

La teoría de los lazos inductivos y las fallas de los transformadores de distribución en Colombia

Francisco Román-Campos
 Profesor Asociado
 Universidad Nacional de Colombia
 Apartado Aéreo 80789

INTRODUCCION

La continua falla de los transformadores de distribución es uno de los problemas más críticos que afronta el Sector Eléctrico colombiano.

Para tratar este problema, que para 1991 puede significarle a Colombia más de 6.000 millones de pesos, se ha propuesto la Teoría de los Lazos Inductivos como marco teórico coherente [1], [2] que puede explicar el origen y las principales manifestaciones esperadas de las mismas. Por esto se presentan inicialmente en este artículo los fundamentos de la teoría, destacándose los factores interactuantes en la misma: El montaje de los transformadores y -Los rayos negativos que impactan la línea o en las cercanías de la misma. La exposición de la teoría finaliza con un análisis de los valores de sobre-tensión esperados.

Este artículo tiene por objeto presentar la Teoría de los Lazos Inductivos - TLI - como una metodología de trabajo coherente para analizar las fallas de los transformadores de distribución en Colombia.

Como variables fundamentales en la formulación de la teoría se considera la relación entre las fallas y las tormentas eléctricas; el área dejada en el montaje entre el pararrayos y el transformador y los cambios de impedancia al operar el pararrayo.

Para comprobar la teoría se analiza la relación de las fallas de los transformadores con las tormentas eléctricas en varias redes de distribución en Colombia. Igualmente se establece una primera relación entre rayos medidos y clasificados por polaridad y las fallas de unidades en el mismo período.

Los resultados de los análisis estadísticos de más de 3.000 unidades falladas contribuyen a inferir la aplicabilidad de la teoría, por cuanto se encontraron más de un 70% de fallas involucrando tres fases.

Se presentan finalmente las primeras simulaciones digitales mediante el EMPT, de las que se concluye la necesidad de adoptar medidas remediabiles adecuadas a la realidad colombiana.

Según Guhl [3] el clima es "el conjunto de los diferentes estados de tiempo posibles que se presentan sucesivamente a través de largos períodos, su desarrollo cíclico anual y sus oscilaciones diurnas". Por esto es el clima un factor geográfico a considerar para explicar las tormentas eléctricas en Colombia, variable determinante en la formulación de la Teoría de los Lazos Inductivos. Se presentan por lo tanto las determinantes geográficas de los climas en Colombia, enfatizando en el Ciclo Anual de Lluvias, elemento relacionado directamente con las tormentas eléctricas y el nivel cerámico [4].

Se complementa el aspecto geográfico con la influencia observada del incremento de la actividad eléctrica atmosférica en la zona de Pereira a raíz de la erupción del volcán Nevado del Ruíz [5].

Como casos concretos de la directa relación de las tormentas eléctricas con las fallas se presentan los primeros resultados de los conteos de los rayos en la zona crítica de la Palma, Cundinamarca y su correlación con las fallas de transformadores de distribución.

Igualmente se formulan las primeras relaciones entre rayos positivos y negativos, rayos entre nubes y se proyectan los primeros datos de densidad de rayos por

kilómetro cuadrado para Colombia, enfatizándose en la presencia de valores hasta ahora no esperados y que proyectan esta zona a uno de los primeros lugares de actividad eléctrica atmosférica en Colombia.

Como complemento se presentan relaciones importantes entre días tormentosos y fallas de transformadores para la zona Sur de Bogotá, destacándose sitios con más de 12 transformadores fallados por kilómetro cuadrado en el período comprendido entre febrero de 1988 y agosto de 1990. El análisis de fallas complementado con resultados en la zona de la Electrificadora del Huila y Cundinamarca con énfasis en las relaciones de las fallas y los meses críticos.

Como complemento se formula el primer **Índice de Fallas de Transformadores de Distribución** obtenido a partir de encuestas en las electrificadoras del país.

La Teoría de los Lazos Inductivos predice fallas trifásicas en equipos bien protegidos, anomalía comprobada en el examen de más de 3.000 unidades falladas de la EEB. Este resultado, muy difícil de explicar en unidades de distribución, se constituye en un gran respaldo a la teoría.

Más adelante se discuten los factores que en cadena actúan incrementando la criticidad de las pendientes de las corrientes de los rayos y que en su orden son:

-El cambio de impedancia de línea aérea a la resistencia de puesta a tierra en el momento de la operación del pararrayos, acentuado por el comportamiento de la puesta a tierra en estado transitorio;- El cambio de impedancia de los vanos largos en líneas de distribución que hacen más escarpada la corriente en el sitio de montaje del transformador;- La operación de la resistencia no lineal del pararrayos que aumenta la corriente al alcanzarse la tensión de reacción del pararrayos.

El artículo presenta finalmente los resultados de las simulaciones computacionales con el EMPT de los modelos de montaje del transformador encontrándose valores muy consistentes con las respuestas del modelo a las fuentes de corriente que se producen en la naturaleza los rayos negativos- ya que se generan voltajes superiores al BIL en los terminales del transformador.

Otras conclusiones del trabajo convergen en la necesidad de revisar las normas de montaje y ensayo de los transformadores de distribución en Colombia, haciendo énfasis en los procedimientos que deben ser tenidos en cuenta antes de formular cambios en la norma, dejando abierta la posibilidad de desarrollar nuevas protecciones para los equipos de distribución en Colombia y lógicamente avanzar en la medición de los parámetros eléctricos de los rayos colombianos.

