



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

EXTENSIÓN LATACUNGA

Estudio de los Esquemas de Conexión de los Elementos de Protección de Sobrevoltaje del Alimentador Pilishurco, como una Medida para la Reducción de los Índices de Calidad del Servicio Eléctrico FMIK (Frecuencia Media) y TTIK (Tiempo Promedio) de Interrupción de la Empresa Eléctrica Ambato

Ing. Diego Ortiz

Ing. Hernán Iturralde

Siomara Redrobán

CONTENIDO

- Antecedentes del Alimentador Pilishurco
- Sobrevoltajes en Redes de Distribución
- Características de las Descargas Atmosféricas
- Elementos de Protección de Sobrevoltaje
- Modelamiento de la Red en Simulink
- Análisis de los Resultados
- Conclusiones y Recomendaciones

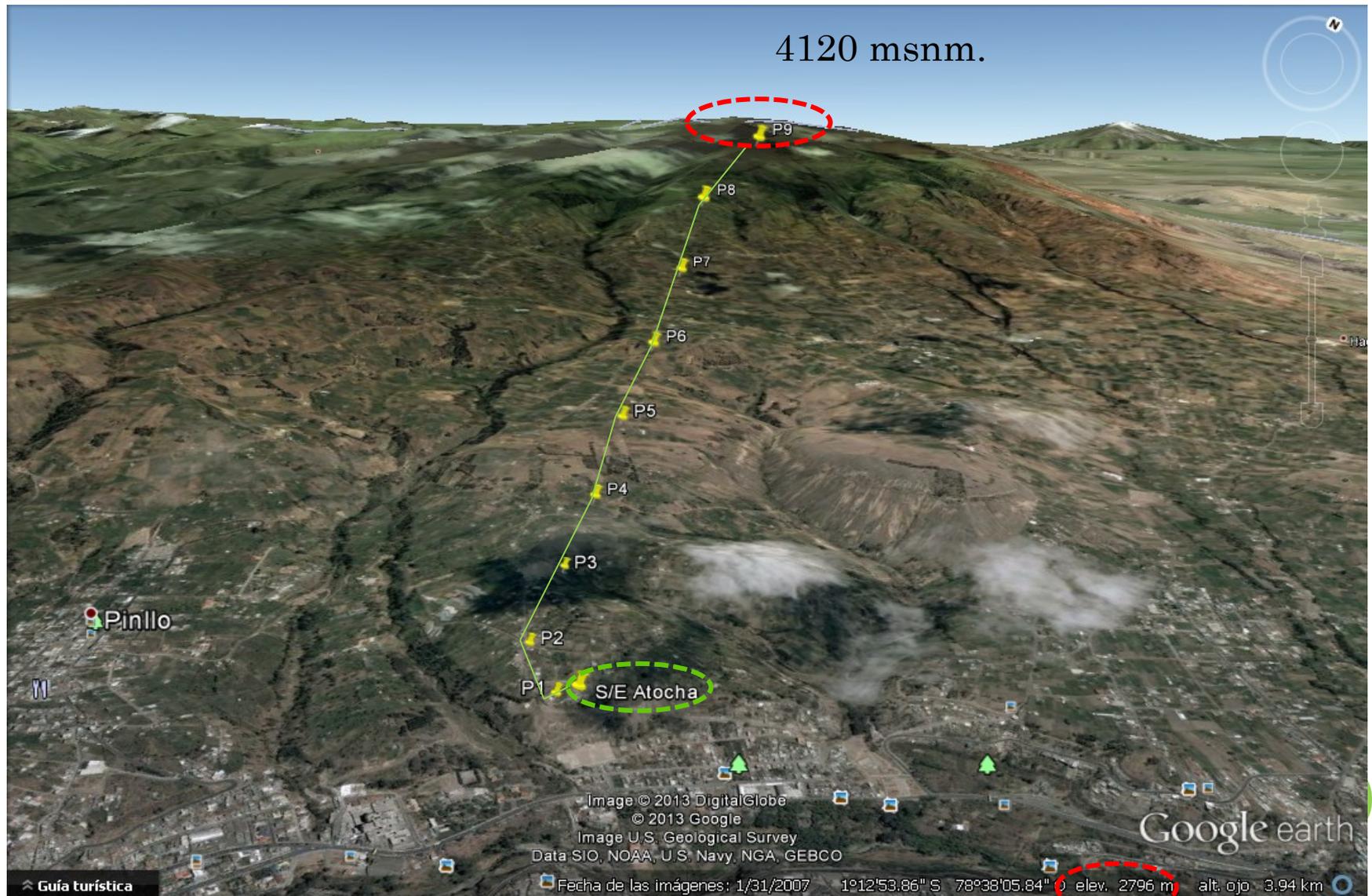


CONTENIDO

- Antecedentes del Alimentador Pilishurco



UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL ALIMENTADOR PILISHURCO



TOPOLOGÍA DEL ALIMENTADOR PILISHURCO ARCGIS

$V_{nom} = 13,8 \text{ kV}$

Long = 15 km

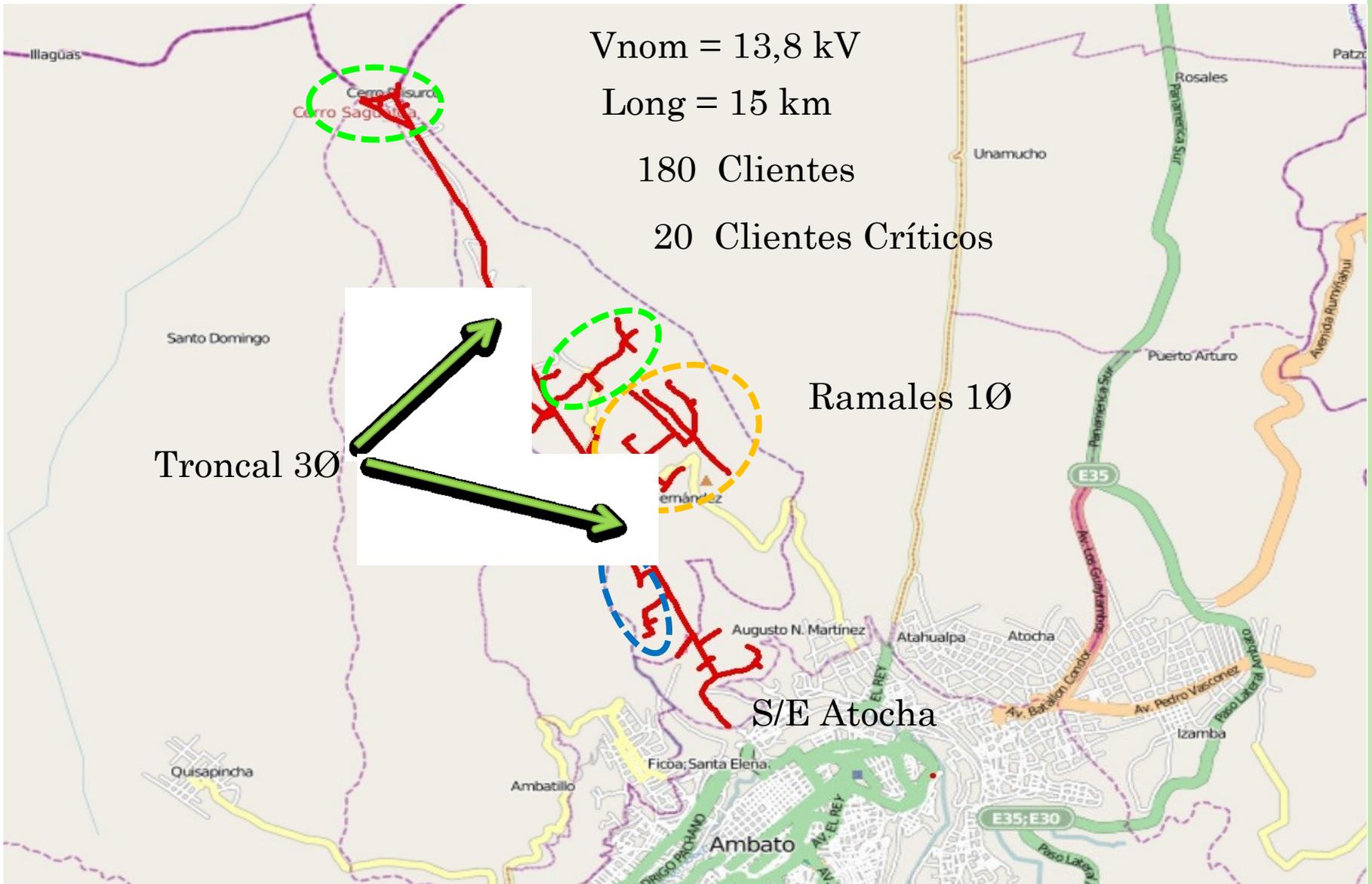
180 Clientes

20 Clientes Críticos

Troncal 3Ø

Ramales 1Ø

S/E Atocha



OBJETIVO GENERAL

- Realizar un estudio de los esquemas de conexión de los elementos de protección de sobrevoltaje del alimentador Pilishurco, como una medida para la reducción de los índices de calidad del servicio eléctrico FMIK (frecuencia media) y TTIK (tiempo promedio) de interrupciones de la EMPRESA ELECTRICA AMBATO



OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una búsqueda de los esquemas de conexión de los elementos de protecciones de sobrevoltaje usados en la EMPRESA ELECTRICA AMBATO S.A.
- Evaluar el comportamiento de cada uno de los esquemas frente a sobrevoltajes, mediante simulaciones de las ondas de voltaje producidas por descargas atmosféricas
- Analizar el comportamiento de los elementos de protección de sobrecorriente asociados a los esquemas de conexión de los descargadores presentes en el alimentador Pilishurco.
- Determinar el mejor esquema de conexión de los elementos de protección de sobrevoltaje para el alimentador Pilishurco de la EMPRESA ELECTRICA AMBATO S.A.



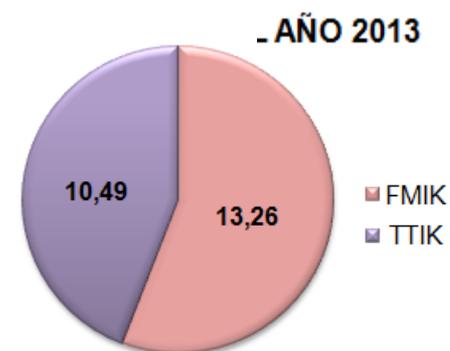
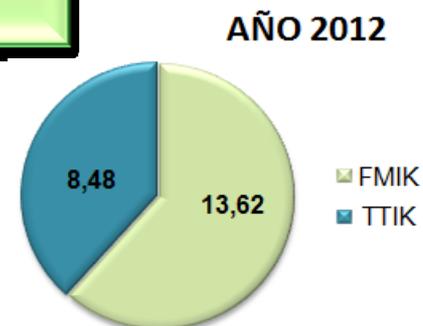
REGISTRO DE RECLAMOS ALIMENTADOR PILISHURCO EN LOS AÑOS 2011-2012

AÑO		CAUSAS ESPECIFICAS DE LA INTERRUPCIÓN	TIEMPO TOTAL DE INTERRUPCIÓN(Hr)
2011	19	DESCONOCIDAS	207,76
2011	2	CORROSIÓN	64,02
2011	3	DESCARGAS ATMOSFÉRICOS	20,71
2011	6	DETERIORO DE EQUIPOS Y MATERIALES	45,79
2011	1	DAÑOS O INTERFERENCIA INTENCIONAL PARTICULARES	3,32
2011	1	MANIOBRAS	1,5
2011	1	OTROS	14,85
2011	1	VIENTOS FUERTES	1,25
2011		CHOQUE DE VEHÍCULOS	24,23
2012	3	DETERIORO DE EQUIPOS Y MATERIALES	32,17
2012	3	VIENTOS FUERTES	54,32
2012	5	ARBOLES	38,18
2012	5	CORROSIÓN	133,48
2012	19	DESCONOCIDAS	212,13
2012	1	CHOQUE DE VEHÍCULOS	4,18
2012	1	DAÑOS O INTERFERENCIA INTENCIONAL PARTICULARES	1,25

ÍNDICES DE CALIDAD DE SERVICIO DE LA EEASA

Índices de Calidad de la EEASA

Año	Lim FMIK	Lim TTIK
2012	13,62	8,48
2013	13,26	10,49



LÍMITES EXIGIDOS POR EL CONELEC

Indices	Lim FMIK	Lim TTIK
Red	4.0	8.0
Alimentador Urbano	5.0	10.0
Alimentador Rural	6.0	18.0



DAÑOS EN TRANSFORMADORES Y DESCARGADORES DEBIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

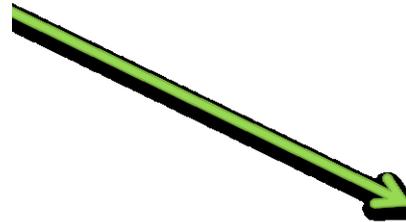
Descargadores
Explotados



Falla de
Aislamiento

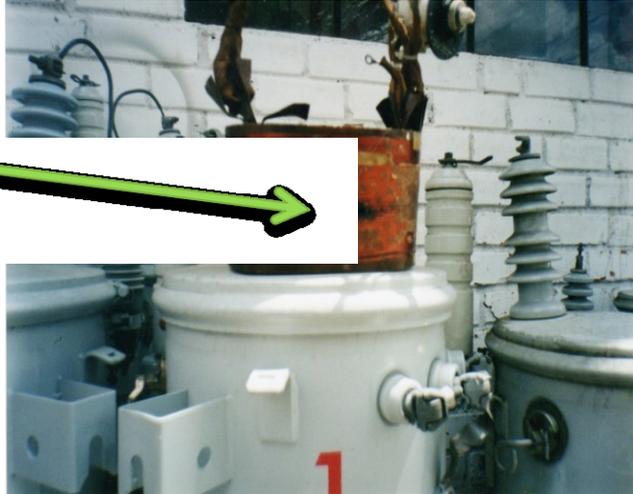


Operación de
Protecciones de
Aguas Arriba

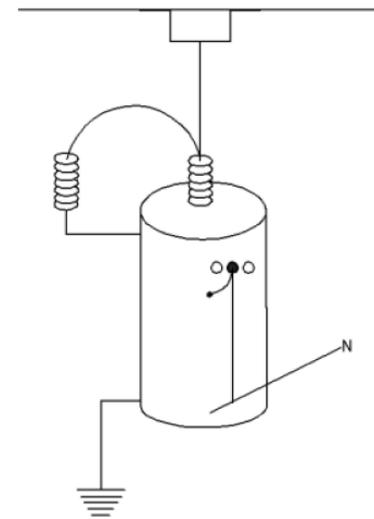
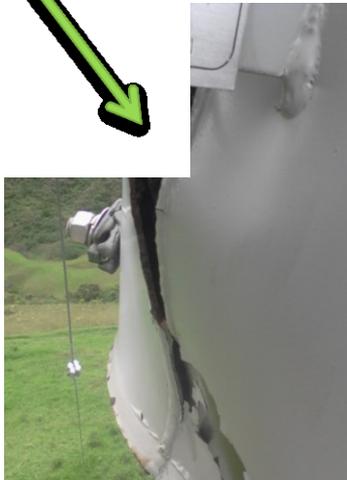
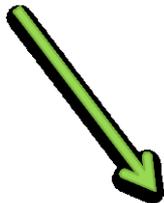


DAÑOS EN TRANSFORMADORES Y DESCARGADORES DEBIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Perforación del Aislamiento en la Bobina de MV.



