ver la siguiente ilustración.

Ilustración 7. Diagrama de flujo del proceso de protección contra sobretensiones.



Fuente: Elaborado por el autor

Se realizaron mediciones de resistencia de puesta a tierra de los equipos instalados en subestaciones y redes de distribución en diferentes regiones del departamento de Antioquia, para analizar su valor respecto a los valores máximos

permitidos con relación a la normatividad vigente (NTC, RETIE y Normas EPM) en la instalación de reconectores como equipos de protección y maniobra, permitiendo realizar adecuaciones a los sistemas de puesta a tierra deficientes.

Se extrae información de histórica de fallas para definir características como frecuencia de falla, tipos de fallas, posibles causas de fallas y se plantearon acciones que ayuden a prevenir estos eventos.

Se definieron y se especificaron los dispositivos y elementos de protección contra sobretensiones, teniendo en cuenta el valor de resistencia de puesta a tierra, marca y tipo de reconector.

Se realizó un esquema de protección, con el cual se instalarán todos los reconectores en las redes de distribución.

El proyecto se retroalimentó con el personal que se encarga de la instalación y puesta en operación de los equipos en las Áreas de Distribución de EPM.

Se actualizaron las normas RA2-008 y RA3-008 de EPM para la instalación de reconectores en las redes de distribución energía de acuerdo a los resultados del proyecto y al aval técnico del Equipo Ingeniería de Proyectos del Área Ingeniería Distribución.

7. RESULTADOS

Con el trabajo realizado se establece un esquema de protecciones para sobretensiones y especificación de los elementos de protección para reconectores utilizados en las redes de distribución eléctrica de Empresas Públicas de Medellín E.S.P.

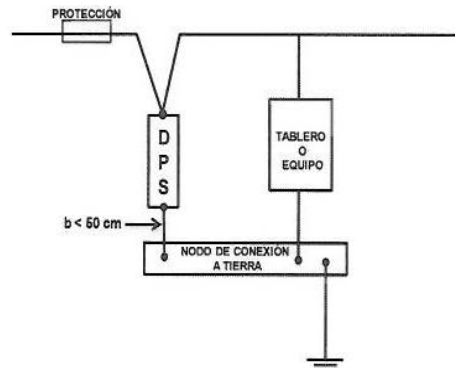
7.1 CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA INSTALACIÓN DE LA PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES

Los criterios definidos a continuación se deben aplicar para la instalación de los reconectores en las redes de distribución eléctrica de las Empresas Públicas de Medellín.

7.1.1 Instalación de DPS. Para la instalación de los DPS se debe tener en cuenta los siguientes criterios:

- Se deben instalar DPS en la entrada y en la salida del reconector con el fin de amortiguar las sobretensiones generadas por la operación normal del equipo. En el momento de la maniobra se establece un arco entre los contactos y el circuito queda sujeto a una impulsión de tensión correspondiente a la anulación brutal de las tensiones entre los bornes del equipo.
- Se instalarán DPS en el buje primario del transformador de alimentación de acuerdo a lo establecido en la norma RA3-026.
- Se instalaran DPS fase-tierra y neutro-tierra en la entrada de alimentación del control del reconector.
- Cuando el reconector sea comunicado al sistema SCADA por medio de un módem, radio, etc. Se debe instalar DPS para protección de sobretensiones de datos (Ethernet) en la entrada del puerto RJ45 del relé.
- Los DPS deben estar aterrizados por medio de la bajante principal del sistema de sistema de puesta a tierra del reconector
- La corriente nominal de descarga de los DPS de media tensión no debe ser inferior a los 10 kA y para los DPS de baja tensión (control) no debe ser inferior a los 5kA.
- Para la instalación de los DPS se debe tener como objetivo que la tensión residual sea casi igual a la tensión nominal del equipo, por lo cual la conexión entre el DPS y el equipo debe hacerse lo más corto posible y la conexión a tierra debe ser en lo posible no mayor a 50 cm, de acuerdo a lo establecido en el literal d) del artículo 20.14.2 del RETIE la conexión se debe realizar de acuerdo a la siguiente figura:

Ilustración 8. Instalación recomendada de los DPS.