De los anteriores análisis, tanto geográficos como de simulación digital de modelos, se establece la coherencia de la teoría de los Lazos Inductivos como marco teórico dentro del cual pueden analizarse las fallas de las unidades de distribución.

1. LA TEORIA DE LOS LAZOS INDUCTIVOS

La mayoría de los transformadores de distribución en Colombia y en algunos países en el área como son Brasil y Ecuador siguen las normas de la Rural Electrification Association -REA- [6] de 1968, en la que los pararrayos se instalan en paralelo con el conjunto transformador cortacircuitos, según el montaje de la figura 1 [7].

Haciendo un cuidadoso análisis del dibujo propuesto por la norma, se encuentra que los conductores de conexión entre el pararrayos y cada pasatapas del transformador crean una inductancia, que hemos llamado "Lazo Inductivo", véase Figura 2, para relacionarlo con una aplicación similar descrita por Prinz [8], [9], Hasse y Wiesinger [10] y que se refiere a las tensiones electromagnéticas inducidas en todos los lazos cerrados formados por las instalaciones domiciliarias que se encuentran en la cercanía de los conductores que evacúan las corrientes de los rayos directos que han impactado en los pararrayos tipo Franklin instalados sobre los edificios o viviendas, tal como lo indica la Figura 3 [10].

El lazo inductivo opera bajo la presencia de corrientes de alta pendiente que son evacuadas por el pararrayos

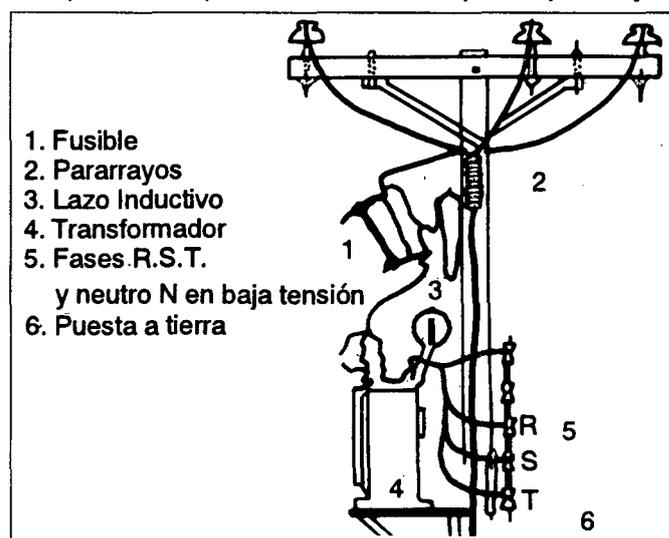


Figura 1: Norma colombiana para la instalación de transformadores de distribución en poste [7].

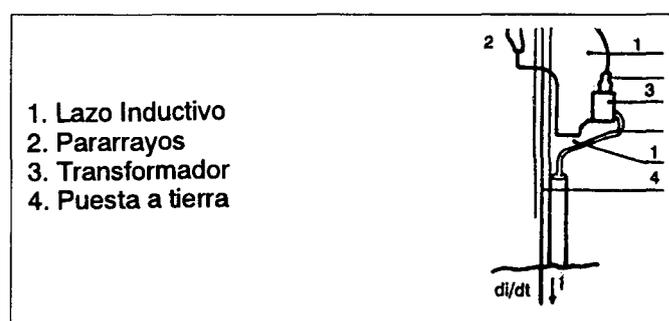


Figura 2. Lazo inductivo en la instalación de transformadores de distribución en Colombia.

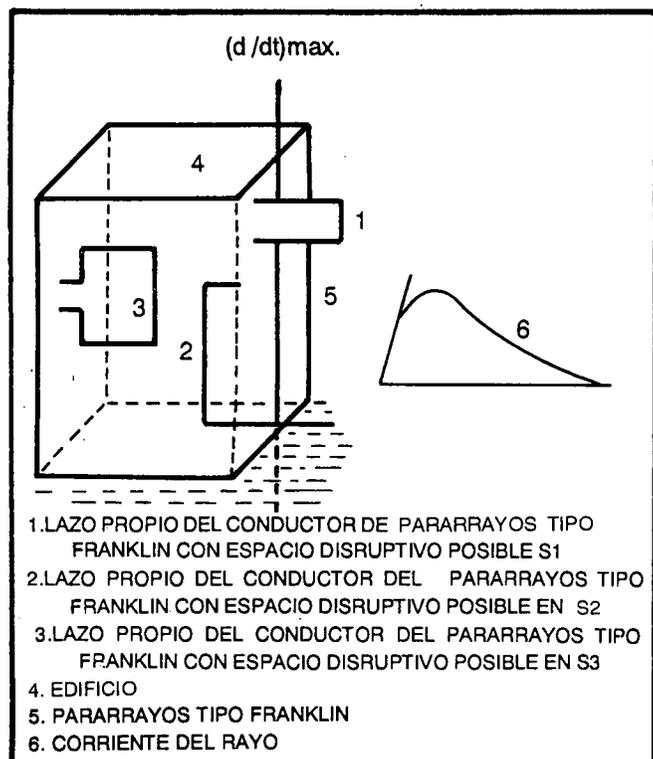


Figura 3:
Tensiones inducidas en lazos, causadas por las máximas pendientes de las corrientes de los rayos $(di/dt)_{max}$.

generando simultáneamente sobretensiones en cada una de las tres fases del transformador.

