

ESTUDIO DE LOS ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE LOS DESCARGADORES DE ZnO

Redroban Amores Siomara L.
Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE

Resumen: El presente estudio tiene como propósito analizar alternativas que permitan mejorar los índices de calidad de los alimentadores primarios de distribución, disminuyendo el número de aperturas ocasionadas por descargas atmosféricas, para este análisis se utiliza la aplicación Simulink del Software Matlab, en la cual se modela el comportamiento de los distintos elementos que conforman las redes aéreas frente a sobrevoltajes de tipo atmosférico, esto es: descargador de ZnO, el transformador monofásico, trifásico, elementos de protección de sobrecorriente (Fusible), sistema de puestas a tierra, poste y estructuras de soporte; para validar estos modelos se analizó un tramo del alimentador Pilishurco de la Empresa Eléctrica Ambato, el cual presenta el mayor índice de fallas de este tipo por cuanto está ubicado en la cima del cerro del mismo nombre el cual tiene un alto nivel cerámico. Como resultado del análisis se obtuvo el mejor esquema de conexión de los elementos de protección de sobrevoltaje tanto para redes monofásicas como trifásicas

Palabras Clave— Sobrevoltajes en Redes de Distribución, Descargador ZnO, Descargas Atmosféricas, Modelamiento en Simulink.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas más frecuentes que se presentan en los alimentadores aéreos de distribución son los efectos ocasionados por descargas atmosféricas, principalmente los relacionados con los sobrevoltaje directos o inducidos de tipo atmosférico provocados por las corrientes de rayos, los cuales al superar el Voltaje de Flameo de Impulso Crítico (VFIC) de línea ocasionan la falla del aislamiento provocando un cortocircuito fase-tierra, lo cual desencadena en la falla definitiva del aislamiento y problemas de apriete mecánico en puntos de conexión, si la descarga ocurre en el troncal principal esto ocasiona la apertura del alimentador desde la cabecera, y al existir una gran cantidad de aisladores y puntos de empalme hace que se dificulte la ubicación de la falla y esto sumado al difícil acceso a estas redes, aumenta el tiempo fuera de servicio del alimentador empeorando los índices de frecuencia y tiempo de interrupciones. [1]

Uno de los aspectos más importantes a ser tomados en cuenta es el rayo, ya que es un fenómeno que sus características no son determinísticas y obedecen leyes probabilísticas con lo cual sus efectos son aleatorios, y los parámetros más importantes que inciden en la severidad de los efectos del rayo son el pico de corriente y el tiempo del frente de onda [2], por lo mismo para evitar los efectos dañinos en la línea es necesario realizar el estudio de los esquemas de conexión de los descargadores con relación al rayo ya que mediante el modelamiento de sus elementos principales como son los descargadores, puestas a tierra, transformadores, fusibles, aisladores, etcétera, se podrá elegir el mejor esquema de conexión de los elementos de sobrevoltaje y también el número y la distancia entre los descargadores que se deben instalar a lo largo del alimentador.

Debido a los efectos que producen los sobrevoltajes en una red eléctrica se han realizado diferentes estudios alrededor del mundo, mediante el modelamiento de las redes, como son: el Análisis de disturbios en redes de distribución utilizando Matlab y ATP este estudio fue realizado en el 2011[3], con el fin de analizar los sobrevoltajes en las redes de distribución.

Uno de los estudios importantes realizados en el año 2009 es el estudio de descargadores para la protección de transformadores de distribución en la ciudad de Bell, donde se analiza la distancia entre descargadores de distribución con las distancias recomendadas por el CIGRE y la IEEE [4].

Otro de los estudios con respecto a las protecciones contra sobrevoltaje es el estudio de protección contra descargas atmosféricas en líneas de distribución realizado en el 2008, aquí se realiza el modelo de una red de distribución donde se analiza el efecto de la variación de la resistencia de puesta a tierra en la red. [5]

En el Modelamiento de voltajes inducidos por rayos en redes de distribución se analiza la solución de problemas de calidad de energía y se implementa en un programa de transitorios (ATP/EMTP), fue realizado en el 2001 [6], en el año 2006 se realizó un estudio de fallas de descargadores tipo poste en una estación de servicio de transformación debido a sobrevoltajes por ferroresonancia, donde se modela en ATP la estación de transformación para analizar el efecto del sobrevoltaje por conmutación en el transformador [7], otro de los estudios realizados por los miembros de la IEEE es el estudio de los sobrevoltajes transferidos al secundario de un transformador de distribución debido a una descarga directa en la línea de MV, considerando diferentes configuraciones de líneas de BV fue realizado en el 2009 [8].

El Análisis de transitorios en redes de distribución de MV de SRI LANKA, es un estudio de los elementos de protección contra sobrevoltajes debido a fallas de los descargadores y aisladores al momento del impacto del rayo este estudio fue realizado en 2009 por la IEEE. [9], en las Journal of Lightning Reserch del año 2007 se realizó un estudio de las descargas directas en una línea de transmisión considerando los mecanismos de formación de sobrevoltajes y su influencia en la línea [10].

En la sección II, se realiza una revisión de la teoría de sobrevoltajes de origen atmosférico, en la sección III, se detallan cada uno de los modelos que representan los elementos eléctricos que conforma de una red de distribución MV, mientras que en la sección IV, se explica el caso de estudio y la validación de los modelos en un alimentador y finalmente en la sección V, se presenta los resultados obtenidos de la simulación.

II. SOBREVOLTAJE DE ORIGEN ATMOSFÉRICO

A. Descargas Atmosféricas

Este tipo de fenómenos transitorios son producidos por efectos del rayo que al caer directo o en un punto cercano de la línea aérea, da lugar a una onda viajera de sobrevoltaje, los cuales son los más severos ya que alcanzan valores altos de voltaje, y su magnitud puede superar al BIL (Nivel Básico de Aislamiento), lo cual es perjudicial para el aislamiento de los equipos que están conectados a la red y ocasionan cortes de suministro de energía por la actuación de las protecciones de sobrecorriente. [11]

B. Descargas Directas

Este tipo de sobrevoltajes son los menos frecuentes en las instalaciones, pero son los que pueden causar los daños más graves, debido a la enorme cantidad de energía, que trae consigo una descarga atmosférica, ya que el impacto es directo en la línea aérea. Las corrientes que se presentan por este tipo de descarga, pueden alcanzar valores hasta de 200 kA instantáneos con frentes de onda muy alto que introducen enormes esfuerzos dinámicos y térmicos en las instalaciones, en la Fig. 1a) se puede observar una descarga directa a la línea de distribución. [12]

C. Descargas Indirectas

Las descargas indirectas son aquellas que no impactan directamente a la línea, pero que retornan por un canal ionizado cercano a la línea (dentro de un radio de aproximadamente 200m) como se observa en Fig. 1b). El cambio brusco del campo electromagnético producido por la circulación de la corriente de retorno induce en la línea una sobretensión de tipo transitorio. Este tipo de voltaje es el más frecuente y puede ser grave dependiendo de la intensidad de descarga, ya que de registros de mediciones realizadas en el campo se sabe que los sobrevoltajes son del orden de 100 y hasta 200 kV con corrientes de 25 a 100 kA pico.