Daño del Tanque por recorrido de la Corriente



JUSTIFICACIÓN DEL PRESENTE ESTUDIO

- ✓ Los esquemas de conexión actuales de los descargadores frente a una actuación por sobrevoltaje o una avería interna, provocan una apertura del alimentador desde la cabecera, lo que indica que el sistema de protecciones del alimentador no tiene una selectividad adecuada.
- ✓ El M.E.E.R (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable) y la EEASA tienen como política prioritaria la mejora de la calidad de servicio eléctrico, para así garantizar el suministro de energía eléctrica permanente, es regulada por CONELEC (Consejo Nacional de Electricidad) con la regulación (004/2001).



CONTENIDO

- Antecedentes del Alimentador Pilishurco
- Sobrevoltajes en Redes de Distribución



TIPOS DE SOBREVOLTAJE EN REDES ELÉCTRICAS

Tipo de Sobrevoltaje(causa)	Amplitud Del Sobrevoltaje MV-HV	Duración	Amortigua_miento
Atmosférica (caída de rayo)	>4	Muy corta 1 a 10ms	Fuerte
De Maniobra (interrupción de cortocircuito)	2 a 4	Corta 1ms	Medio
A frecuencia Industrial (defecto aislamiento)	$<\sqrt{3}$	Larga > 1s	Débil

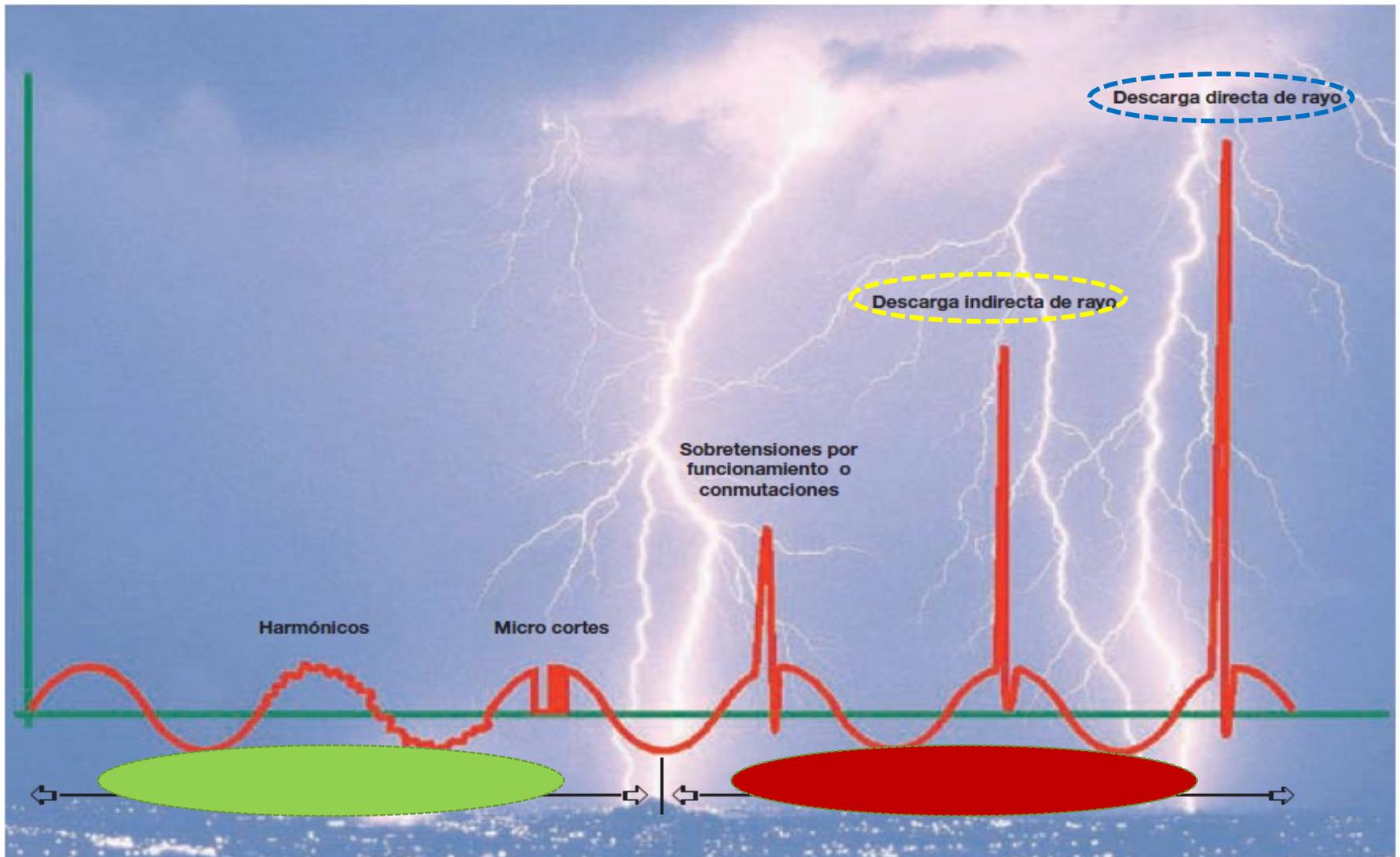


CONTENIDO

- Antecedentes del Alimentador Pilishurco
- Sobrevoltajes en Redes de Distribución
- Características de las Descargas Atmosféricas

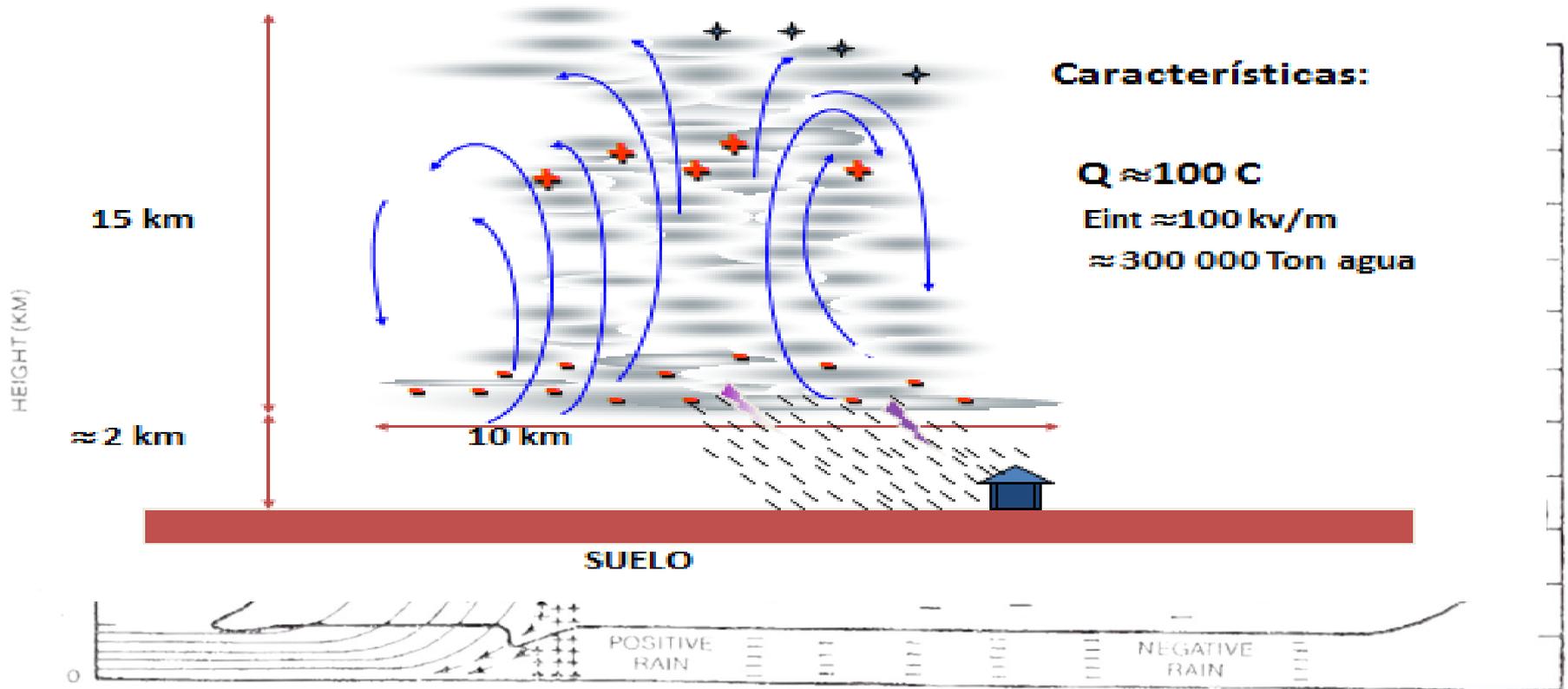


TIPOS DE SOBREVOLTAJE EN REDES ELÉCTRICAS



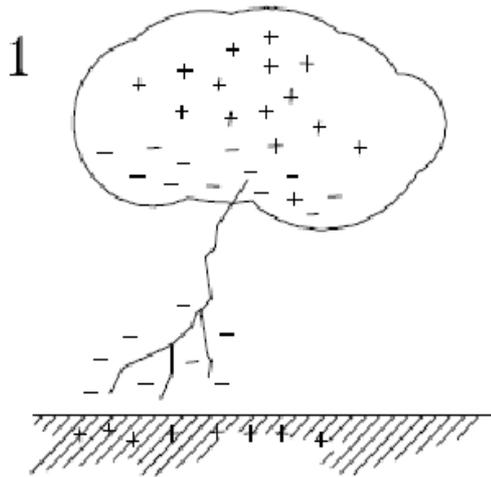
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

- La única nube que tiene la capacidad para originar un rayo es la “Cumulus Nimbus”, que tiene forma reconocible a la distancia, es detectable por los radares meteorológicos y muestra un color gris muy oscuro, casi negro, en su parte baja que impide el paso de la luz solar.



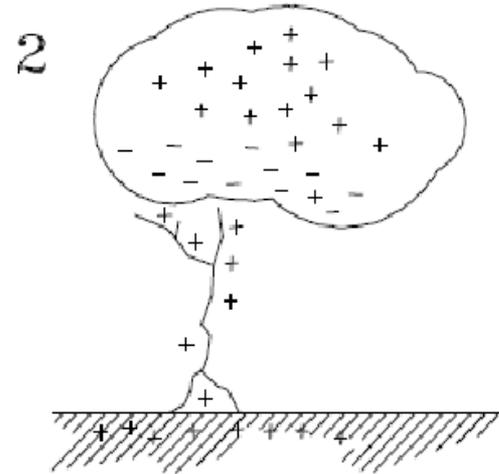
TIPOS DE RAYOS ENTRE NUBE Y TIERRA

Descendente



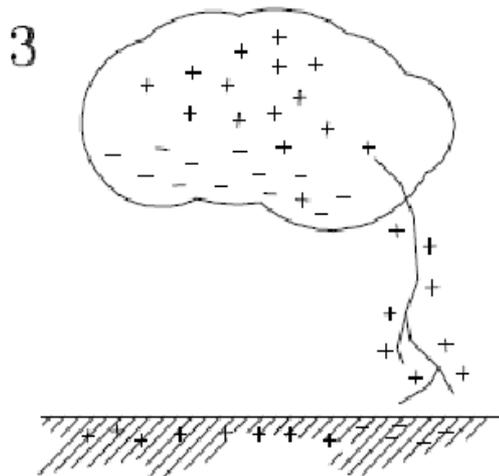
(-)

Ascendente



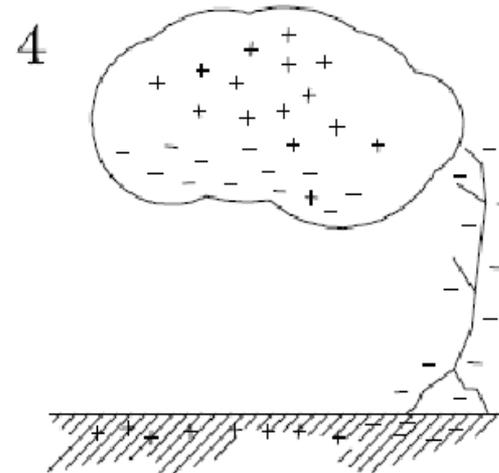
(+)

Descendente



(+)

Ascendente



(-)



TOTAL DE DESCARGAS

100 %

DESCARGA
NUBE – NUBE

> 50 %

DESCARGA
NUBE – TIERRA

30 % al 40 %

DESCARGA
NUBE – AIRE

< 10 %



Ascendente

“+”

< 5 %

Descend.

“+”

< 10 %

Ascendente

“-”

< 5 %

Descend.

“-”