Cuando el pararrayos conduce la corriente del rayo, el Lazo inductivo actúa como un espira en paralelo con el transformador generando un voltaje dependiente de la pendiente de la corriente, el cual aparece entre cada pasatapas y el tanque del transformador y que puede ser calculado aproximadamente de la siguiente forma:

$$V(t) = L \cdot (di/dt) \quad (I)$$

Donde:

L = es la inductancia del lazo

(di/dt) = es la pendiente de la corriente

V(t) = Voltaje generado en el lazo.

Para la instalación normalizada en Colombia, la inductancia puede tomar un valor medio de 3 H para unidades instaladas en el poste y 4 H para unidades instaladas en estructura de dos postes tipo "H".

A partir de nuestras observaciones en diferentes ciudades de Colombia, se ha encontrado que estos valores pueden ser incrementados en más de un 50%, hallándose casos extremos en las zonas rurales del país que pueden ser del orden de 4 y 6 H respectivamente.

FUENTES DE ONDAS ESCARPADAS DE CORRIENTE

Las tormentas eléctricas son fuentes de ondas de corriente muy escarpadas. Los rayos negativos se caracterizan por presentar esta propiedad, especialmente el segundo rayo subsecuente, como lo indican Uman [11], Berger [12] y Lewis [13] y se puede apreciar en el oscilograma 4 captado por Berger presentado en la Figura 4. Guidice y Lo Piparo [14] indican como valores más probables para el máximo de (di/dt) 80KA/us y los valores más frecuentes para el primer subrayo negativo están entre 7 y 13KA/us y entre 25 y 30 KA/us para los rayos sucesivos.

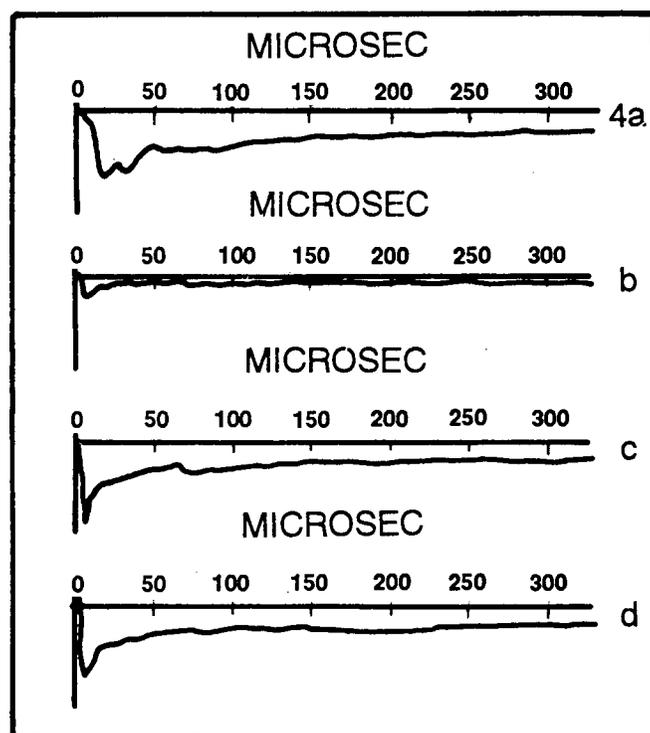


Figura 4:
Oscilograma número 4 obtenido por Berger 1963.06.24. Nótese el alto valor de (di/dt) para el segundo subrayo negativo [12].

En Boeck [15] se presenta como valor con 50% de probabilidad para todos los rayos medidos por Berger un valor de 20KA/us. Sin embargo, Berger ha presentado en [12] 25KA/us como el valor para (di/dt) con 50% de probabilidad para los 212 rayos negativos por él medidos.

RAYOS INDIRECTOS

Los rayos que caen en la cercanía de las líneas de distribución pueden ser fuentes de corriente de alta pen-

diente, en especial si su punto de impacto coincide con el eje de la línea de distribución.

De la Rosa [16] ha medido voltajes con pendientes del orden de 6KV/us como lo muestra la **Figura 5**, en la cual se aprecia en la parte inferior la forma del campo eléctrico inducido. Igualmente ha hecho mediciones de corriente de rayo en el rango de los microsegundos obteniendo en una línea experimental aterizada en uno de sus extremos la forma de la onda mostrada en la **Figura 6**. Este valor corresponde a cerca de 16A/us , valor bajo para excitar el Lazo Inductivo, pero debe considerarse que esta medición fue obtenida en una escala muy grande - 2us/div - lo que hace suponer que valores de pendiente de la corriente inducidas por los rayos para que puedan ser perjudiciales para el transformador deben estar en el orden de los **Amperios por nanosegundos**, valor que debe medirse en terreno cuando entre en operación la etapa de mediciones de este trabajo.

SOBRETENSIONES ESPERADAS

Como se explica adelante, puede aproximarse para Colombia que la mayoría de los rayos son negativos. De acuerdo a los valores encontrados como típicos para este tipo de rayos - 25KA/us - y considerando $4\mu\text{H}$ como valor típico para la inductancia en paralelo con el transformador, existe una probabilidad del 50% de que aparezcan 100kV sobre el transformador. Este valor es muy superior al BIL normalmente utilizado en Colombia (95kV).

Esta situación se hace más crítica por el cambio de impedancia en tierra como se indica más adelante.

Dado que los rayos se originan principalmente en las tormentas eléctricas, se presentan a continuación sus factores determinantes en Colombia.