El voltaje pico inducido está en función de los siguientes parámetros:

- El pico y el tiempo de frente de onda (cresta) de la corriente de descarga de retorno.
- La velocidad de la descarga de retorno.
- La altura de la línea.
- La distancia de la descarga a la línea

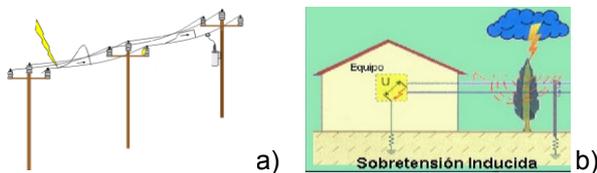


Fig. 1 Descarga directa e indirecta de un rayo.

III. MODELOS DEL ALIMENTADOR PRIMARIO

Para el análisis del comportamiento de los sistemas eléctricos frente a transitorios de sobrevoltaje tradicionalmente se ha utilizado el programa ATP (Automatic Transient Program), el cual dispone en su librería de los componentes para los sistemas eléctricos de potencia, pero no dispone de elementos para los sistemas

de distribución. Por ello en el presente estudio se utiliza el programa Matlab con su aplicación Simulink, en el cual se puede fácilmente crear cada uno de los componentes de las redes de distribución y de los esquemas de conexión de la protección de sobrevoltaje asociada a detalle y poder así evaluar su comportamiento en diferentes escenarios frente a transitorios de sobrevoltajes.

A. Modelo del Rayo

Para modelar el rayo es necesario calcular el pico de sobrevoltaje según la Norma IEEE STD. 1410, mediante la corriente del rayo, este voltaje puede aparecer por conducción (Descarga Directa) o de forma radiada (Inducido) con una descarga a tierra cercana a la línea, cuyo valor está en función de la distancia más cercana del punto impacto a la línea, como se presenta en la Ec. 1. [2]

$$V_{max} = \frac{Z_0 I_0 h}{y} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v}{v_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{v_0} \right)^2}} \right) \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

Z_0 es $1/(4\pi) \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 30\Omega$, Impedancia de la línea para ondas viajera $[\Omega]$

I_0 Pico de corriente de rayo [kA]

h Altura promedio de la línea de distribución con respecto al nivel del piso [m]

y Distancia entre la línea y el rayo [m]

v velocidad del rayo [m/s]

v_0 velocidad de la luz [m/s]

La Ec. 2 que se muestra a continuación es la simplificación de la Ec. 1, esta ecuación facilita el cálculo del voltaje provocado por el rayo.

$$V_{max} = 38,8 \frac{I_0 h_a}{y} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

I_0 : Pico de corriente del rayo [kA]

h_a : Altura promedio desde el nivel de tierra hacia la línea [m]

y : Distancia entre la línea y el rayo [m]

Para el cálculo de la distancia entre la línea y el rayo (y), es necesario analizar la Ec. 3 mediante las ecuaciones Ec. 4 y Ec. 5, para obtener la distancia de la línea de distribución respecto a la descarga ya sea directa o indirecta.

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_s - h)^2} \quad \text{Ec. 3}$$

$$r_s = 10 * I_0^{0.65} \quad \text{Ec. 4}$$

$$r_g = 0.9 r_s \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

r_s distancia de la descarga y el conductor [m]

r_g distancia de la descarga y la tierra [m]

I_0 Pico de corriente de la descarga (kA)

El modelo matemático del sobrevoltaje del rayo que en este caso va a ser un impacto directo, se desarrolla

esquemáticamente mediante bloques en la aplicación Simulink tal como se observa en la Fig. 2, en el cual se ingresa valores de cada uno de los parámetros de la ecuación tales como: el voltaje máximo, el signo (descarga positiva o negativa), la tabla de valores que representa la forma de la onda en el dominio del tiempo, voltaje RMS de la red, la frecuencia y el ángulo de desfase al que inicia el sobrevoltaje.

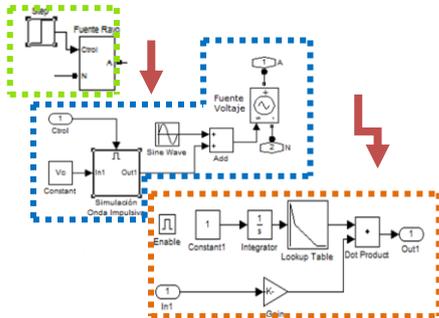


Fig. 2 Modelo del Rayo en Simulink

B. Modelo de los descargadores de ZnO

Este modelamiento es muy importante por cuanto se determina el margen de protección efectivo y el comportamiento de las protecciones de sobrecorriente asociadas, por lo cual en el presente estudio únicamente se modela los descargadores de ZnO, debido a que son los más utilizados en la actualidad y con estos analizar las protecciones a lo largo de la línea.

El modelo de los descargadores de ZnO, está disponible en las librerías de Simulink como se muestra en la Fig. 3.

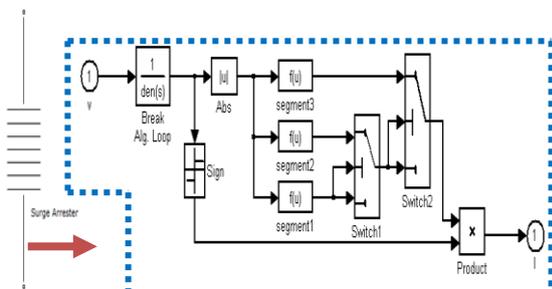


Fig. 3 Modelo de un descargador de SimPowerSystem.