Fuente: Tomado de Reglamento técnico de instalaciones eléctricas. RETIE.

- Los DPS deben quedar en modo común, es decir, entre fase y tierra.
- Los conductores de conexión para los DPS de media tensión no deben ser de calibre inferior a 6 AWG y los conductores de conexión de los DPS de baja tensión (control) no deben ser de calibre inferior a 14 AWG.

7.1.2 Sistema de puesta a tierra. El sistema de puesta a tierra tiene como objetivo establecer un camino de descarga con la menor resistencia posible para evitar que las intensidades de descargas circulen por otros caminos y afecte el normal funcionamiento de los elementos del reconectador.

Todo reconectador deberá tener un sistema de puesta a tierra en el cual estén conectados cada uno de los elementos que se hacen parte de él como lo son la potencia, el transformador de alimentación, el control y los DPS. El sistema de puesta a tierra debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- El bajante de tierra principal de estar separado físicamente del cable de control con un espacio mínimo de 150 mm.
- El cable de guarda o neutro del circuito debe estar aterrizado por medio del sistema de puesta a tierra del reconectador.
- Todos los elementos del aterrizamiento del reconectador y los DPS deben estar conectados a tierra a través del bajante principal.
- No se permiten otras conexiones a tierra desde el control ya que las corrientes de descarga también circularán por esos caminos.
- El transformador de alimentación y cualquier estructura metálica debe estar conectado al bajante principal de tierra, además un lado del secundario del transformador se aterriza a la tierra del panel de equipamiento dentro del gabinete de control.
- El calibre del conductor de puesta a tierra puede ser N° 4 AWG en cobre durante todo el recorrido. Se permite la utilización de otros materiales como

conductores (aluminio, aleaciones, etc.) siempre que se garantice su protección contra la corrosión y/o el valor de la resultante de la resistencia del conductor no comprometa la efectividad del sistema de puesta a tierra.

- El conductor de puesta a tierra debe ser continuo, sin interrupciones o medios de desconexión.
- Las conexiones que se realizan bajo el suelo se deben realizar con soldadura exotérmica o conector certificado para enterramiento directo.
- La unión entre el electrodo de puesta a tierra y el conductor se debe dejar accesible para realizar mediciones e inspecciones del sistema de puesta a tierra de forma periódica.
- El electrodo de puesta a tierra debe cumplir con los requisitos estipulados en el artículo 15.3.1 del RETIE.
- El sistema de puesta a tierra debe cumplir lo establecido en la norma RA6-010 de las Empresas Públicas de Medellín.
- Para las medidas de resistividad del suelo y resistividad del sistema de puesta a tierra se deben realizar de acuerdo a los procedimientos establecidos en las normas RA6-014 “Medida de resistividad eléctrica del suelo” y RA6-015 “Medida resistencia de puesta a tierra” de las Empresas Públicas de Medellín.
- De acuerdo a lo establecido en el artículo 15 del RETIE, la resistencia de puesta a tierra establecida como referencia para los sistemas de distribución es de 10 Ohmios, por lo cual se adopta este valor como máximo para el sistema de puesta a tierra de los reconectores. Sin embargo, dado que técnica y económicamente en algunos sitios del sistema que poseen altos valores de resistividad del suelo, será no práctico obtener dicho valor, por lo tanto, el reglamento establece que se debe garantizar que las tensiones de paso y contacto aplicadas al ser humano, en caso de una falla a tierra, no superen las máximas permitidas de acuerdo a lo establecido en la norma ANSI/IEEE 80.

En la siguiente tabla se muestran las condiciones técnicas de las normas EPM antes y después del planteamiento de este proyecto.

Tabla 14. Condiciones técnicas de las normas EPM antes y después del planteamiento de este proyecto.