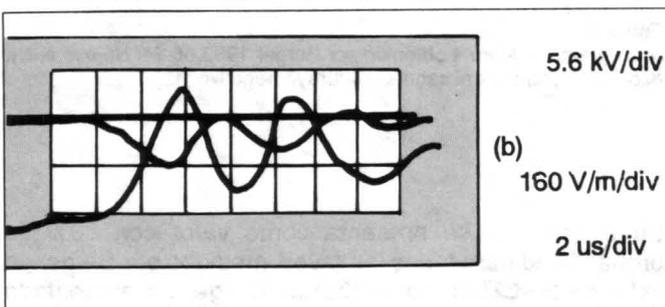


Figura 5: Oscilograma del voltaje y campo eléctrico medido por De la Rosa [16] en línea experimental en México.

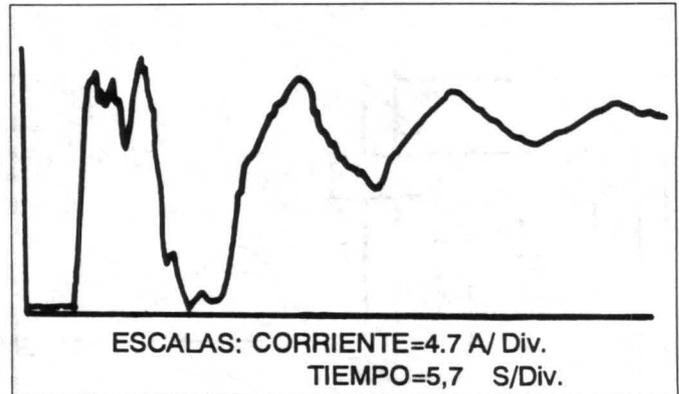


Figura 6: Corriente a través del conductor de tierra medido por De la Rosa [16] en México.

2. DETERMINANTES GEOGRAFICOS DE LOS CLIMAS COLOMBIANOS

Según Guhl [3], el clima es determinado por tres características geográficas:

- Su posición geoastronómica.
- La ubicación geográfica continental.
- El relieve y su extensión.

Por su ubicación geoastronómica, "dos tercios del territorio se ubican en aquella parte de la zona intertropical que se caracteriza por dos épocas de lluvia y dos secas, o de escasa lluvia, en un mismo año". "El sol culmina dos veces al año, por lo mismo existen dos períodos de días más largos y otros más cortos, aunque la diferencia es de pocos minutos y de ninguna importancia para el régimen térmico y de iluminación, sí influye en cambio en el régimen hídrico, ya que determina la distribución de lluvias a través del año en la zona intertropical, fijando dos períodos de lluvia y sequía, respectivamente; los primeros son determinados por la culminación del sol."

Los tres fenómenos atmosféricos más estrechamente ligados a la determinación del clima ambiental regional colombiano son la temperatura que es casi constante; la lluvia y la humedad ambiental con la característica nubosidad y los vientos juegan papel importante a través de su influencia sobre los anteriores, destacándose los vientos alisios del Noroeste, los del Sureste y la Zona intertropical de las calmas ecuatoriales.

De estos factores que determinan el clima ambiental, es de importancia fundamental el ciclo de las lluvias, ya que de ellas dependen las tormentas eléctricas, fuentes fundamentales de los rayos.

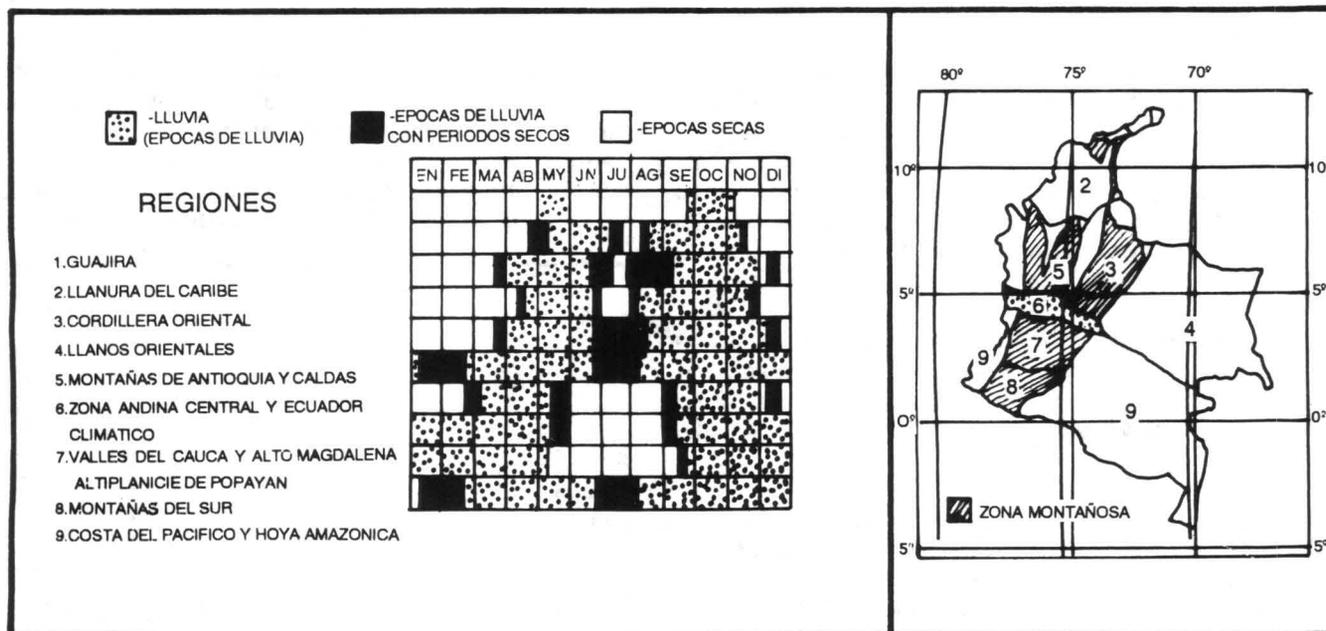


FIGURA 7
Ciclo anual de lluvias en Colombia, según Guhl [3].