En este bloque se representa únicamente la característica no lineal V-I del descargador de óxido metálico, la cual se puede modelar bajo la siguiente ecuación matemática (Ec. 6).

$$\frac{V}{V_{ref}} = k_i \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{1/\alpha_i} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

- V_{ref} = Voltaje de Referencia [kV]
- I_{ref} = Corriente de Referencia [kA]
- k_i = Factor k para segmento i
- α_i = Factor α para segmento i
- V = Caída de Voltaje en el descargador [kV]
- I = Corriente que atraviesa el descargador [kV]

Los parámetros ingresados en el modelo del descargador de 10 kV de Oxido de Zinc clase distribución tipo Normal

Duty de la marca OHIO/BRASS se obtuvo de los catálogos. En la Tabla No. 1 se muestra los parámetros considerados en el modelamiento del descargador. [13]

Tabla No. 1 Parámetros para el modelamiento del descargador

| I _{ref} | 0.0042 | Segmento | I _{lim} [A] | α _i | k ₁ |
|------------------|-----------|----------|----------------------|----------------|----------------|
| V _{ref} | 14.285714 | Segm 1 | 0.0004 | 3.5 | 3.5 |
| | | Segm 2 | 8 | 51.6 | 1.3 |
| | | Segm 3 | 80000 | 15.81 | 0.9 |

En el modelo del descargador se considera la capacitancia del aislamiento que lo recubre, así como la inductancia propia que se presenta durante el recorrido de la corriente que drena a tierra, tal como se presenta en la Fig. 4. [6].

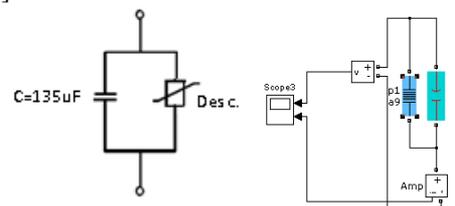


Fig. 4 Modelo de un descargador de Oxido Metálico

C. Modelo del Fusible

Para modelar el comportamiento del fusible frente a un sobrevoltaje atmosférico, se considera como un elemento de energía constante para su dilatación y apertura [14], ya que se puede elegir un fusible en función de la energía que soporta antes de fundirse, por ello se considera una energía de 20 kJ de un fusible Dual 1.4 que se utiliza para un transformador de 25 kVA monofásico; estos datos se ingresan en el modelo que se muestran en la Fig. 5.

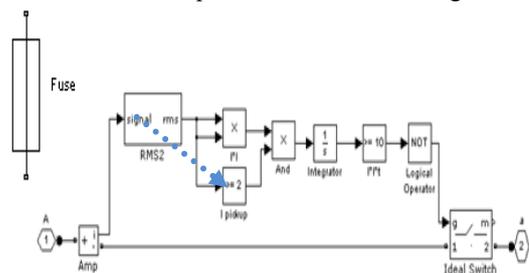


Fig. 5 Modelo del Fusible

D. Modelo de la Puesta a Tierra

Para el modelamiento del sistema de puesta a tierra se considera la inductancia del conductor de la bajante en serie con la resistencia eléctrica del arreglo los electrodos y contrapesos insertados en el suelo como se presenta en la Fig. 6 [6].

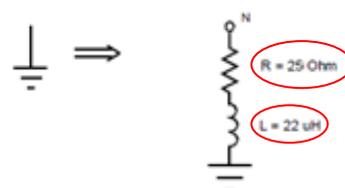


Fig. 6 Modelo de puesta a tierra de la fuente

E. Modelo de los transformadores de Distribución

El objetivo de modelar los transformadores de distribución es para considerar el efecto capacitivo por parte del aislamiento de los bushings de MV e inductivo por parte de la bobina del transformador frente a un sobrevoltaje atmosférico, y con ello poder analizar la incidencia de los esquemas de conexión de los descargadores en estos equipos así como también el comportamiento de fusibles asociados.

En simulink existe el modelo matemático simplificado de un transformador al cual se le agrego el efecto capacitivo como se representa en la Fig. 7.

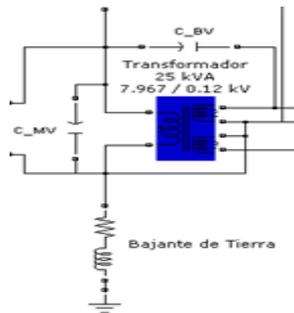


Fig. 7 Modelamiento completo de un transformador monofásico.

F. Modelo de la Línea de Distribución

Para el análisis del comportamiento de las líneas aéreas de distribución frente a transitorios de alta frecuencia como son los sobrevoltajes originados por rayos los cuales poseen una frecuencia que está en el orden de 10 kHz a 3 MHz, se requieren de modelos en los cuales los parámetros eléctricos de la línea sean dependientes de la frecuencia, actualmente se disponen varios modelos matemáticos tales como: J' Martin, Bergeron y Nodales principalmente. [15]

Para este estudio se elige el modelo de parámetros distribuidos, que se basa en el método de ondas viajeras de Bergeron disponible en Simulink y ATP, este modelo esta caracterizado por los valores de la impedancia característica y la velocidad de la onda, tal como se muestra en la Fig. 8 a).

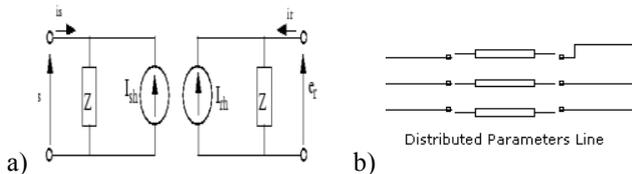


Fig. 8 a) Modelo de parámetros distribuidos de Bergeron y b) Bloque en simulink

Este bloque en Simulink se llama "Línea de Parámetros Distribuidos" como se muestra en la Fig. 8 b), para esto es necesario ingresar los valores de la frecuencia, resistencia, inductancia y capacitancia de secuencia positiva y cero de la línea, y la longitud del vano.

G. Modelo de la Estructura de Soporte

Para el análisis de sobrevoltajes de impulso a las estructuras de soporte de las líneas aéreas de distribución se considera en conjunto al poste, cruceta y aisladores de suspensión y/o soporte "pines", tal como se observa en la Fig. 9.