INSTALACIÓN RECONECTADORES NORMAS EPM RA2-008 y RA3-008			
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	ANTES	AHORA
1	DPS en la entrada y en la salida del reconectador.	X	X
2	Especificación de la instalación del transformador de alimentación		X
3	Instalación de DPS fase-tierra y neutro-tierra en la entrada de alimentación del control del reconectador.		X
4	Instalación de DPS para protección de datos, cuando los equipos se comunican al sistema SCADA		X
5	El aterrizamiento de los DPS es por medio de la bajante principal del sistema de puesta a tierra del reconectador	X	X
6	La corriente nominal de descarga de los DPS de media tensión no puede ser inferior a los 10 kA.	X	X
7	La corriente nominal de descarga de los DPS de baja tensión no puede ser inferior a los 5 kA.		X
8	La instalación de los DPS se debe hacer lo más corto posible y la conexión a tierra debe ser en lo posible no mayor a 50 cm.		X
9	Los DPS se instalan en modo común, es decir, entre fase y tierra.	X.	X
10	El calibre de los conductores de conexión de los DPS de media tensión es de 4 AWG.	X	X
11	El bajante de tierra principal de estar separado físicamente del cable de control con un espacio mínimo de 150 mm.		X
12	El cable de guarda o neutro del circuito debe estar aterrizado por medio del sistema de puesta a tierra del reconectador	X	X
13	Todos los elementos del reconectador y los DPS deben estar conectados a tierra a través del bajante principal.	X	X
14	No se permiten otras conexiones a tierra desde el control ya que las corrientes de	X	X

INSTALACIÓN RECONECTADORES NORMAS EPM RA2-008 y RA3-008			
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	ANTES	AHORA
	descarga también circularán por esos caminos		
15	El transformador de alimentación y cualquier estructura metálica debe estar conectado al bajante principal de tierra, además un lado del secundario del transformador se aterriza a la tierra del panel de equipamiento dentro del gabinete de control	X	X
16	El calibre del conductor de puesta a tierra puede ser N° 4 AWG en cobre durante todo el recorrido	X.	X
16	El valor de máximo de la resistencia de puesta a tierra es de distribución es de 10 Ohmios	.	X
18	La unión entre el electrodo de puesta a tierra y el conductor se debe dejar accesible para realizar mediciones e inspecciones del sistema de puesta a tierra de forma periódica.	X	X
19	Las conexiones que se realizan bajo el suelo se deben realizar con soldadura exotérmica o conector certificado para enterramiento directo	X	X
20	El conductor de puesta a tierra debe ser continuo, sin interrupciones o medios de desconexión	X	X

Fuente: Elaborado por el autor

7.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES

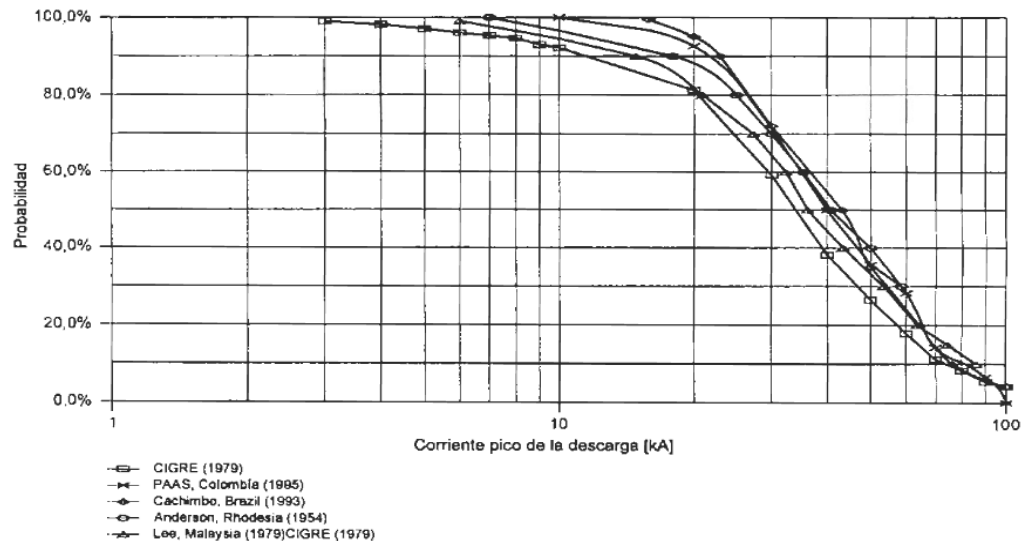
Los DPS utilizados para proteger los reconectores contra sobretensiones deben cumplir con las características técnicas que se describen a continuación.