EL CICLO ANUAL DE LAS LLUVIAS EN COLOMBIA.

El Ciclo Anual de las Lluvias en Colombia esta regido por factores astrales, depende de la circulación atmosférica planetaria pero es modificado considerablemente en partes del territorio por factores regionales de topografía, por su forma y su extensión.

La Figura 7 presenta el Ciclo Anual de Lluvias en Colombia mostrando claramente dos épocas lluviosas y dos secas en algunas partes del país, siendo muy cortos los períodos secos o casi inexistentes en las zonas 6 y 9 del país.

La relación de las tormentas eléctricas con la lluvia ha sido analizada por Castaño y Pérez [4] para la zona central del país, encontrándose una buena correlación entre el nivel cerámico y la precipitación.

3. EPOCAS TORMENTOSAS Y FALLAS DE TRANSFORMADORES

Para inferir algunas conclusiones respecto a la relación de las tormentas eléctricas y los rayos, variable fundamental en la Teoría de los Lazos Inductivos, se analizaron las zonas de la Palma, Cundinamarca, Bogotá, -Zona Sur- y las Electrificadoras de Cundinamarca y Huila, las cuales se exponen a continuación:

En la zona de la Palma se realizaron las primeras mediciones de Rayos en Colombia que se han contrastado con fallas de transformadores de Distribución. Los resultados del corto período comprendido entre el 27 de octubre y el 31 de diciembre de 1990 han mostrado los

datos globales de la Tabla 1. medidos por el contador CGR3 donado por los Profesores Mackerras y Darveniza de la Universidad de Queensland, Australia, con quienes hemos establecido un convenio para la medición de la relación $Z = (Nc / Ng)$, donde Nc es la Densidad de los Rayos entre Nubes y Ng es la Densidad de los Rayos a tierra, con el fin de inferir conclusiones acerca de la relación de la variable Z y la latitud del sitio de medida.

TABLA 1
RESUMEN DE LAS MEDICIONES EN LA PALMA
DATOS DE 1990-09-27 AL 1990-12-31

| | | |
|--|----------|-------|
| TOTAL RAYOS A TIERRA | ≤ 14 km | 2150 |
| RAYOS NEGATIVOS | ≤ 14 km | 2144 |
| RAYOS POSITIVOS | ≤ 14 km | 6 |
| RAYOS ENTRE NUBES | ≤ 14 km | 188 |
| RAYOS LEJANOS | > 200 km | 28705 |
| RAYOS MUY CERCANOS | < 14 km | 63 |
| DENSIDAD DE RAYOS [Rayos/km ² cn = 2 meses] | | 3.49 |
| $Z = Nc / Ng$ | | 0.09 |

De la Tabla 2 se desprende que en el poco tiempo medido, cerca de dos meses, se lograron valores superiores a la Densidad de Rayos en una año en Europa, colocando a Palma como uno de los sitios de experimentación y medición de Rayos con más posibilidades en Colombia.

De la tabla 1 se establece igualmente que la mayor parte de los rayos fueron Negativos, factor que de acuerdo a lo expuesto por la Teoría de los Lazos Inductivos, explica las fallas de los transformadores.

Igualmente presenta una muy alta densidad de rayos por kilómetro cuadrado - 3.49 -, lo que proyectado a un año puede ser de los más altos del mundo.

Se contradice con estas mediciones la conclusión expuesta en [18] acerca de las primeras mediciones logradas en Colombia, por los contadores RSA10 desarrollados por Anderson [19] e instalados en el Aeropuerto El Dorado de Bogotá [20]. Es factible que estas mediciones sean falsas por la instalación incorrecta del contador, al ser apantallado por otras antenas localizadas en ese sitio, caso que no sucedió en La Palma.

La Figura 8 muestra los sitios donde fallaron 110 transformadores en el período de medición comprendido entre el 29 de septiembre y el 6 de enero de 1991, correspondiente a la segunda temporada invernal en La Palma.

Durante el período del 15 al 31 de diciembre de 1990, el contador RSA10 registró 2.343 rayos, para una densidad de 1,7 Rayos / Km cuadrado en diecisiete días, lo cual refuerza los valores captados por el CGR3. Durante este corto período fallaron doce unidades, tal como lo indica la Figura 9. Se observa una correspondencia entre las unidades falladas y los días con tormentas, uno de ellos con más de 500 rayos a tierra dentro del radio de acción de 20 kilómetros del contador.