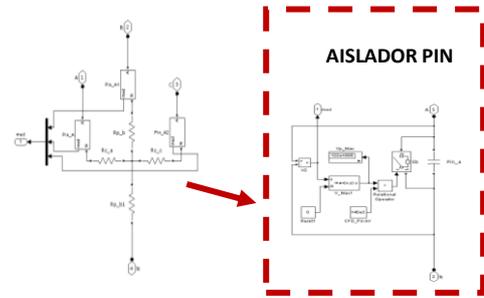


Fig. 9 Modelo del Poste, Cruceta y Aisladores

El poste hormigón se considera como un elemento estático, con una impedancia al impulso eléctrico que se obtiene de la Ec. 7 [16].

$$Z_t = 30 * \ln \left[\frac{2(h^2+r^2)}{r^2} \right] = 283.72\Omega \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

Z_t= Impedancia del poste (Ω)

h= Altura del poste (m)

r= Radio del poste (m)

En este estudio se considera postes de hormigón de una altura de 12m y un radio de 15cm, con lo que se obtiene una impedancia de 283.72 [Ω].

La resistencia de la cruceta se calcula con la resistividad del aluminio de 0.028 [Ω.mm²/m], una longitud de 2.4 m y 7*3 mm² de la sección transversal, dando como resultado 0.0032 [Ω].

Para los aisladores tanto de suspensión como pines se considera como un capacitor en paralelo con un switch controlado por voltaje para simular la ruptura del aislamiento al presentar voltajes superiores al voltaje de flameo de impulso crítico VFIC, que para el presente estudio se considera un valor de 140 kV para un aislador Pin ANSI 55-5 tomado de la Norma IEEE 1410 Std.[2].

IV. CASO DE ESTUDIO

Para validar los modelos de los esquemas de conexión de los descargadores en los alimentadores, se analiza el tramo de mayor ocurrencia de rayos del Alimentador Pilishurco de la EEASA, ya que en la ciudad de Ambato este alimentador presenta el mayor índice de fallas de tipo atmosférico.

El Alimentador Pilishurco parte de la subestación Atocha, con un nivel de voltaje de operación de 13800 voltios, con una construcción aérea trifásica de 25 km de longitud que permite suministrar el servicio eléctrico a 180 clientes, de los cuales el 75% son de tipo residencial ubicados en los sectores de Laquigo, San José, San Francisco y Constantino Fernández de la Parroquia Augusto N. Martínez, y el 25% de clientes restantes corresponden a clientes comerciales correspondientes a antenas de telecomunicaciones de diferentes medios, ubicados al final de este alimentador en la cumbre del cerro Pilishurco, este alimentador consta de aproximadamente 300 poste.

Para el presente estudio se realiza el modelamiento de los esquemas dividiendo por casos, como se muestra en la Tabla No. 2, para cada esquema se clasifico según el tipo de transformador es decir, si es un transformador

autoprotegido, un transformador convencional con fusible en serie con el descargador o con fusible en paralelo con el descargador, todo esto con respecto al tipo de conexión a tierra, es decir puede ser con bajante directo a tierra, bajante de tierra a través del tanque o bajante a tierra mallado al tanque y al neutro.

Los casos de estudio comprenden 9 esquemas monofásicos y 2 esquemas trifásicos como se muestra en la Tabla No. 2 los cuales se modelaron en Simulink, para analizar el comportamiento de cada uno de ellos frente sobrevoltajes y determinar así el esquema más apropiado para mejorar los índices de calidad.

Tabla No. 2: Casos de los esquemas de conexión de los descargadores.

| Nº | Caso | Descripción |
|----|------|--|
| 1 | A1 | Transformador Monofásico Autoprotegido con Bajante directo a tierra |
| 2 | A2 | Transformador Monofásico Autoprotegido con Bajante de tierra a través del tanque |
| 3 | A3 | Transformador Monofásico Autoprotegido con Bajante de tierra mallada al tanque y al neutro |
| 4 | B1 | Transformador Monofásico Convencional con el fusible al lado de la fuente con Bajante directo a tierra |
| 5 | B2 | Transformador Monofásico Convencional con el fusible al lado de la fuente con Bajante de tierra a través del tanque |
| 6 | B3 | Transformador Monofásico Convencional con el fusible al lado de la fuente con Bajante de tierra mallada al tanque y al neutro |
| 7 | C1 | Transformador Convencional con el fusible en paralelo al descargador con Bajante directo a tierra |
| 8 | C2 | Transformador Monofásico Convencional con el fusible en paralelo al descargador con Bajante de tierra a través del tanque |
| 9 | C3 | Transformador Trifásico Convencional con el fusible en paralelo al descargador con Bajante de tierra mallada al tanque y al neutro |
| 10 | D | Transformador Trifásico con conexión del fusible al lado de fuente |
| 11 | E | Transformador Trifásico con conexión del fusible el fusible en paralelo al descargador |

A modo de ejemplo se observa en la Fig. 10 uno de los esquemas de conexión presentados en la tabla anterior, en la cual se puede visualizar un transformador monofásico convencional con el fusible al lado de la fuente, con bajante de tierra mallada al tanque y al neutro; estos detalles permiten evaluar el nivel de protección al transformador y la operación o no del fusible asociado al descargador de ZnO.

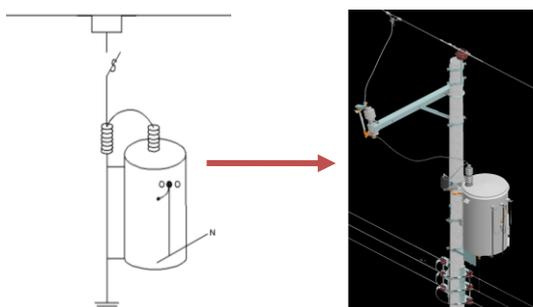


Fig. 10. Modelo del Esquema de Conexión del Descargador

Para el análisis del modelo completo, se modeló el tramo con mayor probabilidad de ocurrencia de rayos, con el propósito de evaluar la dispersión de la onda de

sobrevoltaje a lo largo de este, y determinar cuántos elementos de sobrecorriente se verían afectados por la actuación de los descargadores asociados, y así también el efecto que tiene hacia los aisladores, para ello se realiza un diagrama esquemático de cada uno de los tramos más representativos y con los equipos involucrados en el alimentador Pilishurco.