80 % a 90 %

BASE DE LA NUBE

20 ms

70 μ s

40 ms

2 ms

30 ms

1 ms

LÍDER DARDO

LÍDER DARDO

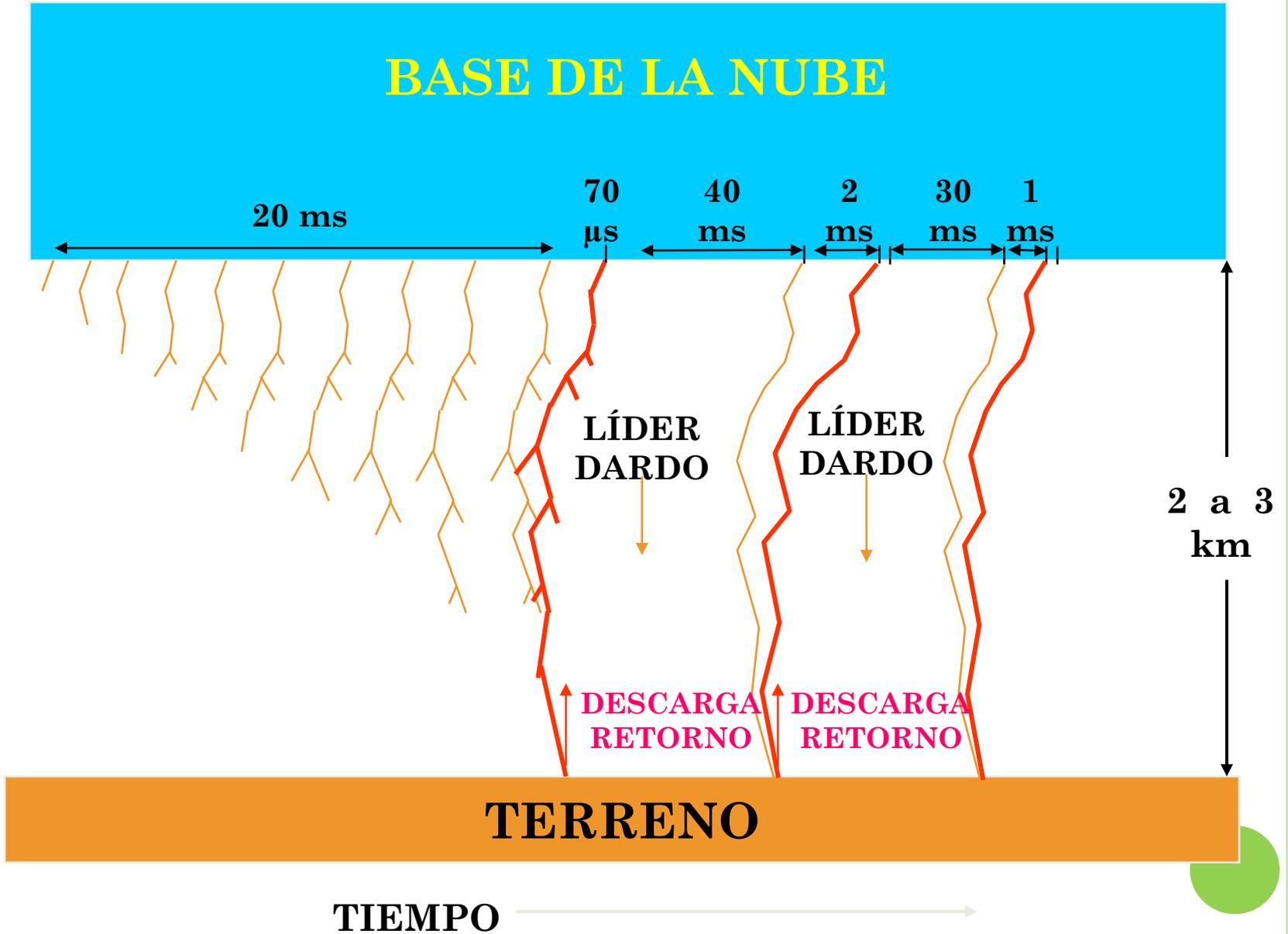
DESCARGA RETORNO

DESCARGA RETORNO

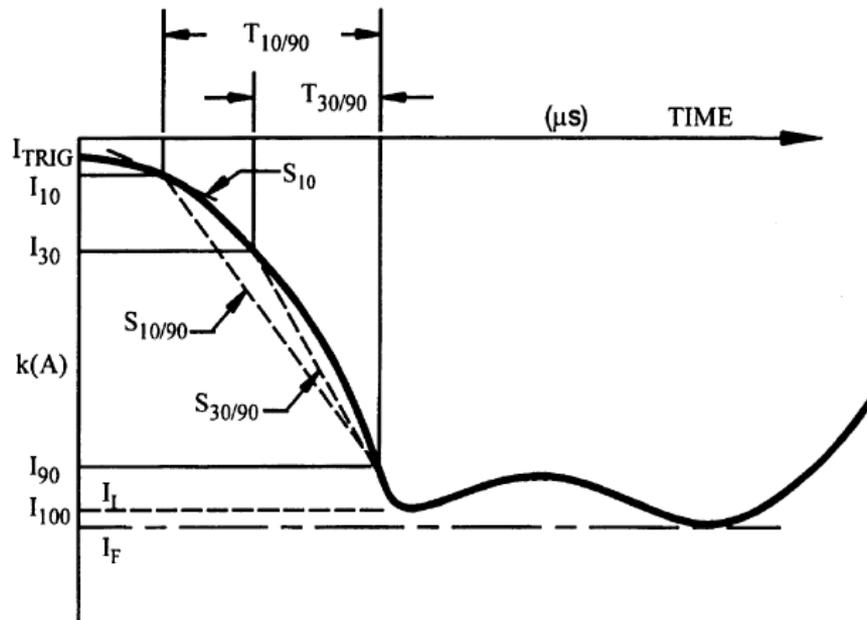
2 a 3 km

TERRENO

TIEMPO



FORMA DE ONDA DEL RAYO SEGÚN LA CIGRE Y LA NORMA IEEE STD. 1410

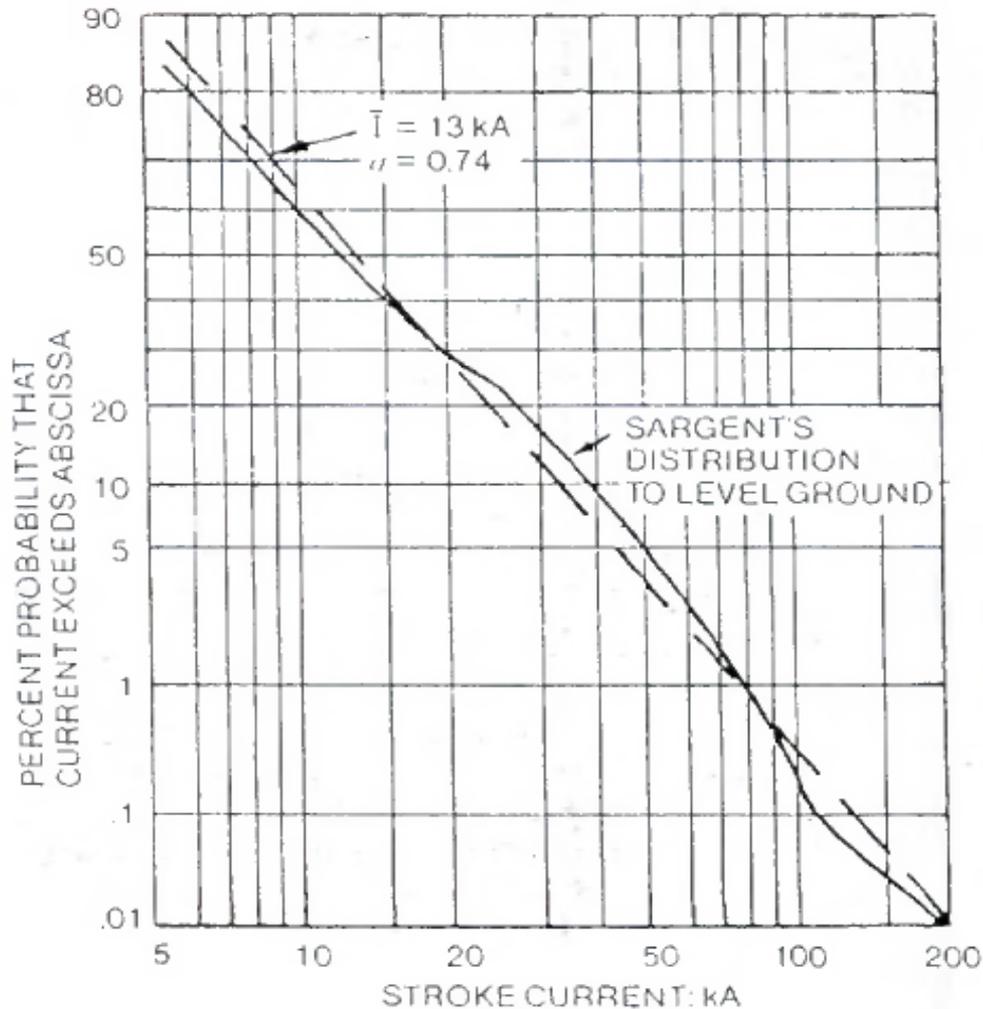


Parámetros de distribución normal logarítmica para descargas negativas				
Parámetro	Primera descarga		Subsiguiente descarga	
	Mediana	β , desviación std logarítmica	Mediana	β , desviación std logarítmica
FRENTE, microsegundos				
$t_d 10/90 = T_{10/90}/0.8$	5.63	0.576	0.75	0.921
$t_d 30/90 = T_{30/90}/0.6$	3.83	0.553	0.67	1.013
$t_m = I_p/S_m$	1.28	0.611	0.308	0.708
PENDIENTE, kA/microseg				
S_m , Máximo	24.3	0.599	39.9	0.852
S_{10} , al 10%	2.6	0.921	18.9	1.404
$S_{10/90}$, 10-90%	5	0.645	15.4	0.944
$S_{30/90}$, 30-90%	7.2	0.622	20.1	0.967
CORRIENTE CRESTA, kA				
I_i , inicial	27.7	0.461	11.8	0.53
I_f , final	31.1	0.484	12.3	0.53
Inicial/Final	0.9	0.23	0.9	0.207
Cola, t_n , microsegundos	77.5	0.577	30.2	0.933
CARGA, Q_i , C	4.65	0.882	0.938	0.882
$\int (I^2 dt)$, (kA) ²	0.057	1.373	0.0055	1.366
Intervalo entre descargas, mseg	35	1.066

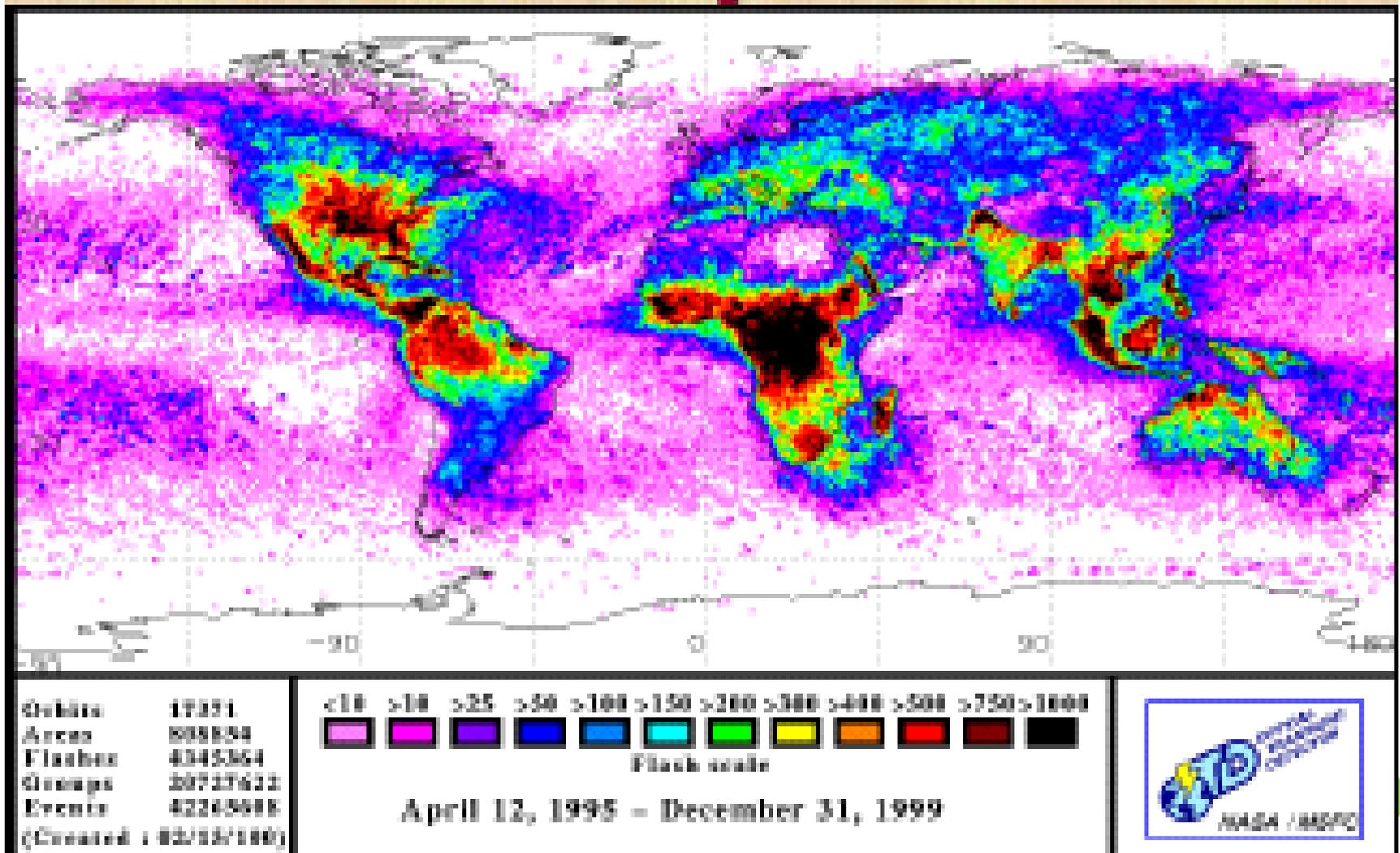
Descripción de los parámetros de forma de onda

- I_{10} = Intercepto en el 10% de la corriente de la onda de descarga
- I_{30} = Intercepto en el 30% de la corriente de la onda de descarga
- I_{90} = Intercepto en el 90% de la corriente de la onda de descarga
- $T_{10/90}$ = Tiempo entre los interceptos I_{10} e I_{90} del frente de onda
- $T_{30/90}$ = Tiempo entre los interceptos I_{30} e I_{90} del frente de onda
- S_m = Tan G, máxima tasa de aumento de la corriente a lo largo del frente de onda
- S_{10} = Rata instantánea de aumento de corriente en I_{10}
- $S_{10/90}$ = Pendiente promedio (a través de los interceptos I_{10} e I_{90})
- $S_{30/90}$ = Pendiente promedio (a través de los interceptos I_{30} e I_{90})
- Q_i = Carga de impulso de la corriente de la onda de descarga

PROBABILIDAD DE EXCEDER DETERMINADO VALOR DE CORRIENTE DE RAYO



ACTIVIDAD ELECTRICA MUNDIAL



EN EL PLANETA:

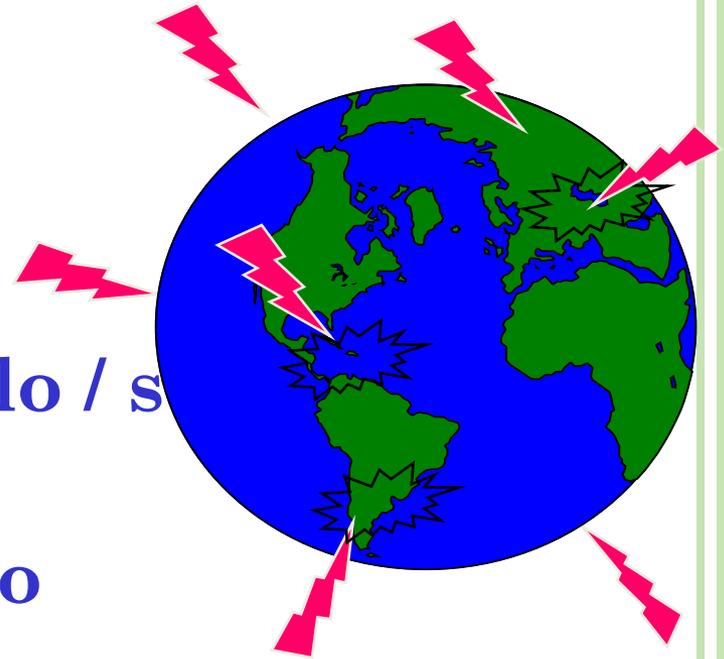
2000-5000 tormentas / día

100 rayos impactan el suelo / s

≈ 2 billones descargas / año

promedio de 65 descargas / s

Se estima el promedio de ocurrencia de descargas nube-tierra entre 10 - 15 / s



EFFECTOS FUNDAMENTALES DEL RAYO

TÉRMICOS

**ELECTRODI-
NÁMICOS**

**ELECTROMAG-
NÉTICOS**

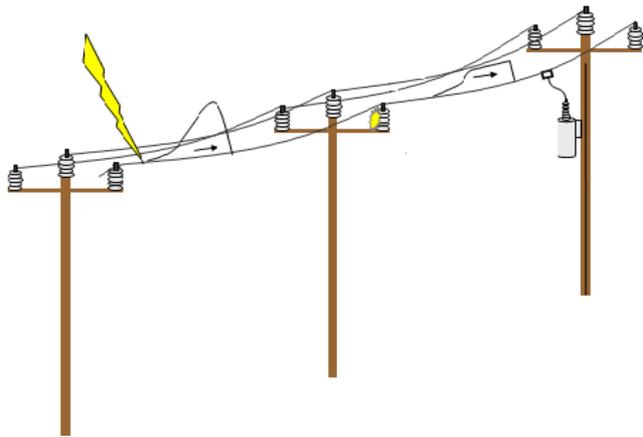
ACÚSTICOS

**ELECTRO-
QUÍMICOS**

FISIOLÓGICOS

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.