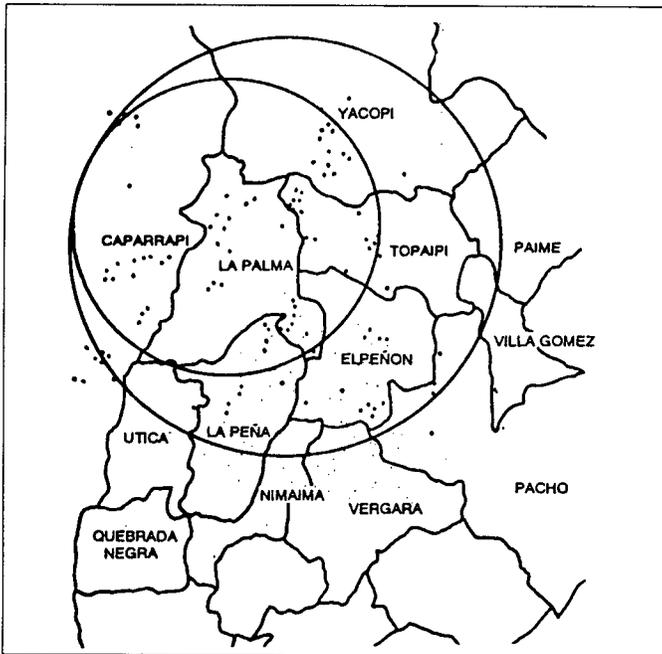


Figura 8: Los puntos representan los sitios donde fallaron 110 transformadores en La Palma durante los tres meses de invierno de 1990. Los círculos son los radios de acción de los contadores CGR3 - el pequeño - y RSA10 - el grande.

Zona Sur de Bogotá, Caso Urbano.

Gracias a la información de la EEB se ubicaron los sitios de 696 unidades de la zona urbana, que se cambiaron en el sur de la ciudad en el periodo comprendido entre febrero de 1986 y agosto de 1990. Las principales

causas de cambio fueron: unidades quemadas, estrelladas, cambio de voltaje, subestación inundada, buje roto, tanque roto, remodelación de redes, empaquetadura dañada, baja rigidez dieléctrica del aceite, falta de tensión, variación de carga, escape de aceite, mala regulación, bornes quemados, y transformador fuera de servicio.

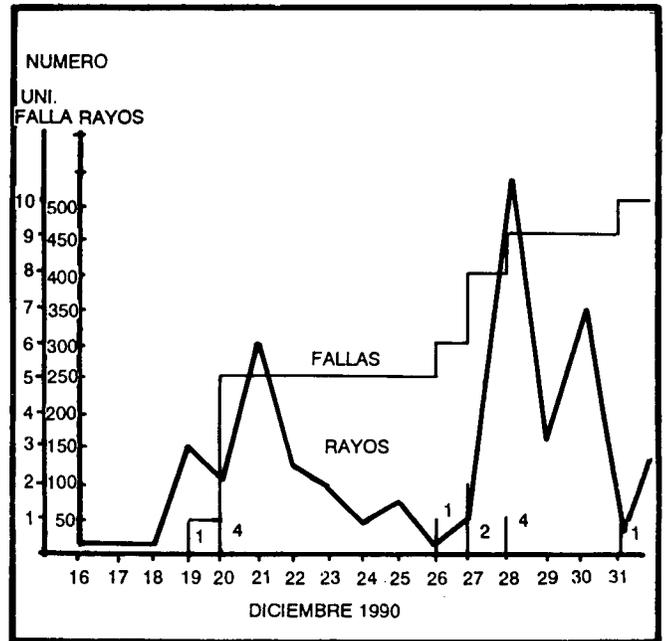


Figura 9: Diagrama de los rayos contados por el Equipo RSA10 instalado en La Palma entre el 1990-12-15 y 1990-12-31 y el número acumulado de unidades falladas en el mismo período.

La Figura 10 representa los puntos donde fallaron las unidades, notándose algunos sitios de alta densidad de fallas. La Figura 11 presenta los sitios de mayor densidad de fallas siguiendo las mismas coordenadas de la figura anterior.

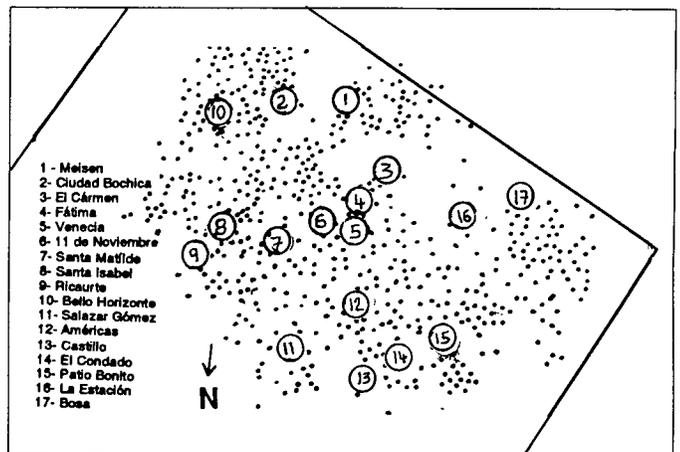


Figura 10. Transformadores cambiados en la zona Sur de Bogotá, en el período 1988-02 y 1990-08. Las coordenadas corresponden al mapa de Bogotá.