El esquema que se observa en la Fig. 11 representa el modelo completo desarrollado en Simulink el cual está formado por cada uno de los modelos detallados en la sección III, con sus parámetros respectivos y se evalúa en diferentes escenarios con el mismo punto de caída del rayo, es decir con descargadores y sin descargadores.

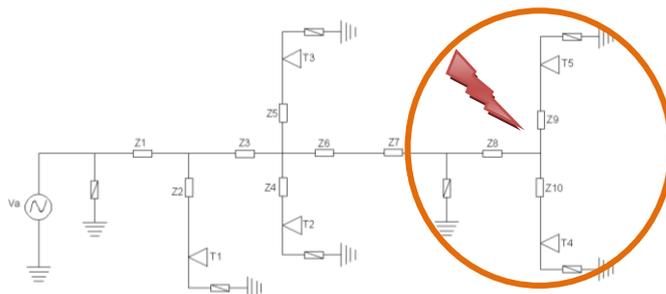


Fig. 11 Diagrama Esquemático del Tramo más Representativos del Alimentador Pilishurco.

V. ANALISIS DE RESULTADOS

Es importante indicar los valores calculados de pico de voltaje que inciden sobre la línea en función de las características de las corrientes del rayo, las cuales han sido establecidas en normas y estándares del CIGRE [2]. Es importante señalar las consideraciones que se tomaron en cuenta en los escenarios de estudio, los cuales son: una forma de onda 1.2/50 us, sobrevoltaje de un impacto directo del rayo de 30 kA y resistencia de puesta a tierra de 25 Ω esto para los 11 casos de esquemas de conexión y para el caso integral se utiliza el mejor esquema, como se observa en la Tabla No. 3.

Tabla No. 3. Tabla de Propuesta a Analizar del Tramo mas significativo del Alimentador Pilishurco con el Esquemas Elegido

| Escenario de Simulación del tramo más significativo del Alimentador Pilishurco con los esquemas elegidos | |
|--|--|
| Caso | Escenario |
| B3-D_1 | Parámetros: |
| B3-D_2 | <ul style="list-style-type: none"> • Impacto Directo en la fase B • Impacto en el Vano #5 |
| B3-D_3 | <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia de puestas a tierra de 25 Ω • Descargadores cada 290m |

A. Discusión de los Resultados del Modelamiento de los Esquemas de Conexión de los descargadores en los transformadores de distribución.

Para el análisis de los resultados de las simulaciones de los 9 esquemas de conexión de transformadores monofásicos y los 2 esquemas de transformadores trifásicos, se comparó los valores de pico de voltaje en el lado de MV y en el lado de BV, así como también los

valores de corriente que atraviesan el descargador, y con ello la operación o no del fusible. Obteniéndose que el Caso C3 presenta los valores de pico de voltaje más bajos tanto en el lado de MV como en el lado de BV con respecto a los casos A y B, por otro lado la corriente que drena el descargador es aproximadamente igual en los tres casos (A3, B3 y C3), lo cual no ocurre con los fusible del transformador por cuanto en los casos A y C el fusible se encuentra en paralelo al descargador mientras que en el caso B y D está en serie lo cual hace que la corriente que atraviesa el descargador sea la misma que atraviesa el fusible y dado que esta presenta un alto valor pico y con ello el $I^2.t$ lo cual provoca la apertura del fusible, como se observa la Tabla No. 4.

Tabla No. 4. Resultados de la simulación de los Casos

| Caso | Operación de Fusible | Vp.-LB [V] | Vp. DESC [kV] |
|------|----------------------|------------|---------------|
| A1 | No opera | 3281 | 31.41 |
| A2 | No opera | 466.8 | 30.32 |
| A3 | No opera | 462.3 | 30.33 |
| B1 | Si opera | 5841 | 30.23 |
| B2 | Si opera | 459.98 | 30.31 |
| B3 | Si opera | 457.7 | 30.31 |
| C1 | No opera | 5874 | 30.20 |
| C2 | No opera | 4568 | 30.31 |
| C3 | No opera | 456.6 | 30.31 |
| D | Si opera | - | 34.25 |
| E | No opera | - | 31.38 |

En la Fig. 12 se observa la curva del esquema monofásico elegido (Caso B3) donde se produce la apertura del fusible al momento del pico del rayo.

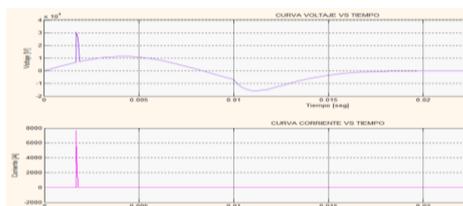


Fig. 12 Curva del Rayo en el Esquema del Caso B3

En la Fig. 13 se observa la curva del esquema trifásico elegido (Caso D3) donde se produce la apertura del fusible al momento del pico del rayo.

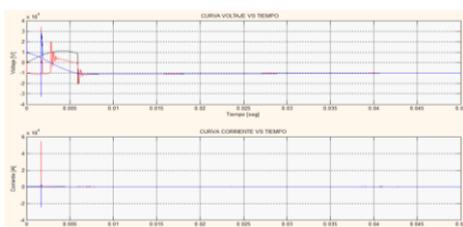


Fig. 13 Curva del Rayo en el Esquema del Caso D

La EEASA como todas las empresas distribuidoras se rigen a normas y estándares exigidos por su ente regulador que en este caso es el CONELEC en cuanto a los índices de calidad del producto técnico, por lo cual el objetivo del análisis se centra en mejorar los índices de calidad, FMIK (Frecuencia Media de Interrupción por kVA nominal instalado) y TTIK (Tiempo Total de Interrupción por kVA nominal instalado), resultando con este criterio el Caso B3 que tiene el fusible al lado de la fuente y el descargador en serie montado en el tanque del transformador el que mejor desempeño presenta para los índices, por cuanto al

momento que opera el descargador el fusible opera, con lo cual se funde y deja sin servicio solo a la zona que alimenta el transformador, esto disminuye la cantidad de kVA'S fuera de servicio y por lo tanto disminuye el FMIK del Alimentador, con esto se disminuye también el TTIK ya que al tener una solo zona fuera de servicio es mucho más rápido la ubicación de la falla y por lo tanto el tiempo que se demora en corregir la misma. [17]

En comparación de los Caso A3, C3 y E: que al estar el fusible en paralelo con el descargador no se funde como se observa en la Tabla No. 4, y si $I^2.t$ que drena el descargador supera su límite máximo, provoca que este se averíe definitivamente y pierda sus características no lineales y/o se perfore o explote el aislamiento provocando así un cortocircuito monofásico a tierra lo cual hace que las protecciones de sobrecorriente que se encuentra aguas arriba se accionen.