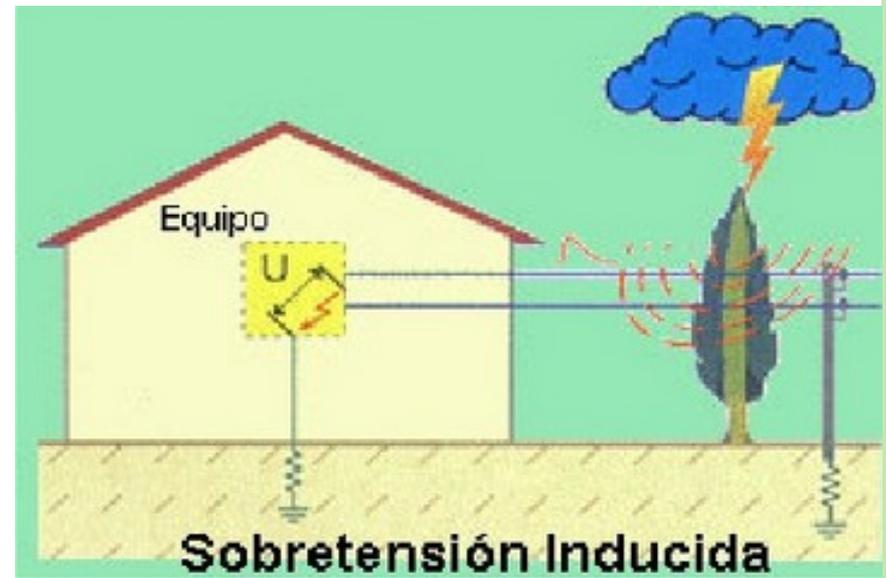
DESCARGAS INDIRECTAS

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)

El cambio brusco del campo electromagnético producido por la circulación de la corriente induce en la línea una sobretensión de tipo transitorio, que es el más frecuente y puede ser grave dependiendo de la intensidad de descarga, ya que de registros 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



CÁLCULO DEL VOLTAJE DIRECTO DEL RAYO

Para modelar el rayo es necesario calcular el pico de sobrevoltaje según la Norma IEEE STD. 1410, mediante la corriente del rayo, el valor de sobrevoltaje está en función de la distancia más cercana del punto impacto a la línea, como se presenta en la siguiente ecuación

$$V_{max} = 38,8 \frac{I_0 h_a}{y}$$

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]

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

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

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

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)



PROBABILIDAD DE CAÍDA DE RAYOS EN LAS REDES AÉREAS

$$N = 0.10 N_g * (b + 28 * H^{0.6})$$

Dónde.

H: Altura de la línea [m]

b: Ancho de la línea [m]

N_g : Densidad de descarga a tierra.

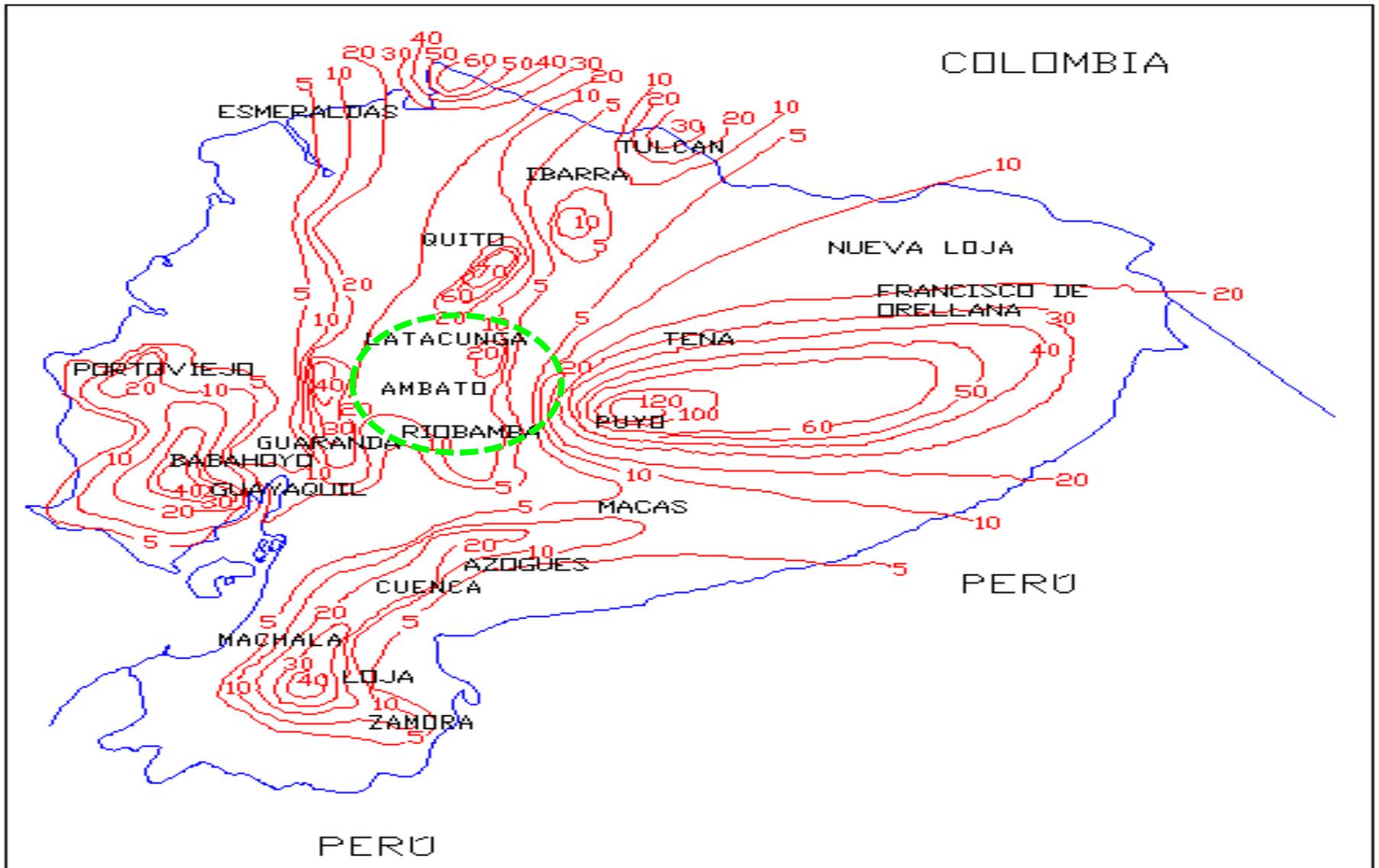
$$N_g = 0.04 * (T_d)^{1.25} \frac{\text{descargas}}{\text{Km}^2 \text{por}} \text{año}$$

Donde:

T_d : Nivel ceraúnico



MAPA DEL NIVEL CERAÚNICO DEL ECUADOR.



CONTENIDO

- Antecedentes del Alimentador Pilishurco
- Sobrevoltajes en Redes de Distribución
- Características de las Descargas Atmosféricas
- Elementos de Protección de Sobrevoltaje

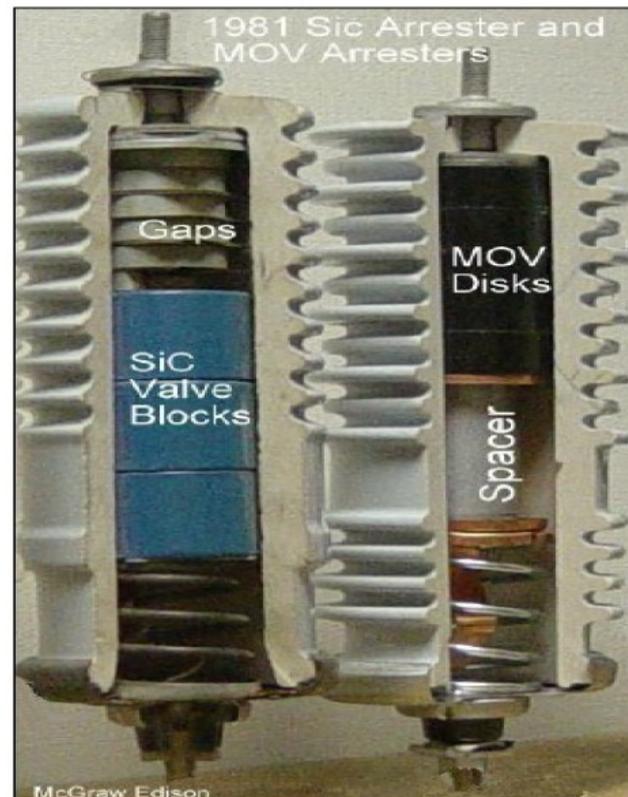


ELEMENTOS DE PROTECCIÓN DE SOBREVOLTAJES.