7.2.1 DPS para media tensión (13.2 kV y 44 kV). Los DPS que se deben instalar en la entrada y en la salida del reconector con el fin de amortiguar las sobretensiones generadas por la operación normal del equipo y en buje primario

del transformador de alimentación deben cumplir con las siguientes características técnicas:

- La norma de fabricación y ensayos debe ser la NTC 4389, IEC 60099-4 o ANSI/IEEE C62.11.
- Las pastillas deben ser de óxido de Zinc.
- El número de columnas debe ser 1.
- El tipo de aislamiento exterior (envolvente o housing) debe ser en material polimérico o caucho siliconado moldeado directo.
- De acuerdo con la curva de probabilidad acumulada de corriente de retorno negativa, comparativa entre países ubicados en zonas templadas (CIGRE) y ubicados en zonas tropicales de la NTC 4552-1, la corriente nominal de descarga debe ser de al menos 10 kA, con un frente de onda 8/20 μ s. Este valor es tomado de la siguiente gráfica:

Gráfica 10. Curva de probabilidad acumulada de corriente de retorno negativa, comparativa entre países ubicados en zonas templadas (CIGRE) y ubicados en zonas tropicales



Fuente: Tomado de la Norma Técnica Colombiana NTC 4552 – 1 p. 30

- La frecuencia de operación nominal debe ser de 60 Hz.
- Debe incluir herraje de sujeción.
- Deben tener integrado el desconectador.
- Deben ser tipo distribución (según IEEE C62.11) apto para trabajo pesado e instalación a la intemperie.

- La clase de descarga de línea (LDC) debe ser 1 de acuerdo a la IEC60099-4, apto para instalación a la intemperie.
- Los DPS para sistemas trifásicos a 13.2 kV o monofásicos a 7.62 kV deben tener una tensión nominal de 12 kV y una tensión máxima de operación (MCOV o U_c) mínimo de 10.2 kV.
- Los DPS para sistemas trifásicos a 44 kV deben tener una tensión nominal de 60 kV y una tensión máxima de operación (MCOV o U_c) mínimo de 48 kV.

7.2.2 DPS para baja tensión (240 V y 120 V). Los DPS que se instalen en la entrada de alimentación del control (fase-tierra y neutro-tierra) deben cumplir con las siguientes características técnicas:

- La norma de fabricación y ensayos deberá ser ANSI/IEEE C62.41, ANSI/IEEE C62.34, IEC61643-1 o IEC61643-12.
- Apto para instalaciones en interiores y exteriores
- Deben tener una tensión nominal de 120 V / 240 V de tres hilos
- La corriente nominal de descarga debe ser de 34 kA con un frente de onda 8/20 μ s
- El método de conexión debe ser en paralelo con un conductor no inferior a 14 AWG
- La temperatura de funcionamiento debe ser de -40°C a 65°C.
- La frecuencia de operación nominal debe ser de 60 Hz
- La tensión máxima de operación (MCOV o U_c) Línea-Línea debe ser de 300 V.
- La tensión máxima de operación (MCOV o U_c) Línea-Neutro debe ser de 150 V.
- Debe poseer led de indicación de estado para el diagnóstico del DPS.