B. Discusión de los Resultados del Modelamiento del Alimentador Pilishurco Frente a Sobrevoltajes

En el análisis del caso completo en el que se modeló el tramo más significativo del alimentador se evidencian diferencias notables en el comportamiento según el rango de pico de corriente del rayo, esto es: de 10kA, 20kA y 30kA, evidenciándose aún más con la ubicación de cierto número de descargadores a lo largo de la línea a determinadas distancias, es importante mencionar que se simuló el impacto directo del rayo en la fase B del poste #4, en todos los escenarios.

La primera simulación consiste en un impacto directo en la fase B y un pico de corriente de rayo de 10kA en el poste #4, evidenciándose que el Sobrevoltaje que incide a la línea no supera CFO (140kV) de la estructura de soporte (Aislador, cruceta y poste) con lo que no se producen fallas y por ende no actúan las protecciones, tal como se presenta en la Tabla No. 5, esto considerando el esquema de conexión B3. Se concluye que el aislamiento de la línea está diseñado apropiadamente para soportar descargas de 10 kV no es necesario colocar descargadores a lo largo de la línea.

Tabla No. 5: Resultados del Modelo Completo para un Pico de Corriente de Rayo de 10kA

| TABLA DE RESULTADOS DEL MODELO COMPLETO | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------------------|--------------|-------------|-------------------|--------------|-------------|
| TRONCAL TRIFASICO | Poste | Fase | Sin descargadores | | | Con descargadores | | |
| | | | CASO B3 - D | | | CASO B3 - D | | |
| | | | Vp.-LM [kV] | Ip.-Des [kA] | Op. fusible | Vp.-LM [kV] | Ip.-Des [kA] | Op. fusible |
| | | | 1 | A | 49.69 | * | * | 31.71 |
| | B | 96.25 | * | * | 39.42 | 2.22 | * | |
| | C | 33.07 | * | * | 18.01 | 1.22 | * | |
| 2 | A | 49.82 | * | * | 26.91 | * | * | |
| | B | 99.85 | * | * | 46.72 | * | * | |
| | C | 33.10 | * | * | 21.90 | * | * | |
| 3 | A | 48.24 | * | * | 26.28 | 0.259 | * | |
| | B | 93.33 | * | * | 57.50 | 1.59 | * | |
| | C | 31.40 | * | * | 18.51 | 0.259 | * | |
| 4 | A | 47.03 | * | * | 24.34 | * | * | |
| | B | 94.94 | * | * | 65.46 | * | * | |
| | C | 30.62 | * | * | 24.42 | * | * | |
| 5 | A | 40.79 | * | * | 23.88 | 0.511 | * | |
| | B | 97.01 | * | * | 33.43 | 36.63 | * | |
| | C | 30.21 | * | * | 19.73 | 0.511 | * | |

| | | | | | | | | | |
|------------------------|------------------------|---|-------|-------|------|-------|-------|------|----|
| RAMAL #1 MONOFASICO | 6 | A | 35.20 | * | * | 23.42 | * | * | |
| | | B | 95.93 | * | * | 67.41 | * | * | |
| | | C | 30.27 | * | * | 25.74 | * | * | |
| | 7 | A | 40.75 | * | * | 26.25 | * | * | |
| | | B | 92.99 | * | * | 65.21 | * | * | |
| | | C | 31.03 | * | * | 25.17 | * | * | |
| | 8 | A | 39.45 | * | * | 26.46 | 0.229 | * | |
| | | B | 91.97 | * | * | 55.32 | 1.620 | * | |
| | | C | 31.14 | * | * | 21.31 | 0.232 | * | |
| | 9 | A | 37.62 | * | * | 25.69 | * | * | |
| | | B | 90.89 | * | * | 53.36 | * | * | |
| | | C | 31.86 | * | * | 22.11 | * | * | |
| | 10 | A | 38.52 | 0.649 | NO | 25.73 | 0.141 | NO | |
| | | B | 91.23 | 4.346 | NO | 57.86 | 1.99 | NO | |
| | | C | 39.16 | 0.026 | NO | 27.13 | 0.061 | NO | |
| | RAMAL #1 MONOFASICO | B | 1 | 45.86 | 1.92 | NO | 37.96 | 1.16 | NO |
| | | | 2 | 44.90 | * | * | 37.40 | * | * |
| | | | 3 | 35.60 | * | * | 32.01 | * | * |
| 4 | | | 38.81 | * | * | 31.70 | * | * | |
| 5 | | | 36.80 | * | * | 30.20 | * | * | |
| 6 | | | 36.52 | 0.55 | NO | 28.68 | 0.376 | NO | |

*La estructura no posee descargador ni fusible

En el segundo escenario se simula el tramo más significativo del alimentador Pilishurco Fig. 11, pero con un impacto directo con un pico de corriente de 20kA, donde se aplica la misma metodología de la propuesta anterior, en la que constan los valores de voltaje en el lado de MV, los valores de corriente y el efecto en los aisladores con y sin descargadores a lo largo de la línea como se observa en la Tabla No. 6.