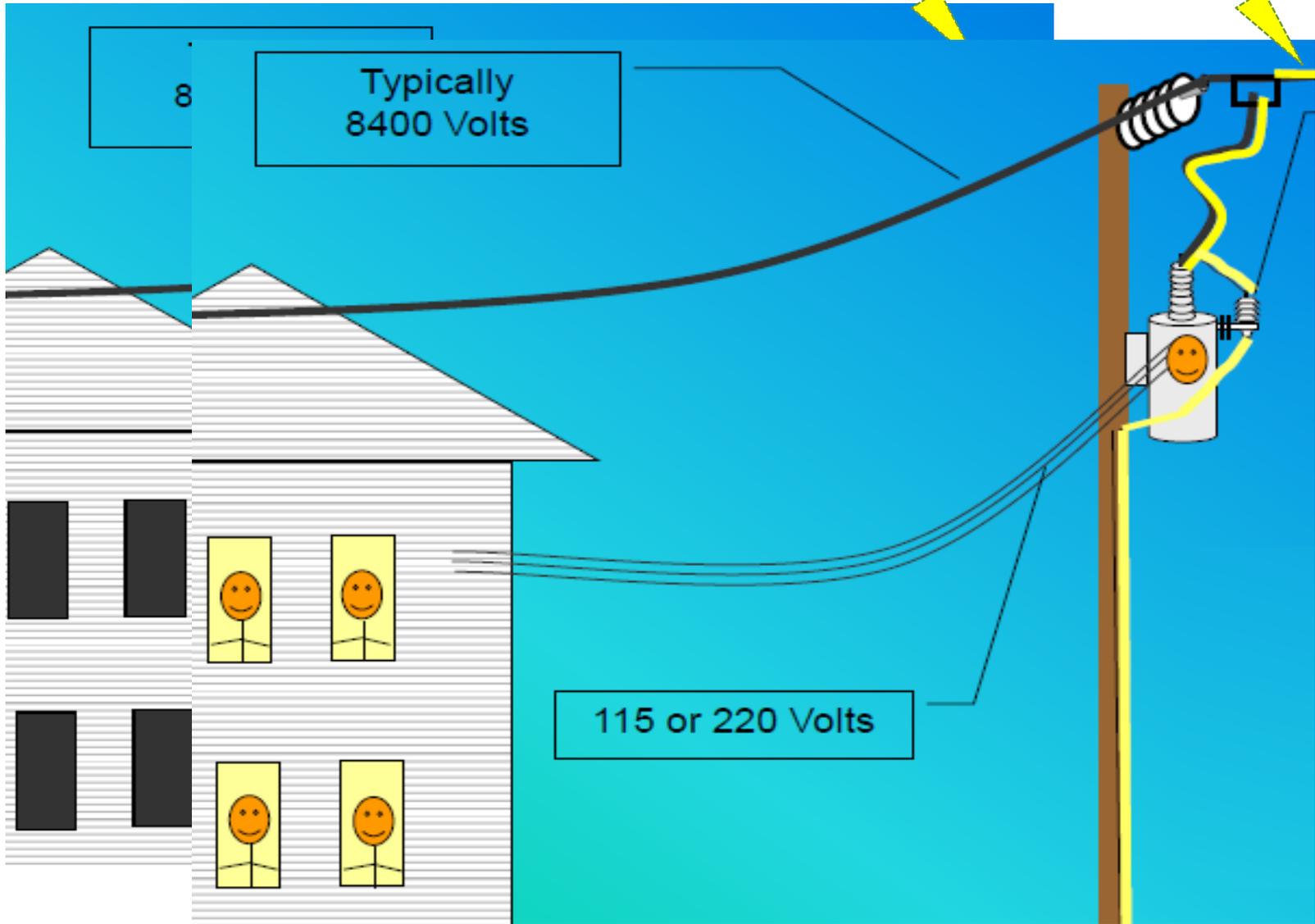


CLASIFICACIÓN DE LOS DESCARGADORES POR SU CONSTRUCCIÓN

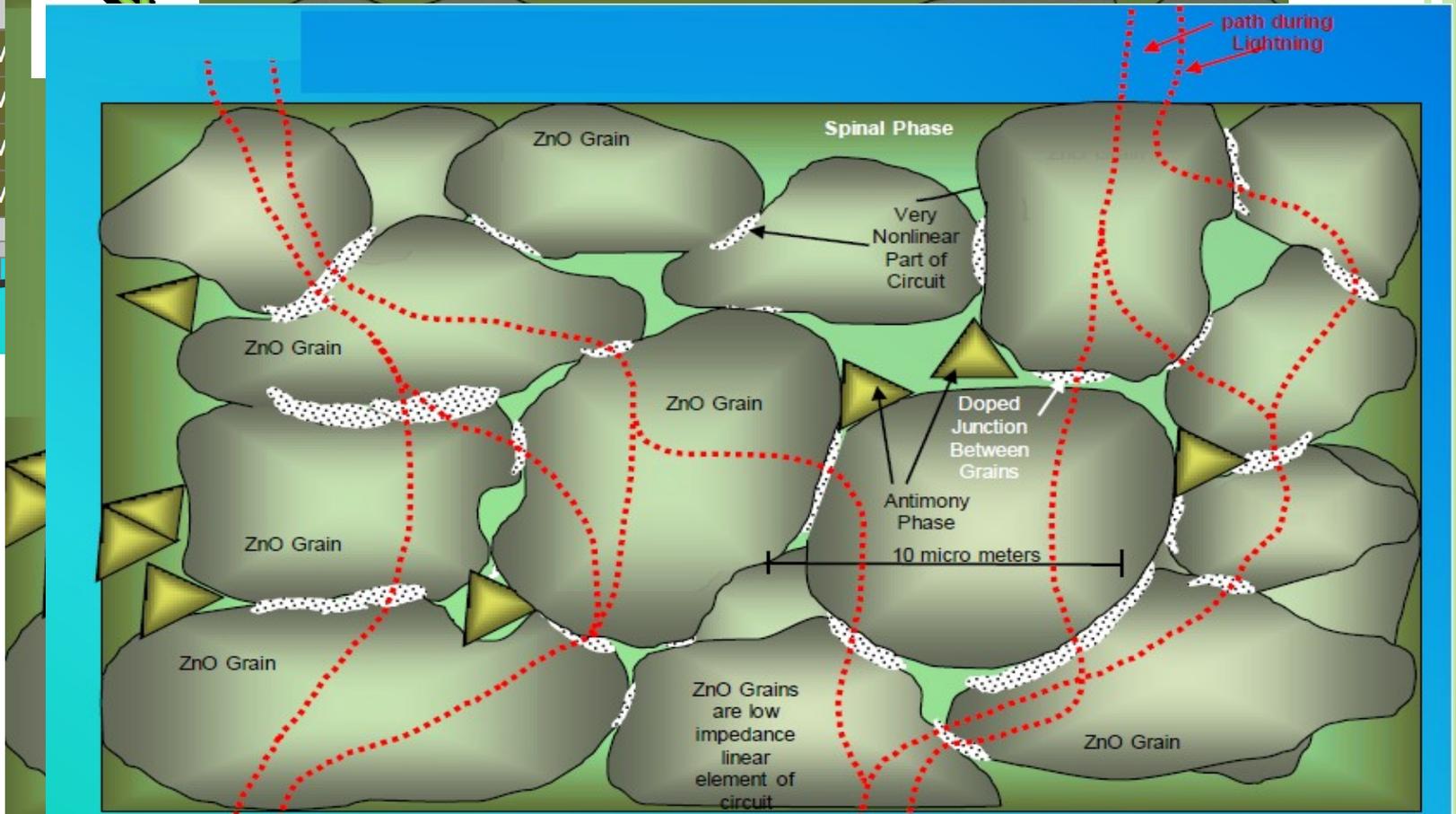
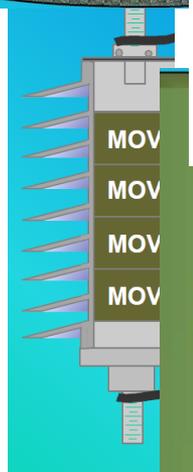
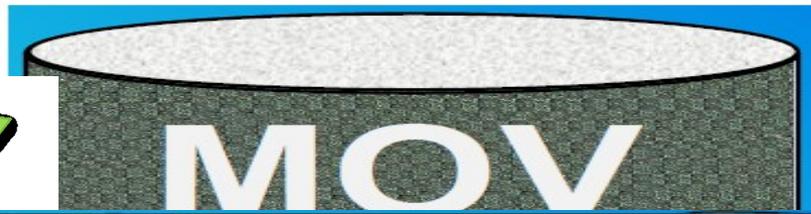
- Descargadores de Carburo de Silicio (**SiC**) con y sin explosores (gaps).
- Descargadores de óxido metálico (**MOV**) sin explosores.



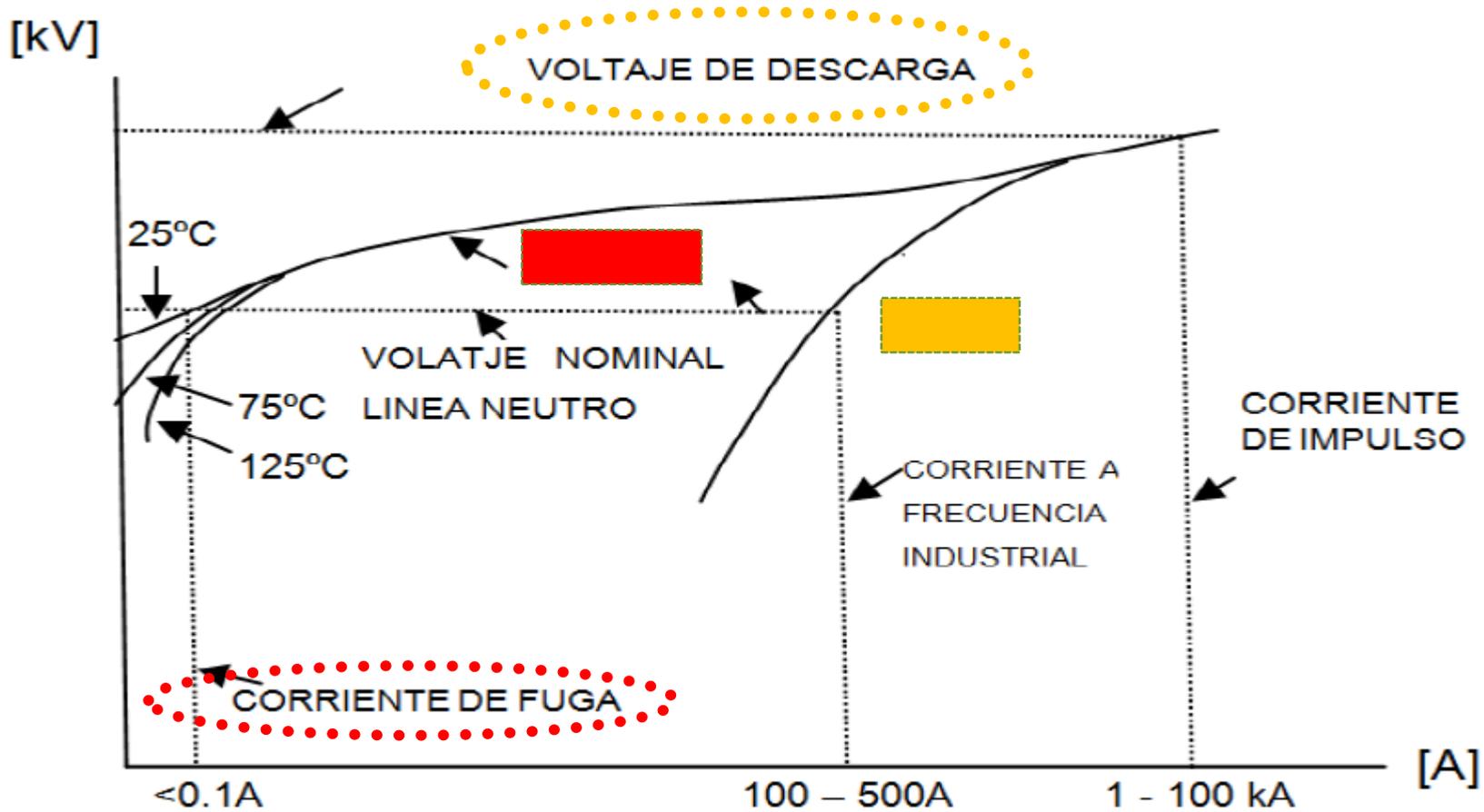
OPERACIÓN DEL DESCARGADOR



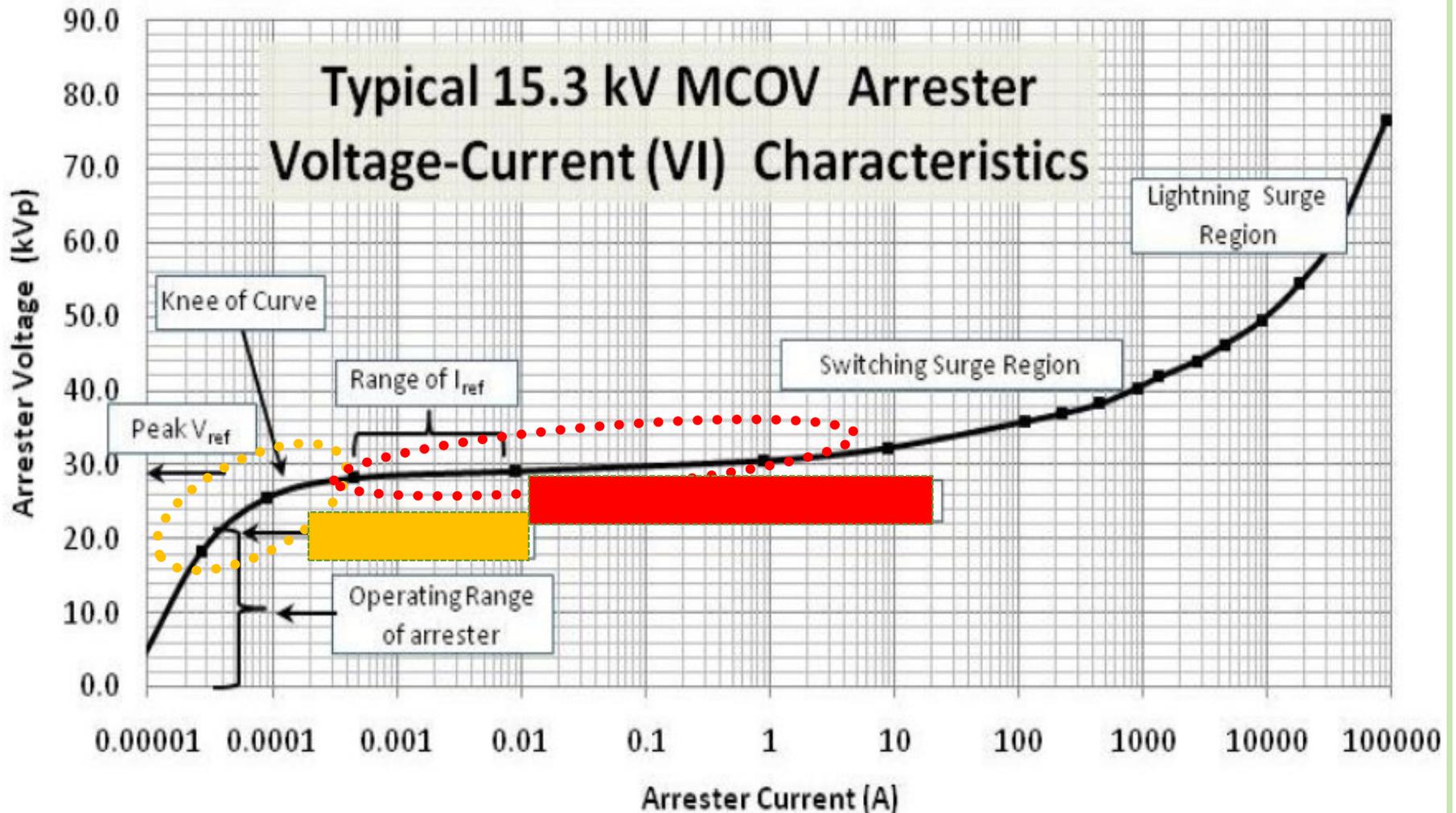
DESCARGADORES DE ÓXIDO METÁLICO (MOV) o (ZNO)



CURVA CARACTERÍSTICA VI DE DESCARGADORES ZNO VS SIC

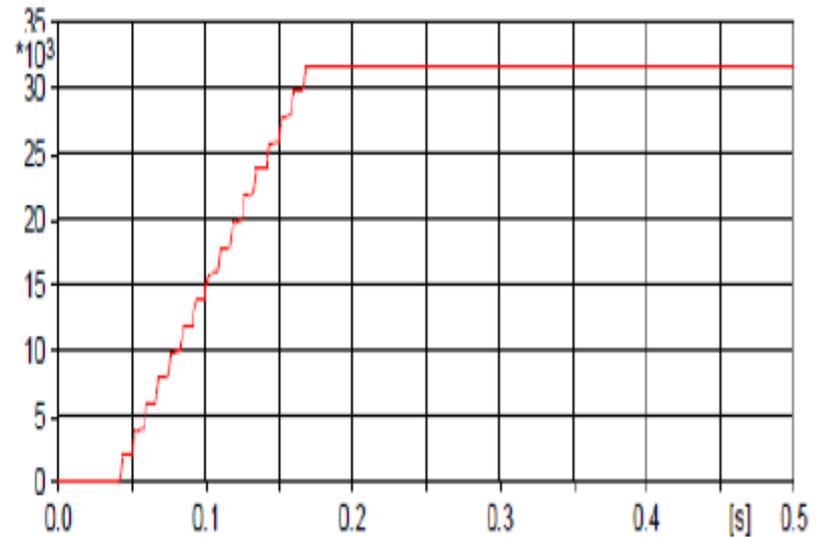
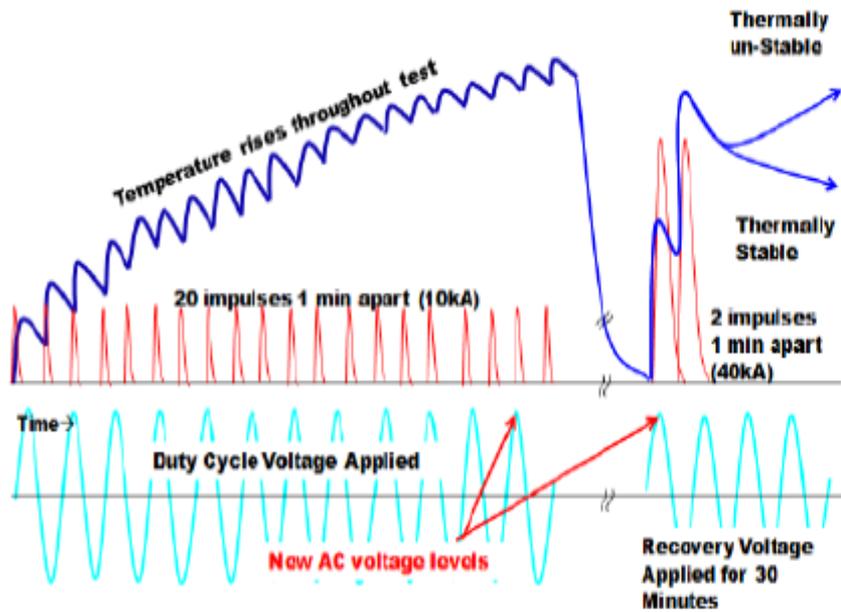


CURVA CARACTERÍSTICA VI DE DESCARGADORES DE ZNO

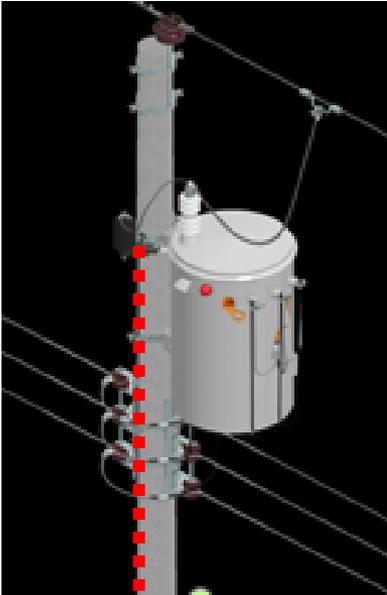
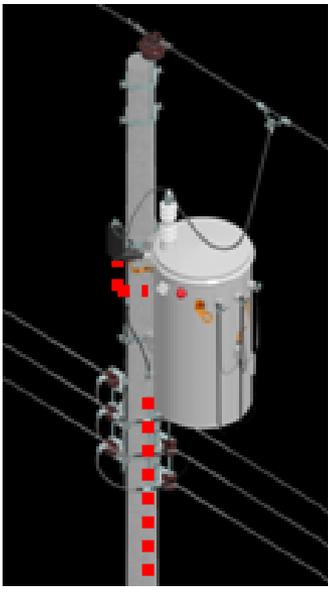
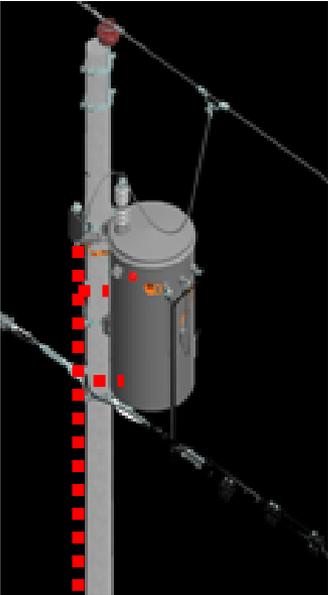


CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA DEL DESCARGADOR

Typical Heavy Duty Arrester Duty Cycle Test



TIPOS DE CONEXIÓN DE LOS DESCARGADORES

Trafo	Bajante directo a tierra	Bajante de tierra a través del tanque	Bajante de tierra mallada al tanque y al neutro
Autoprotegido	 A 3D rendering of a transformer on a utility pole. A thick metal conductor (grounding jumper) is attached to the top of the transformer tank and runs vertically down the pole to a ground point. The rest of the pole is marked with a red and white dashed safety pattern.	 A 3D rendering of a transformer on a utility pole. A thick metal conductor (grounding jumper) is attached to the top of the transformer tank and runs vertically down the pole to a ground point. The rest of the pole is marked with a red and white dashed safety pattern.	 A 3D rendering of a transformer on a utility pole. A thick metal conductor (grounding jumper) is attached to the top of the transformer tank and runs vertically down the pole to a ground point. The rest of the pole is marked with a red and white dashed safety pattern.