TABLA 9.

| | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| A | | | | | 1 | | | | 6 | 7 | 2 | | | | | | | |
| B | | | | | | 1 | 4 | 5 | 5 | 8 | 7 | | | | | | | |
| C | | | | | | | | 3 | 2 | 6 | 2 | | | | | | | |
| D | | | | | | | 3 | 11 | 6 | 2 | 2 | 1 | | | | | | |
| E | | | | | | 12 | | 8 | 5 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | | | | |
| F | 1 | 2 | | | | 3 | 2 | 6 | 3 | 2 | 1 | | 1 | 4 | 3 | | | |
| G | | 1 | | | 1 | 5 | 1 | 8 | 9 | 5 | 5 | 2 | | 7 | 10 | 1 | | |
| H | | | | | 1 | 2 | 7 | 7 | 6 | 4 | | 5 | | 7 | 11 | 2 | | |
| I | 1 | | | | | | 2 | 6 | 4 | 7 | 2 | 5 | 2 | 6 | | | | |
| J | | | | | | 3 | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | 12 | 12 | 1 | | 1 | 3 | |
| K | | | | | | 2 | 2 | 4 | 3 | 2 | 2 | 4 | 6 | 1 | 4 | 7 | 3 | |
| L | | | | | | | | 7 | 5 | 6 | 8 | 10 | 4 | 10 | 7 | 10 | | 1 |
| M | | | | | | | 1 | 1 | 2 | 8 | 3 | 3 | 2 | 7 | 8 | 9 | 4 | 10 |
| N | | | | | | | | 2 | 1 | 7 | 7 | 3 | | 7 | 5 | 1 | 4 | 2 |
| O | | | | | | | | | | 1 | 8 | 8 | 3 | | | | | |
| P | | | | | | | | | | 1 | 2 | | | | | | | |
| Q | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| R | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

-  Promedio/Km2 superior a 9
-  Promedio/Km2 entre 8 y 9
-  Promedio /Km2 superior a 7

Figura 11.

Figura 11. Sitios de mayor densidad de cambios de transformadores. Nótese que las zonas de mayor densidad están rodeadas por otras de menor densidad. Las coordena-

das corresponden al mapa de Bogotá de la figura anterior.

La Figura 12 muestra la distribución de las fallas y su correlación con los meses del año en la zona sur de

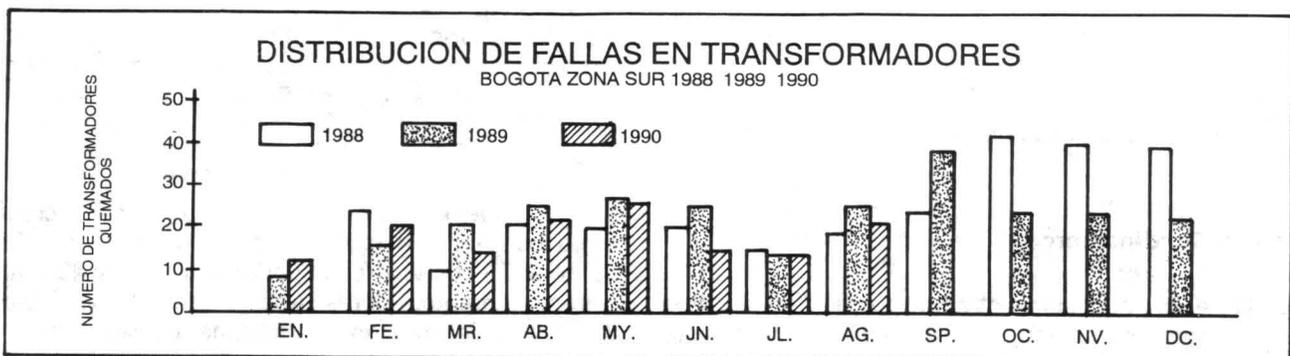


Figura 12.

Distribución de fallas de transformadores en la Zona Sur de Bogotá, Período 1988-01 a 1990-08.

Bogotá, encontrándose una característica bimodal coherente con los meses de invierno.

Zona del Huila.

La **Figura 13** presenta el análisis estadístico de las unidades en el Departamento del Huila. Se encuentra en esta zona igualmente un comportamiento bimodal similar al obtenido en [18] y presentado en la **Figura 14**.

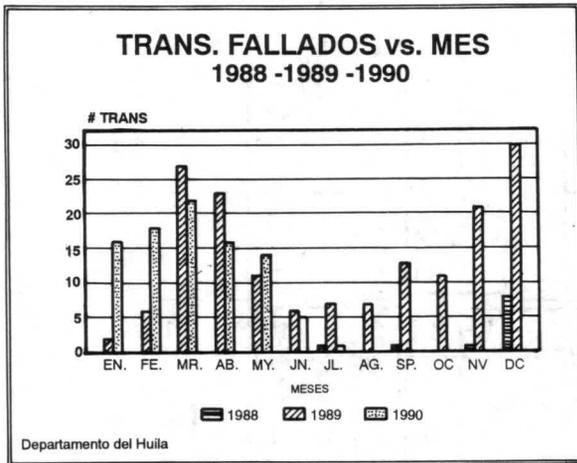


Figura 13. Transformadores fallados en función de los meses del año. Nótese los picos de las fallas en épocas de invierno.

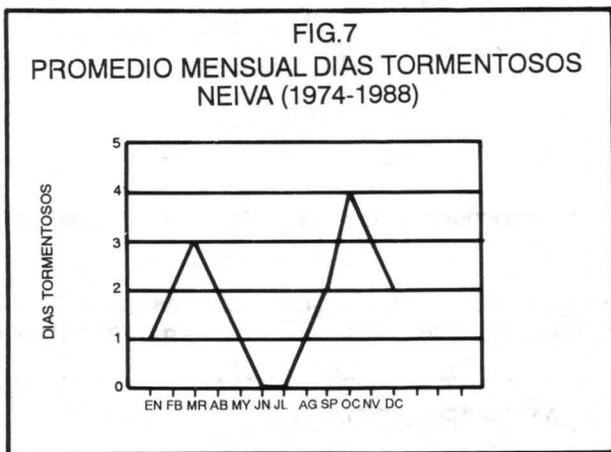


Figura 14. Promedio mensual de días tormentosos en la ciudad de Neiva según [18].