Tabla No. 6: Resultados del Modelo Completo para un Pico de Corriente de Rayo de 20kA

| TABLA DE RESULTADOS DEL MODELO COMPLETO | | | | | | | | |
|---|-------|-----------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|-------------|----|
| Poste | Fases | Sin descargadores | | | Con descargadores | | | |
| | | CASO B3 - D | | | CASO B3 - D | | | |
| | | Vp _{LM} [kV] | Ip _{Des} [kA] | Operación fusible | Vp _{LM} [kV] | Ip _{Des} [kA] | Op. fusible | |
| TRONCAL TRIFASICO | 1 | A | 59.67 | * | * | 35.72 | 2.29 | * |
| | | B | 100.34 | * | * | 38.42 | 4.451 | * |
| | | C | 43.057 | * | * | 21.74 | 2.509 | * |
| | 2 | A | 58.97 | * | * | 31.25 | * | * |
| | | B | 95.43 | * | * | 60.43 | * | * |
| | | C | 42.26 | * | * | 23.87 | * | * |
| | 3 | A | 56.66 | * | * | 30.10 | 0.397 | * |
| | | B | 102.32 | * | * | 69.20 | 2.505 | * |
| | | C | 44.22 | * | * | 20.98 | 0.259 | * |
| | 4 | A | 55.55 | * | * | 30.70 | * | * |
| | | B | 103.10 | * | * | 89.42 | * | * |
| | | C | 43.80 | * | * | 31.46 | * | * |
| | 5 | A | 48.21 | * | * | 25.30 | 0.511 | * |
| | | B | 140.00 | * | * | 34.62 | 63.34 | * |
| | | C | 39.031 | * | * | 20.70 | 0.511 | * |
| | 6 | A | 49.12 | * | * | 30.19 | * | * |
| | | B | 111.69 | * | * | 89.51 | * | * |
| | | C | 51.44 | * | * | 31.04 | * | * |
| 7 | A | 46.18 | * | * | 31.79 | * | * | |
| | B | 105.62 | * | * | 88.61 | * | * | |
| | C | 48.20 | * | * | 31.51 | * | * | |
| 8 | A | 43.36 | * | * | 27.70 | 0.203 | * | |
| | B | 102.06 | * | * | 69.75 | 2.73 | * | |
| | C | 45.24 | * | * | 25.53 | 0.154 | * | |
| 9 | A | 40.57 | * | * | 27.12 | * | * | |
| | B | 92.89 | * | * | 63.30 | * | * | |
| | C | 37.40 | * | * | 26.75 | * | * | |
| 10 | A | 45.84 | 0.772 | NO | 34.15 | 0.218 | NO | |
| | B | 94.78 | 4.25 | NO | 67.95 | 2.63 | NO | |
| | C | 47.39 | 0.046 | NO | 34.07 | 0.066 | NO | |
| RAMAL #1 MONOFASICO | B | 1 | 44.89 | 1.82 | NO | 47.29 | 2.06 | NO |
| | | 2 | 44.13 | * | * | 47.55 | * | * |
| | | 3 | 36.12 | * | * | 37.29 | * | * |
| | | 4 | 36.71 | * | * | 36.95 | * | * |
| | | 5 | 35.19 | * | * | 34.84 | * | * |
| | | 6 | 34.05 | 0.555 | NO | 34.20 | 0.719 | NO |

*La estructura no posee descargador ni fusible

En el escenario que es sin descargadores a lo largo de la línea y con un pico de corriente de 20kA, se obtiene como resultado la falla del aislador más cercano al impacto del rayo, que se encuentra en el poste #5, el aislador falla debido a que el voltaje producido en la línea es mayor al CFO (140kV), y en cuanto a los esquemas de conexión elegidos la corriente no afecta a los fusibles del tramo trifásico ni al del tramo monofásico, lo que evita que existan zonas que se queden sin suministro eléctrico. Por otra parte en el escenario que comprende la instalación de descargadores cada 290m esto como resultado de simulaciones previas en las que se determinó la distancia óptima tomando en cuenta la longitud de los vanos en estudio y con el mismo pico de corriente, se obtuvo la protección del aislador más cercano y la disminución los voltajes residuales que se presentan a lo largo de la línea trifásica.

En el último escenario en el que se aplica un pico de corriente de 30kA, sin descargadores, y con descargadores cada 290m en la línea trifásica se obtiene los resultados de la Tabla No. 7.

Tabla No. 7: Resultados del Modelo Completo para un Pico de Corriente de Rayo de 30kA

| TABLA DE RESULTADOS DEL MODELO COMPLETO | | | | | | | | |
|---|------|-----------------------|------------------------|-------------|-----------------------|------------------------|-------------|----|
| Poste | Fase | Sin descargadores | | | Con descargadores | | | |
| | | CASO B3 - D | | | CASO B3 - D | | | |
| | | Vp _{LM} [kV] | Ip _{Des} [kA] | Op. fusible | Vp _{LM} [kV] | Ip _{Des} [kA] | Op. fusible | |
| TRONCAL TRIFASICO | 1 | A | 59.13 | * | * | 41.60 | 3.98 | * |
| | | B | 112.57 | * | * | 39.73 | 33.69 | * |
| | | C | 42.52 | * | * | 34.00 | 3.36 | * |
| | 2 | A | 61.08 | * | * | 35.66 | * | * |
| | | B | 106.32 | * | * | 77.79 | * | * |
| | | C | 44.37 | * | * | 40.17 | * | * |
| | 3 | A | 59.02 | * | * | 33.12 | 0.597 | * |
| | | B | 108.42 | * | * | 72.97 | 2.541 | * |
| | | C | 42.18 | * | * | 49.18 | 0.259 | * |
| | 4 | A | 57.73 | * | * | 45.48 | * | * |
| | | B | 116.65 | * | * | 106.89 | * | * |
| | | C | 40.78 | * | * | 46.94 | * | * |
| | 5 | A | 51.01 | * | * | 26.30 | 0.80 | * |
| | | B | 140.00 | * | * | 35.21 | 84.56 | * |
| | | C | 39.03 | * | * | 25.35 | 0.511 | * |
| | 6 | A | 42.76 | * | * | 45.27 | * | * |
| | | B | 110.59 | * | * | 107.24 | * | * |
| | | C | 32.81 | * | * | 45.51 | * | * |
| | 7 | A | 45.33 | * | * | 45.84 | * | * |
| | | B | 108.16 | * | * | 106.517 | * | * |
| | | C | 34.45 | * | * | 45.85 | * | * |
| | 8 | A | 43.81 | * | * | 32.41 | 0.242 | * |
| | | B | 107.16 | * | * | 85.58 | 3.547 | * |
| | | C | 34.16 | * | * | 39.59 | 0.275 | * |
| | 9 | A | 41.83 | * | * | 43.80 | * | * |
| | | B | 106.38 | * | * | 73.73 | * | * |
| | | C | 34.89 | * | * | 43.52 | * | * |
| | 10 | A | 46.00 | 0.815 | NO | 66.74 | 0.293 | NO |
| | | B | 100.69 | 5.38 | SI | 79.83 | 3.376 | NO |
| | | C | 46.30 | 0.069 | NO | 64.47 | 0.416 | NO |
| RAMAL #1 MONOFASICO | B | 1 | 52.53 | 2.57 | NO | 53.95 | 2.75 | SI |
| | | 2 | 52.43 | * | * | 53.80 | * | * |
| | | 3 | 41.61 | * | * | 44.26 | * | * |
| | | 4 | 42.54 | * | * | 41.45 | * | * |
| | | 5 | 42.09 | * | * | 41.68 | * | * |
| | | 6 | 42.02 | 0.822 | NO | 47.25 | 0.989 | NO |