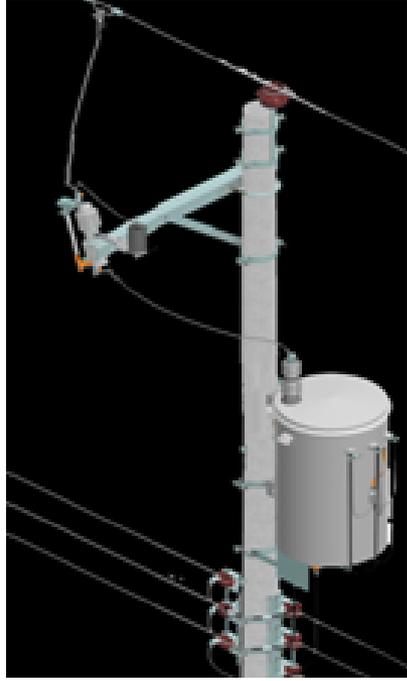


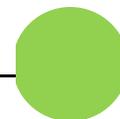
TIPOS DE CONEXIÓN DE LOS DESCARGADORES

Trafo	Bajante directo a tierra	Bajante de tierra a través del tanque	Bajante de tierra mallada al tanque y al neutro
Convencional con el fusible al lado de la fuente	 A 3D rendering of a transformer on a utility pole. A metal downlead is connected directly to a ground point on the pole.	 A 3D rendering of a transformer on a utility pole. A metal downlead is connected to the transformer tank, which is then grounded to the pole.	 A 3D rendering of a transformer on a utility pole. A metal downlead is connected to the transformer tank, which is then grounded to the pole. Additionally, the neutral point of the transformer is also grounded to the pole.



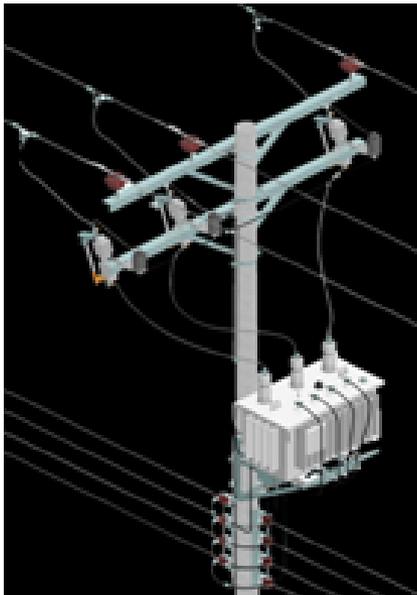
TIPOS DE CONEXIÓN DE LOS DESCARGADORES

Trafo	Bajante directo a tierra	Bajante de tierra a través del tanque	Bajante de tierra mallada al tanque y al neutro
Convencional con el fusible al lado de la carga	 Este diagrama muestra un transformador montado en un poste. Un cable de tierra se conecta directamente desde el punto de conexión del transformador al suelo, sin pasar por el tanque del transformador.	 Este diagrama muestra un transformador montado en un poste. Un cable de tierra se conecta desde el tanque del transformador y se dirige hacia abajo para conectarse al suelo.	 Este diagrama muestra un transformador montado en un poste. Un cable de tierra se conecta desde el tanque del transformador y se ramifica para conectarse tanto al tanque como al punto de conexión del neutro del transformador, antes de dirigirse al suelo.



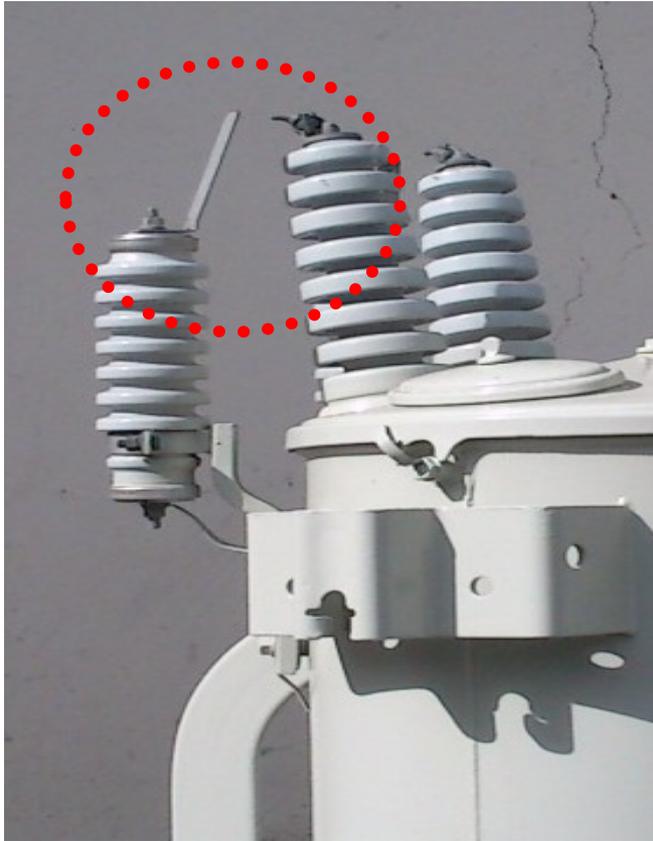
TIPOS DE CONEXIÓN DE LOS DESCARGADORES

TIPOS DE CONEXIONADOS DE LOS DESCARGADORES

Trafo	Bajante directo a tierra	Bajante de tierra a través del tanque	Bajante de tierra mallada al tanque y al neutro
Transformadores trifasicos			



CONEXIÓN DE DESCARGADORES (SIC) CON EXPLOSORES Y SIN EXPLOSORES



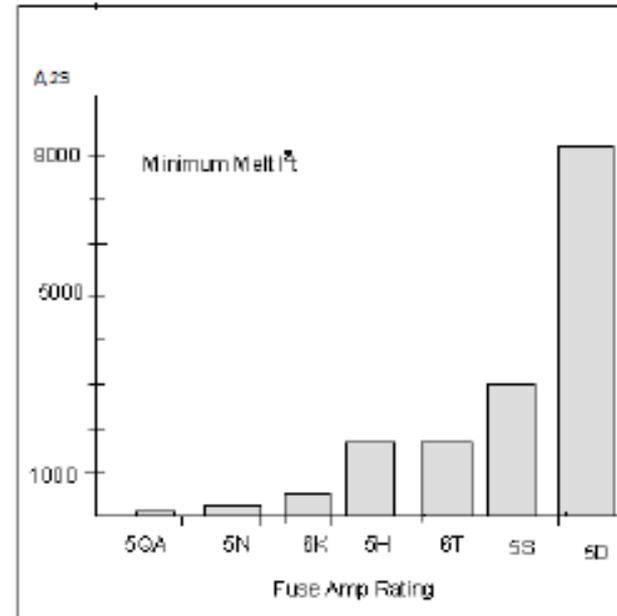
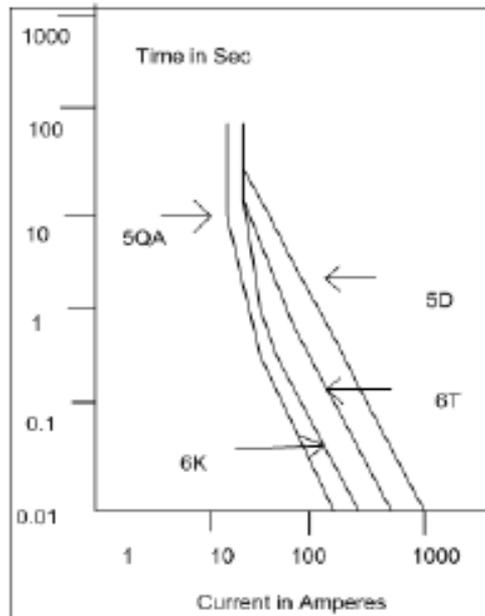
COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE DEBIDO A UN RAYO

- Los fabricantes de fusibles entregan datos como los que se presentan en la siguiente tabla para fusibles de tipo: Dual, X, QA, K, H que corresponde a la energía mínima a la cual se funden los fusibles frente a transitorios de la forma de onda de un rayo, esta energía se puede considerar constante para todo pico de corriente de corta duración; puesto que el proceso que sufre el fusible es un proceso adiabático (temperatura constante), esto debido al rango de tiempo que dura el transitorio, por ello esta energía se puede calcular con la relación I^2t .

	Fuse Rating	Min. Melt @ .01 sec	I^2t (@ .01 sec)	KI^2t	% Failure Rate (per Fig. 5*)
Cooper Type K-Links	1	44	19.36	0.01936	5.80%
	2	95	90.25	0.09025	6.60%
	10	410	1681	1.681	2.75%
	15	700	4900	4.9	1.20%
	20	875	7656.25	7.65625	0.70%
	25	1200	14400	14.4	0.55%
	30	1450	21025	21.025	0.45%
	40	1750	30625	30.625	0.30%
Kearney Type QA-Links	10	390	1521	1.521	2.80%
	15	500	2500	2.5	2.10%
	20	700	4900	4.9	1.20%
	25	895	8010.25	8.01025	0.60%
	30	1100	12100	12.1	0.55%
	40	1400	19600	19.6	0.45%
Kearney Type X-Links	1	223	497.29	0.49729	4.25%
	2	223	497.29	0.49729	4.25%
	4	960	9216	9.216	0.60%
	7	1200	14400	14.4	0.55%
	10	1200	14400	14.4	0.55%
	15	1800	32400	32.4	0.30%
Cooper Type D-Links	1	453	2052.09	2.05209	2.30%
	2	600	3600	3.6	1.55%
	4	900	8100	8.1	0.60%
	10	900	8100	8.1	0.60%
	15	900	8100	8.1	0.60%
	20	900	8100	8.1	0.60%

COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE DEBIDO A UN RAYO

- Para comprender con mayor facilidad las diferencias en las características de operación entre cada tipo de fusible frente un transitorio de corriente impulsivo que puede originarse por el contorneo de un aislador o por la operación de un descargador aguas abajo del fusible se muestra en la curva Característica Tiempo Corriente y Valores de I^2t de Fusibles.



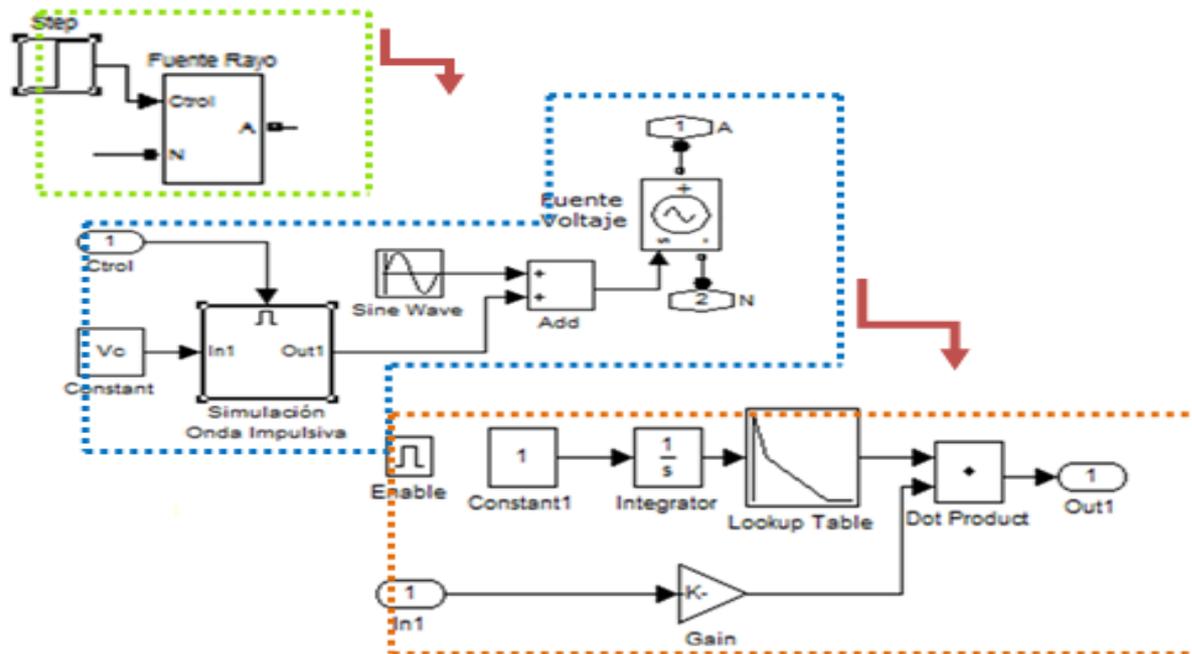
CONTENIDO

- Antecedentes del Alimentador Pilishurco
- Sobrevoltajes en Redes de Distribución
- Características de las Descargas Atmosféricas
- Elementos de Protección de Sobrevoltaje
- Modelamiento de la Red en Simulink



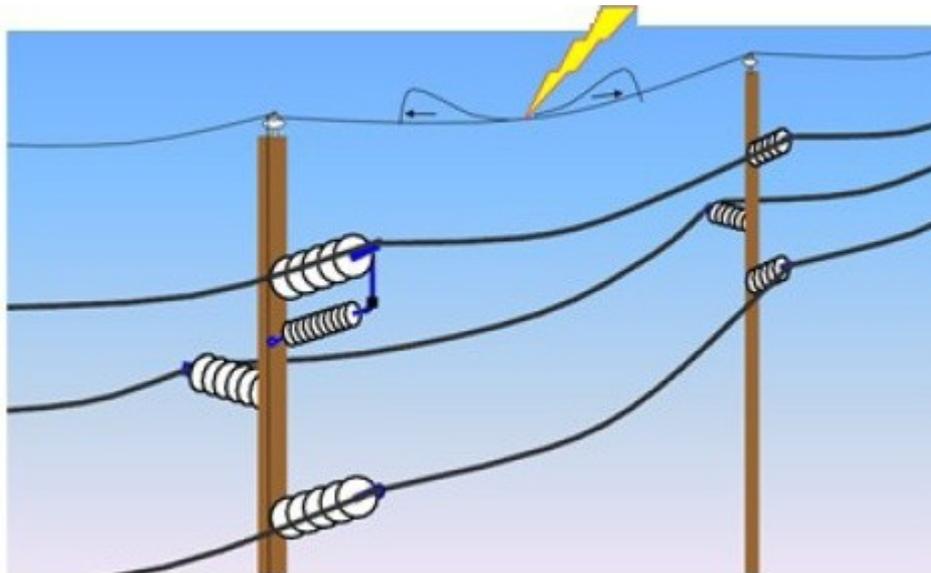
MODELO DEL RAYO

- 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, en el cual se ingresan 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.