7.2.3 DPS para protección de sobretensiones de datos (Ethernet). Los DPS que se instalen cuando el reconector sea comunicado al sistema SCADA por medio de un módem, radio, etc. Deben cumplir con las siguientes características técnicas:

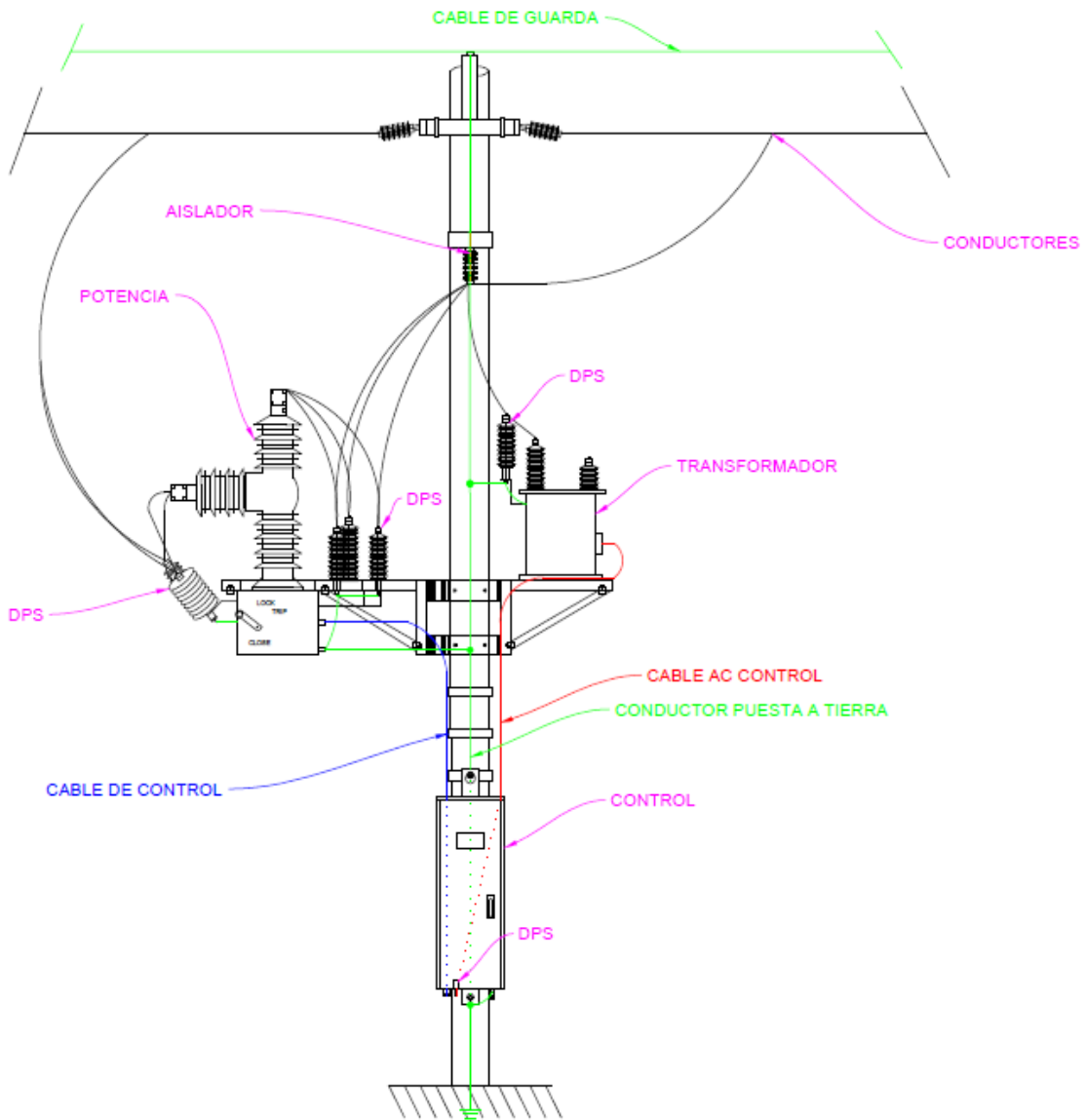
- El protector de datos debe ser Ethernet 10/100 base T
- La temperatura de funcionamiento debe ser de -40°C a 75°C.
- La tensión máxima de operación (MCOV o U_c) debe ser de 5 V
- Debe tener protección de todos los pines
- De tener entrada y salida con conector RJ45, categoría 5
- La supresión de picos debe ser menor a 25 V
- Debe ser para montaje en riel DIN
- La norma de fabricación y ensayos deberá ser IEC61000-4-5, IEC61643-21, IEEE 802-3af