*La estructura no posee descargador ni fusible

Se tiene como resultado los valores de voltaje y corriente que son mucho más altos, por lo cual se produce la falla del aislador del poste más cercano al rayo, y la apertura del fusible de la fase B del transformador trifásico que se encuentra al final del tramo. El efecto que produce

este rayo en el tramo monofásico no es severo ya que no fallan los aisladores como tampoco produce la apertura del fusible de los esquemas monofásico. Después de haber realizado este análisis se colocó los descargadores cada 290m aproximadamente en la red trifásica para así disminuir este efecto y se logro bajar los valores de voltaje evitando la falla del aislador continuo al impacto del rayo. Pero la onda residual que viaja a lo largo de la línea trifásica, y que llega al tramo monofásico el cual presenta un cambio de impedancia con lo que la onda de impulso se refleja e incrementa el valor pico en ese punto y produce con ello la operación del descargador del transformador provocando que se funda el fusible del ramal monofásico más cercano, quedando sin servicio todo el ramal.

VI. CONCLUSIONES

- De los resultados de las simulaciones de los 9 esquemas de conexión de los descargadores para transformadores monofásicos y 2 para trifásicos respectivamente, se concluye que los esquema A3, B3, C3 y D que tienen la bajante de tierra mallado con la cubeta y el neutro son los que menores voltajes residuales presentan tanto en el primario como los que se transfieren al lado secundario del transformador.
- Con el análisis del comportamiento de los fusibles asociados al transformador se concluye que los esquemas B3 y D que tienen el descargador en serie con el fusible son los que menos kVA's fuera de servicio presentan, por cuanto brindan una adecuada sensibilidad y selectividad durante las operaciones del descargador con rayos que impactan directamente al transformador y sean superiores a 20 kA de pico de corriente y frente a averías internas del descargador, permitiendo fácilmente la ubicación y reparación de la falla.
- Del análisis del modelamiento completo del tramo de mayor incidencia de rayos del alimentador Pilishurco, que constituye el modelo de la línea, estructura de soporte, puesta a tierra y los esquemas de transformadores B3 y D; se concluye que para sobrevoltajes de rayos que impactan directamente sobre la línea de corrientes pico menores a 10 kA, el aislamiento de la línea soporta adecuadamente por cuanto no superan el CFO (Critical Flash Overvoltage) de los aisladores.
- Los rayos que impacten la línea y que estén entre 10 y 30 kA originan la falla del aislador de la estructura contigua al impacto, por lo cual se concluye la necesidad de instalar descargadores a una distancia de 290 m aproximadamente a lo largo de la línea según los vanos, con un valor de resistencia de puesta a tierra inferior a 25Ω, así como también el uso de descargadores oxidado Metálico, tipo Heavy Dutty que soportan adecuadamente la energía asociada a la descarga.

VII. REFERENCIAS

- [1] D. G. Montaluisa Montaluisa, Analisis de Coordinación de Aislamiento para Primarios de Distribución, 2010`.
- [2] IEEE STD. 1410, «IEEE Guide For Improving The Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution,» 2004.

- [3] S. Boutora, H. Bentarzi y A. Ouadi, «Analysis Of The Disturbances in Distribution Networks Using Matlab And Atp,» Issue, 2011.
- [4] L. Soibelzon, «Lighting Arresters for Protection of Distribution Transformers in City Bell,» Curitiba, 2009.
- [5] A. Piantini, «Lighting Protection of Overhead Power Distribution Line,» San Paulo, 2008.
- [6] M. Paolone, «Modeling of Lightning-Induce Voltages On Distribution Network for the Solution of Power quality Problems, And Relevan Implementation In A Transient Program,» Universidad Of Bologna, Bologna, 2001.
- [7] K. Pattanapakdee y C. Banmongkol, «Failure of Rise Pole Arrester Due to Station Service Transformer Ferroresonance,» IEEE, Bangkok, 2006.
- [8] P. Obase, F. Romero, J. Janiszewski, A. Piantini, A. Neto, T. Carvalho y A. Araújo, «Lightning Surges Transferred to the Secondary of Distribution Transformers Due to Direct Strickes on MV Lines, Considering Diferently Line Configurations,» IEEE, Curitiba, 2009.
- [9] V. Weerawardena y M. Wijekoon, «Analysis of Transient Overvoltage in MV Distribution Network of Ceylon Electricity Board, Sri Lanka,» Uva, 2009.
- [10] S. Visacro, «Direct Strokes to Trasmision Lines Consideration on The Mechanisms of Overvoltage Formation And Their Influence on The Lighting Performance of Line,» Jolr, Brazil, 2007.
- [11] M. Morales, «Analisis de Fallas Desconocidas en el Alimentador Pilishurco 2011-2012 DOM EEASA,» Ambato, 2012.
- [12] Cooper Power System, Electrical Distribution System Protection (Manual), United States, 1990.
- [13] Ohio Brass, «Dynavar Distribution Class (PDV) and Pise Pole (PVR) Surge Arresters,» USA, 1996.
- [14] Cooper Power Systems, «Protection Equipment Update,» Wisconsin, 1992.
- [15] S. Meyer y T.-H. Liu, Electromagnetic Transient Program, Oregon, 1995.
- [16] P. A. G. Mendoza, «Tesis Estudio de Coordinación de Aislamiento para la Línea Aérea en 34,5 Kv Planta Estación Principal Morichal-Subestación N° 3 Morichal,» Venezuela-Caracas, 2010.

VIII. BIOGRAFÍA

Siomara Redrobán Nació el 07 julio de 1989 en la ciudad de Ambato, Ecuador, realizó sus estudios de bachillerato en el Colegio Juan León Mera "La Salle", sus estudios superiores los realizó en la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga, y obtuvo el título de Ingeniera Electromecánica en el 2014.