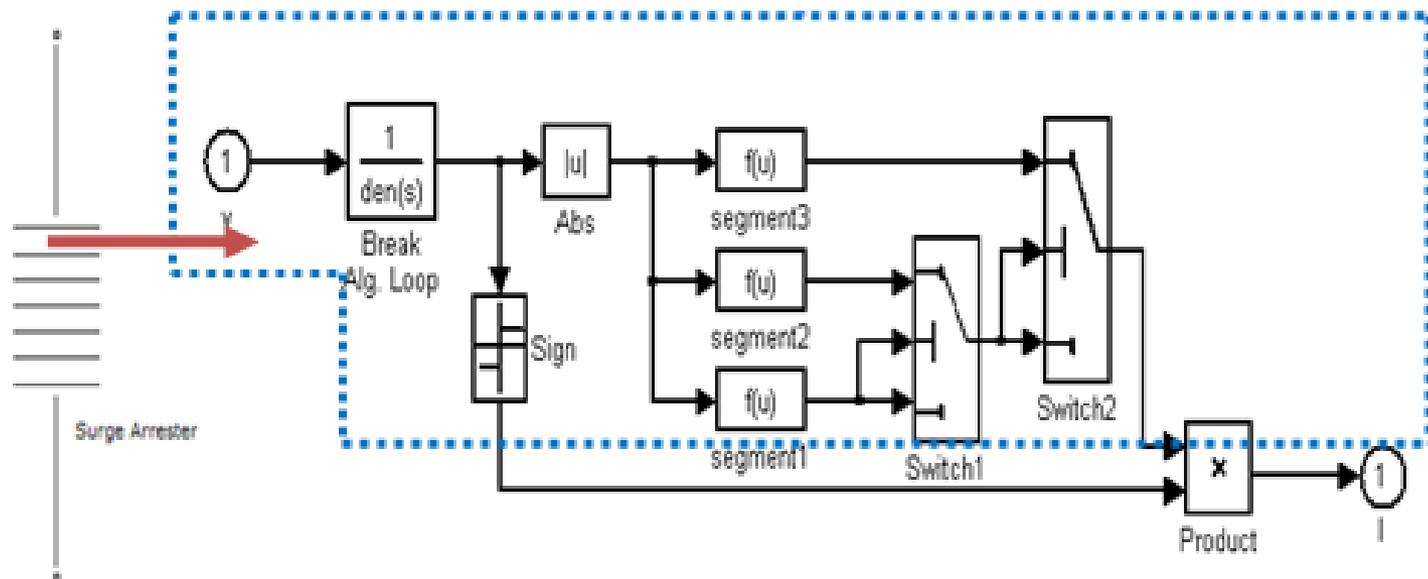
MODELAMIENTO DEL ALIMENTADOR PILISHURCO

- 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.



MODELO DE LOS DESCARGADORES DE ZNO

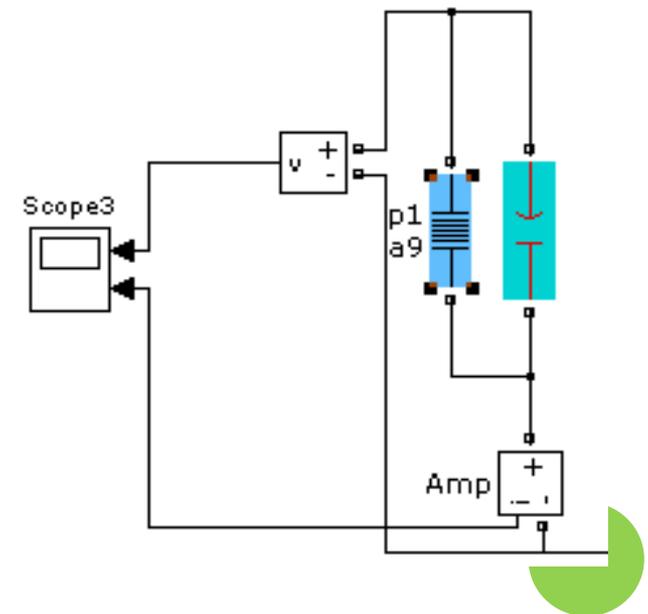
- Este modelamiento es muy importante por cuanto se determina el margen de protección efectivo y el comportamiento de las protecciones de sobrecorriente asociadas, por lo cual en el presente estudio únicamente se modela los descargadores de ZnO, debido a que son los más utilizados en la actualidad y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



MODELO DE LOS DESCARGADORES DE ZNO

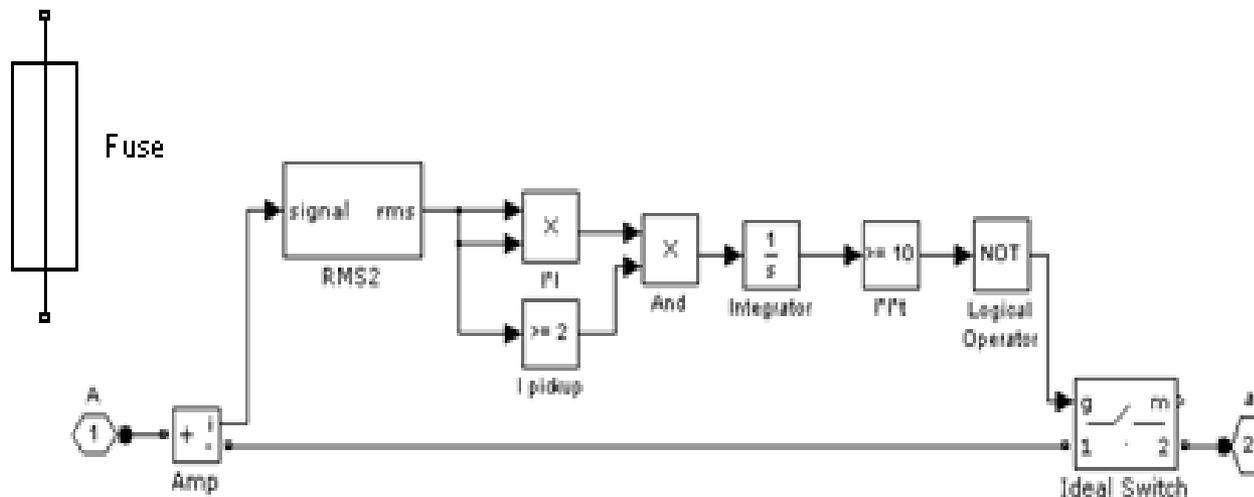
- Los parámetros ingresados en el modelo del descargador de 10 kV de Oxido de Zinc clase distribución tipo Normal Duty de la marca OHIO/BRASS se obtuvo de los catálogos. En la siguiente Tabla se muestra los parámetros considerados en el modelamiento del descargador.

Iref	0.0042	Segmento	I lim [A]	α_i	k1
Vref	14.285714	Segm 1	0.0004	3.5	3.5
		Segm 2	8	51.6	1.3
		Segm 3	80000	15.81	0.9



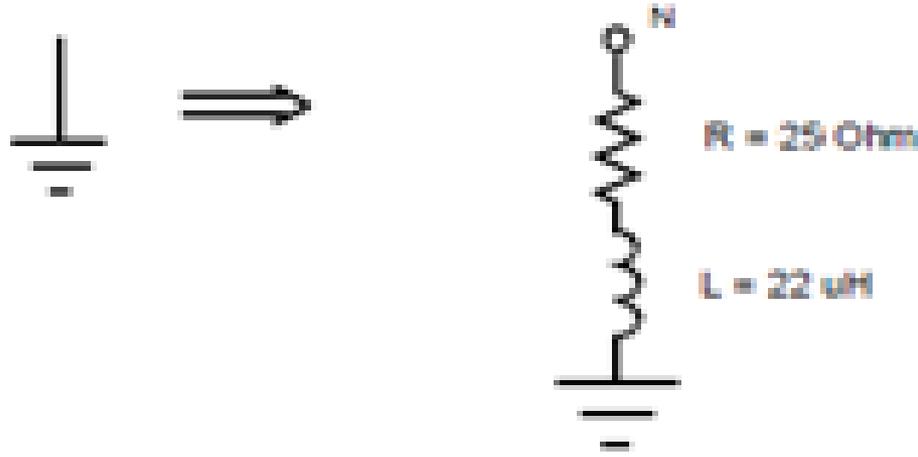
MODELO DEL FUSIBLE

- Para modelar el comportamiento del fusible frente a un sobrevoltaje atmosférico, se considera como un elemento de energía constante para su dilatación y apertura, ya que se puede elegir un fusible en función de la energía que soporte 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 Grafica



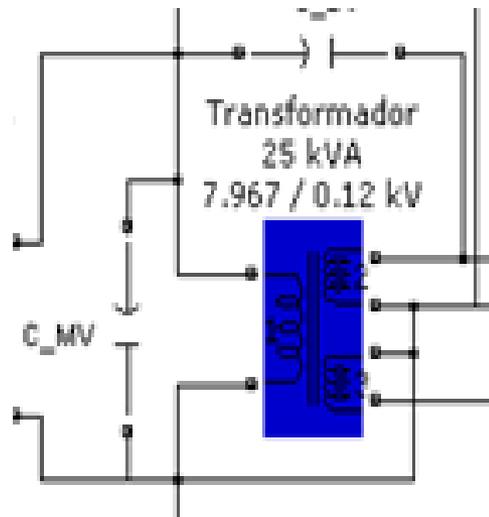
MODELO DE LA PUESTA A TIERRA

- 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.



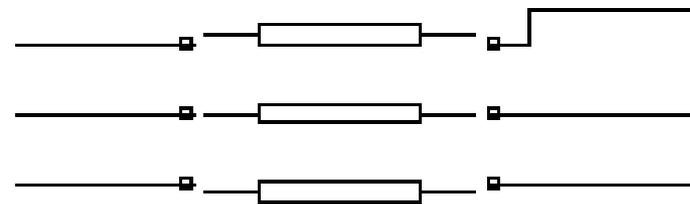
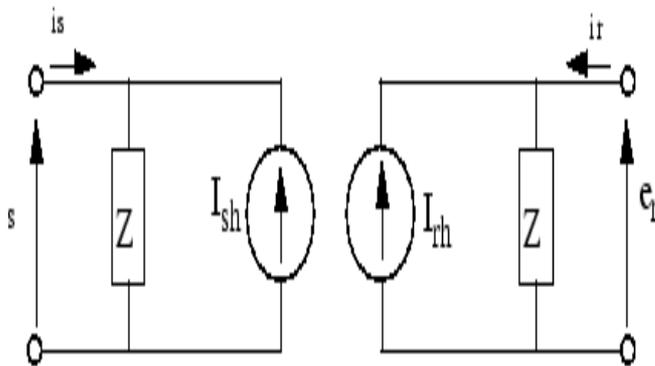
MODELO DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

- 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.



MODELO DE LA LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN

- 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, por lo cual 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.



Distributed Parameters Line



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"

- Donde:
- Z_t = Impedancia del poste (Ω)
- h = Altura del poste (m)
- r = Radio del poste (m)

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

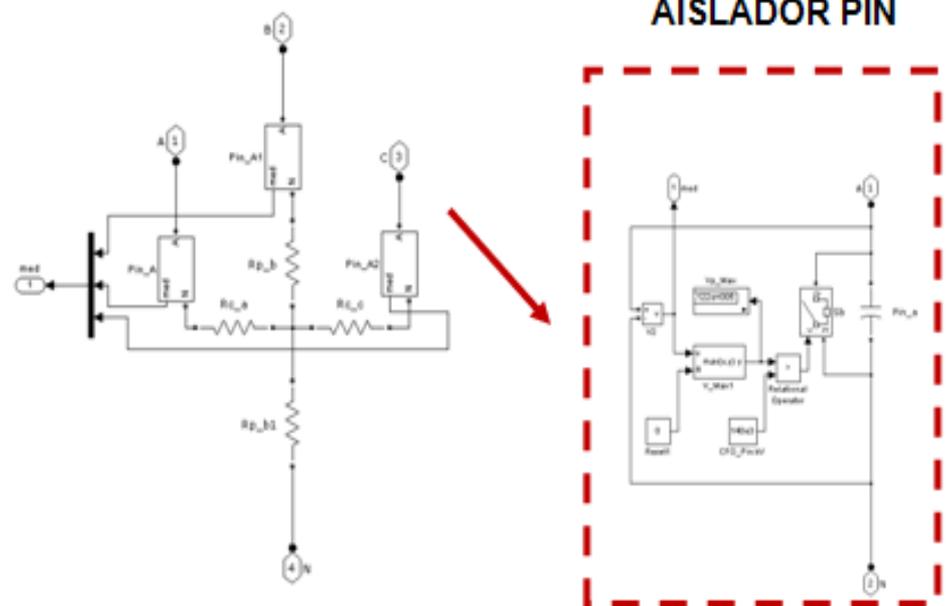
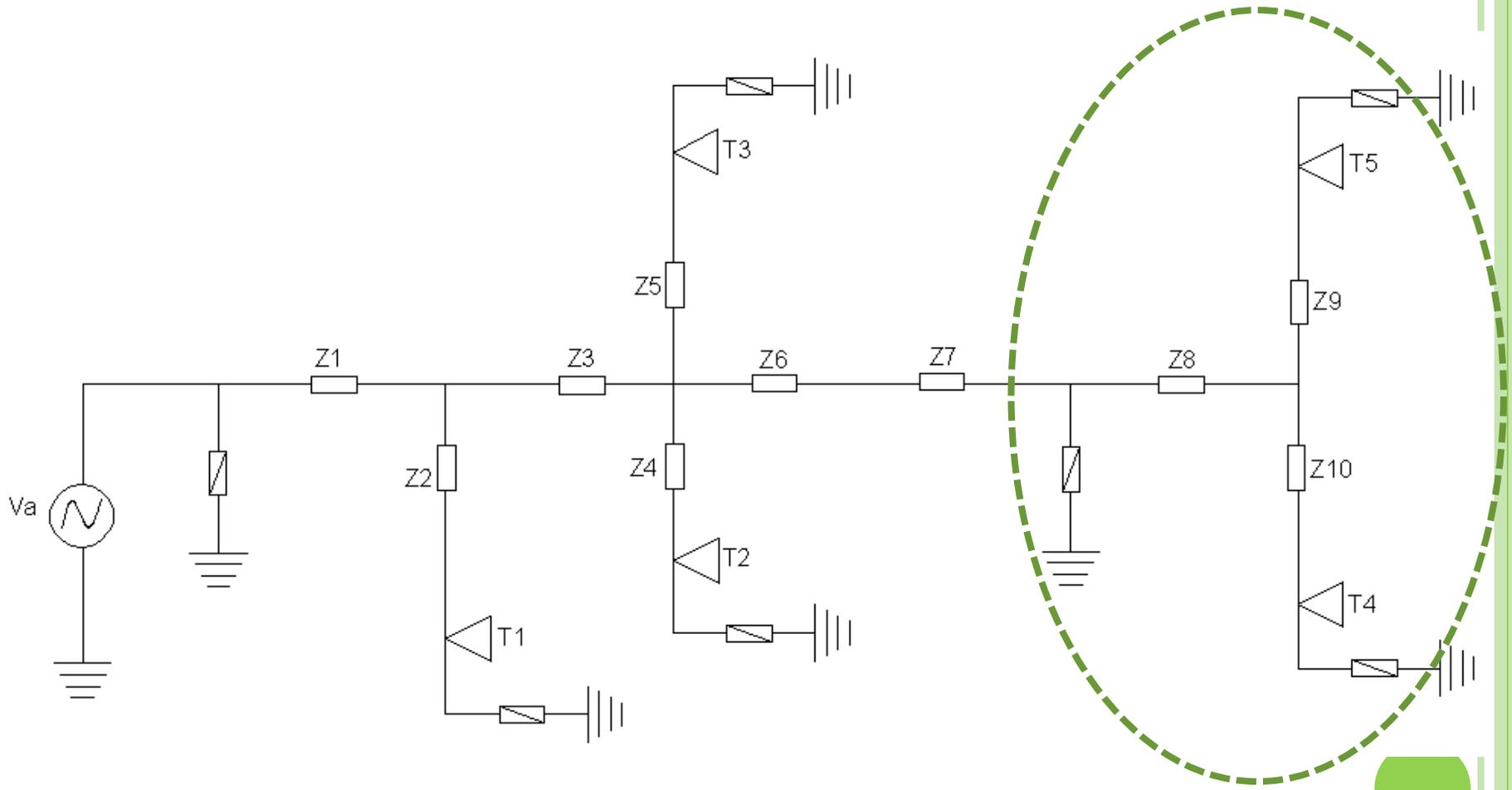