- La corriente de descarga nominal debe ser de 500 A línea-línea con un frente de onda de 8/20 μ s y de 2000 A línea-tierra con un frente de onda de 8/20 μ s

7.3 ESQUEMA DE PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES

En la siguiente ilustración se muestra el esquema de protección seleccionado para proteger los reconvertidores contra sobretensiones.

Ilustración 9. Esquema de protección seleccionado



Fuente: Elaborado por el autor.

8. CONCLUSIONES

Con la implementación del esquema de protección contra sobretensiones se ha reducido en un 25 % el índice de fallas en reconectores durante el último semestre del año 2013, en relación con las fallas presentadas durante el primer semestre del mismo año.

Se definieron y se especificaron los dispositivos y elementos de protección contra sobretensiones, teniendo en cuenta el valor de resistencia de puesta a tierra, marca y tipo de reconector.

Se realizó un esquema de protección, con el cual se instalarán todos los reconectores en las redes de distribución.

El proyecto se retroalimentó con el personal que se encarga de la instalación y puesta en operación de los equipos en las Áreas de Distribución de EPM.

Se actualizaron las normas RA2-008 y RA3-008 de EPM para la instalación de reconectores en las redes de distribución energía de acuerdo a los resultados del proyecto y al aval técnico del Equipo Ingeniería de Proyectos del Área Ingeniería Distribución.

BIBLIOGRAFÍA

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Reglamento técnico de instalaciones eléctricas. Bogotá D.C.: El Ministerio, 2013. 208 p.

COOPER POWER SYSTEM. Manual Reclosers Form 6 Microprocessor. USA: 2005.

ENTEC ELECTRIC & ELECTRONIC CO. LTD. Manual EPR Automatic Recloser. Korea: 2007.

IEEE STANDARDS ASSOCIATION. IEEE Standard Guide for the Application, Operation, and Maintenance of Automatic Circuit Reclosers. ANSI/IEEE C37.61. 1973.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Descargadores de sobretensiones (pararrayos) de óxido metálico sin espaciadores (GAPS) para sistemas de corriente alterna. Primera actualización. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 2005. 155p. NTC 4389.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Guía para mejorar el comportamiento bajo descargas tipo rayo de las líneas aéreas de distribución eléctrica. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 2006. 48 p. GTC 136.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (rayos). Parte 1. Principios generales. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008. 71 p. NTC 4552-1.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Requisitos para reconectores automáticos de circuito aéreos, montaje tipo pedestal, de bóveda seca y sumergibles e interruptores de falla para sistemas de corriente alterna hasta de 38 Kv. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 2006. 34 p. NTC 5426.

JOSLYN HI-VOLTAGE CORPORATION. Manual Recloser Trimond 100. USA: 2007.

NOJA POWER SWITCHGEAR PTY LTD. Manual Reconector Automático OSM. Australia: 2008.

RAMÍREZ, Carlos Felipe. Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión. Segunda Edición. Colombia: 1991.

SCHNEIDER ELECTRIC, Manual Reconector Serie U. Australia: 2010.

ZAPATA CASTRILLÓN, Will Henry. Coordinación de protecciones en sistemas de distribución energía EPM. Primera Edición. Colombia: 2011.

CIBERGRAFÍA

SÁNCHEZ, Juan Rubio. Coordinación energética entre descargadores [en línea]. [Citado en Noviembre de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.dehn.es/pdf/newsletter/nl2_2012/coordinacion_energetica.pdf>