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LOS TRAMOS MÁS REPRESENTATIVOS DEL ALIMENTADOR PILISHURCO

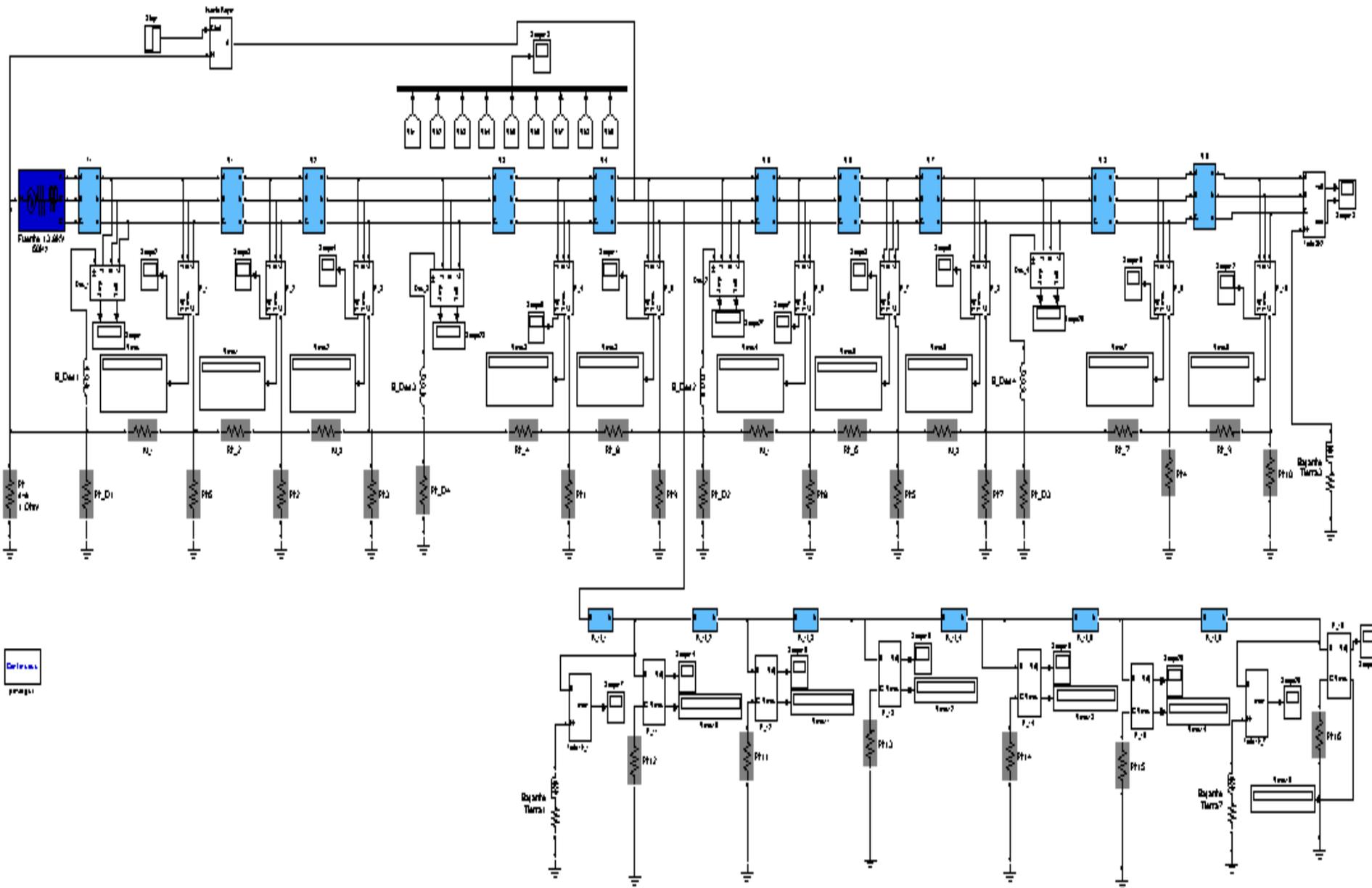


CASO DE ESTUDIO

N°	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



MODELO COMPLETO DEL TRAMO DEL ALIMENTADOR



CONTENIDO

- Antecedentes del Alimentador Pilishurco
- Sobrevoltajes en Redes de Distribución
- Características de las Descargas Atmosféricas
- Elementos de Protección de Sobrevoltaje
- Modelamiento de la Red en Simulink
- Análisis de los Resultados



ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Voltaje Aplicado según el Pico de Corriente del Rayo

Corriente Pico del Rayo(kA)	Voltaje del Rayo (kV)
10	117.89
20	169.53
30	208.27



TABLA DE PROPUESTA A ANALIZAR PARA LOS ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN DE SOBREVOLTAJE

Escenario de Simulación de los Esquemas de Conexión de las Protecciones de Sobrevoltaje				
Caso	Transformador	Fusible	Conexión de la Bajante de Tierra	Escenario
A1	Monofásico Autoprotegido 25kVA	Interno al lado de la carga	Directo a tierra	Parámetros: • Impacto directo • Corriente Pico 30kA • Pico de Voltaje de 208.27kV • Onda 1.2/50 us • Resistencia de Tierra 25Ω
A2			A través del tanque	
A3			Mallada al tanque y al neutro	
B1	Monofásico Convencional 25kVA	Lado Fuente	Directo a tierra	
B2			A través del tanque	
B3			Mallada al tanque y al neutro	
C1	Monofásico Convencional 25kVA	En paralelo al descargador	Directo a tierra	
C2			A través del tanque	
C3			Mallada al tanque y al neutro	
D	Trifásico Convencional 30 kVA	Lado Fuente	Mallada al tanque y al neutro	
E	Trifásico Convencional 30 kVA	En paralelo al descargador	Mallada al tanque y al neutro	



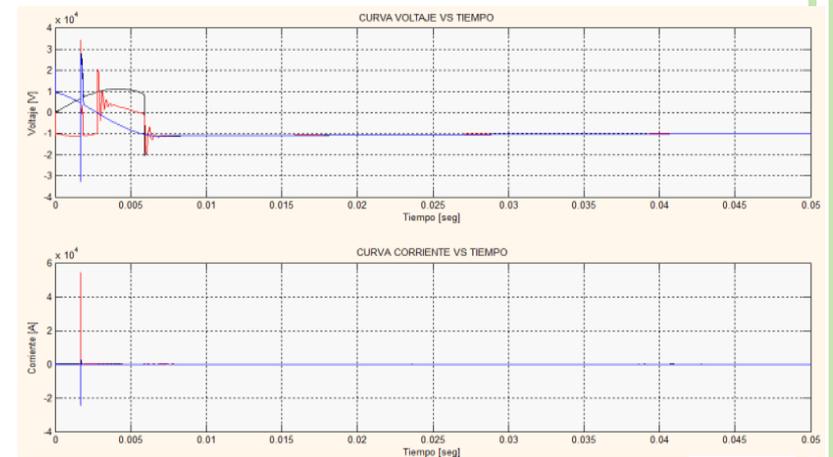
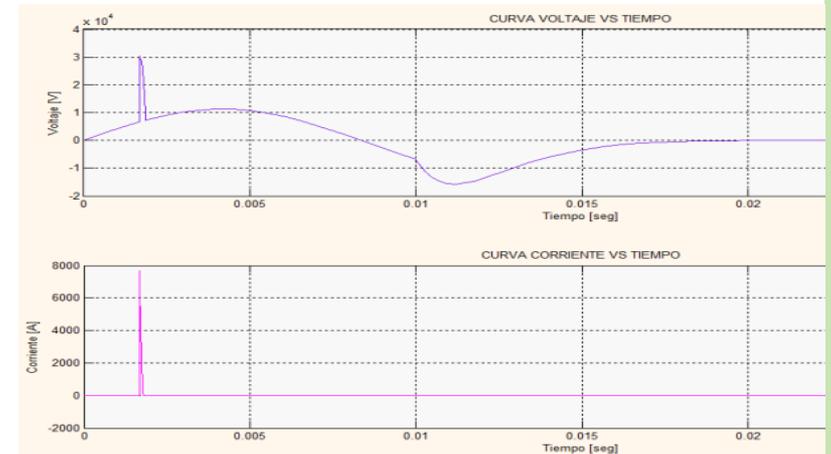
TABLA DE PROPUESTA A ANALIZAR DEL TRAMO MÁS SIGNIFICATIVO DEL ALIMENTADOR PILISHURCO CON EL ESQUEMAS ELEGIDO

Escenario de Simulación del tramo más significativo del Alimentador Pilishurco con los esquemas elegidos						
Caso	Transformador	Fusible	Conexión	Valor Pico		Escenario
				Corriente	Voltaje	
B3-D_1	Monofásico Convencional 25 kVA, Transformador Trifásico 30 kVA	Lado Fuente	Bajante de Tierra Mallada al tanque y al neutro	10 kA	117.89 kV	Parámetros: • Impacto Directo en la fase B • Impacto en el Vano #5 • Resistencia de puestas a tierra de 25 Ω • Descargadores cada 290m
B3-D_2				20 kA	169.53 kV	
B3-D_3				30 kA	208.27 kV	



DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELAMIENTO DE LOS ESQUEMAS DE CONEXIÓN DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN DE SOBREVOLTAJE

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



DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELAMIENTO DEL ALIMENTADOR PILISHURCO FRENTE A SOBREVOLTAJES

**TABLA DE RESULTADOS DEL MODELO COMPLETO PARA UN PICO DE
CORRIENTE DE 10KA.**

	Poste	Fase	Sin descargadores			Con descargadores		
			C.A.S.O.B.S - D			C.A.S.O.B.S - D		
			Vp-Lm [kV]	Ip-osa [kA]	Op. fusible	Vp-Lm [kV]	Ip-osa [kA]	Op. fusible
TRONCAL TRIFASICO	1	A	49.69	-	-	31.71	1.02	-
		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	46.24	-	-	26.26	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	-
	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 III MONOFASICO	1	B	45.66	1.92	NO	37.96	1.16	NO
	2		44.90	-	-	37.40	-	-
	3		35.60	-	-	32.01	-	-
	4		38.81	-	-	31.70	-	-
	5		36.60	-	-	30.20	-	-
	6		36.52	0.55	NO	28.68	0.376	NO

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELAMIENTO DEL ALIMENTADOR PILISHURCO FRENTE A SOBREVOLTAJES

RESULTADOS DEL MODELO COMPLETO PARA UN PICO DE CORRIENTE DE 10kA

TRONCAL TRIFASICO	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	*
		A	35.20	*	*	23.42	*	*



RESULTADOS DEL MODELO COMPLETO PARA UN PICO DE CORRIENTE DE 20 kA

TABLA DE RESULTADOS DEL MODELO COMPLETO

	Poste	Fases	Sin descargadores			Con descargadores		
			CA 30 BS - D			CA 30 BS - D		
			Vp _{Lin} [kV]	Ip _{Car} [kA]	Operación fusible	Vp _{Lin} [kV]	Ip _{Car} [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	45.64	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	1	B	44.69	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

RESULTADOS DEL MODELO COMPLETO PARA UN PICO DE CORRIENTE DE 20 kA

TRONCAL TRIFASICO	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	*	*



RESULTADOS DEL MODELO COMPLETO PARA UN PICO DE CORRIENTE DE 30 KA

TABLA DE RESULTADOS DEL MODELO COMPLETOS

	Poste	Fase	Sin descargadores			Con descargadores		
			CASO B3 - D			CASO B3 - D		
			Vp _{LV} [kV]	I _{p_{max}} [kA]	Op. fusible	Vp _{LV} [kV]	I _{p_{max}} [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	3.35	*
	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	*	*	106.8	*	*
		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	*	*	107.2	*	*
		C	32.81	*	*	45.51	*	*
	7	A	45.33	*	*	45.84	*	*
		B	108.16	*	*	106.5	*	*
		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	1	B	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

RESULTADOS DEL MODELO COMPLETO PARA UN PICO DE CORRIENTE DE 30 KA

TRONCAL TRIFASICO	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	*	*

RAMAL #1 MONOFASICO	9	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	
	1	B		52.53	2.57	NO	53.95	2.75	SI
				52.43	*	*	53.80	*	*
				41.61	*	*	44.26	*	*
				42.54	*	*	41.45	*	*
				42.09	*	*	41.68	*	*
			42.02	0.822	NO	47.25	0.989	NO	



CONTENIDO

- Antecedentes del Alimentador Pilishurco
- Sobrevoltajes en Redes de Distribución
- Características de las Descargas Atmosféricas
- Elementos de Protección de Sobrevoltaje
- Modelamiento de la Red en Simulink
- Análisis de los Resultados
- Conclusiones y Recomendaciones



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 esquemas 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.



CONCLUSIONES

- 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 oxido Metálico, tipo Heavy Dutty que soportan adecuadamente la energía asociada a la descarga.



RECOMENDACIONES

- ❑ Utilizar el esquema de conexión del Transformador Convencional con el Fusible al Lado de la Fuente con Bajante de Tierra Mallada al Tanque y al Neutro en la zona de mayor probabilidad de descargas que en este caso es la cima del alimentador, con el propósito de disminuir los índices de servicio técnico mediante la selectividad de las zonas que se quedan sin servicio.
- ❑ Colocar cada 290m dependiendo de la distancia del vano un descargador de oxido metálico en el cerro del Alimentador Pilishurco.
- ❑ Realizar inspecciones para verificar que las puestas a tierra de los descargadores como de los transformadores se encuentren con una resistencia menor a 25Ω .



Muchas
Gracias !

FIN