Zona de Cundinamarca.

A partir de los datos suministrados por la Electrificadora de Cundinamarca se encontró una buena relación entre la **Figura 15** Transformadores fallados mensualmente en la Electrificadora y los meses de invierno, para los años de 1988 y 1989.

4. INDICE DE FALLAS DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION EN COLOMBIA

A partir de la información recopilada en una encuesta hecha en las diferentes electrificadoras del país ha podido encontrarse un **Índice global aproximado del 9%** para las siguientes empresas encuestadas:

- Electrificadora del Huila
- Electrocaquetá
- Cedenar
- Electrificadora de Santander
- Cedelca
- Electrificadora de Boyacá
- Electrificadora del Quindío
- Electrificadora de Cundinamarca
- Electrificadora del Atlántico
- EEB

Puede afirmarse que anualmente fallan en estas empresas más de 6000 unidades de cerca de 65.000 unidades instaladas en 1990.

Los costos proyectados a todo el país pueden ser superiores a los 6.000 millones de pesos anuales, ya que no se consideraron grandes empresas como EPM o EMCALI.

5. ANOMALIAS ENCONTRADAS EN LOS ANALISIS DE FALLAS

Las fallas de los transformadores de distribución en Colombia son de las más altas del mundo, como puede verse en la **Tabla 2**.

| Norma o Países | PORCENTAJE | AÑOS |
|----------------|----------------|--------------|
| Normas REA [9] | 0.05% | |
| Estados Unidos | < 0.8% | años 1974/79 |
| Australia | 3.1% | años 1962/63 |
| | < 1.36 á 0.85% | años 1965/82 |
| Brasil | 3% | año 1987 |
| Colombia | 9% | año 1989 |

Las cifras presentadas para Colombia, pueden incrementarse localmente en sitios como La Palma y Pacho (Cundinamarca) con valores superiores al 40% y 43% anual respectivamente, valores que salen de todos los cánones mundiales, implicando condiciones locales extremadamente críticas como las presentas en la **Tabla 1**.

Manifestaciones de las Fallas

De la observación de numerosas unidades falladas en los cementerios de transformadores de diferentes electrificadoras del Sector Eléctrico Colombiano, se encontró la presencia frecuente de pasatapas o bushings de transformadores de distribución con evidencias indiscutibles de flameos en muchos casos involucrando las tres fases de los transformadores. Esta es una manifestación hasta ahora no considerada en ningún análisis. Dado que la frecuencia de los flameos trifásicos no eran tan elevada para considerar posible la evidencia de que pudiesen ser sobretensiones trifásicas explicadas por la Teoría de los Lazos inductivos, se procedió a examinar con mayor detenimiento los cuernos de arqueo de las unidades que tenían, encontrándose con una gran cantidad de las unidades analizadas presentaban rastros de su operación, especialmente en las unidades urbanas donde las corrientes de cortocircuito pueden ser lo suficientemente altas para permitir que funda parte de los mismos dejando huellas indiscutibles de su operación.

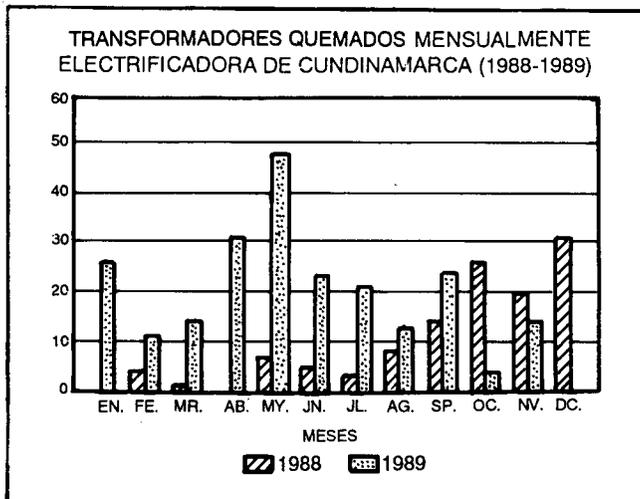


Figura 15. Transformadores fallados mensualmente en la Electrificadora y los meses de invierno, para los años 1988 y 1989.

Uno de los factores más desconcertantes en el análisis de fallas de los transformadores de distribución que hemos encontrado, han sido el hecho de que más del 60% de las fallas de 3.114 unidades trifásicas analizadas han afectado las tres fases de los transformadores de distribución, siendo muy alto el porcentaje en las unidades de 15 y 30kVA, como lo muestra la Figura 16.

El análisis global de todas las posibles variantes de falla en transformadores de distribución mostrado en la Figura 17 indica una alta frecuencia de la falla más común: Corto en las tres fases Caso CCC, seguida por los casos en los que las unidades presentaron las tres fases abiertas Caso AAA

Los anteriores resultados constituyen una gran incógnita, puesto que la presencia de fallas trifásicas en los transformadores de distribución no es teóricamente un caso común de falla, pues implicaría la presencia de sobretensiones en las tres fases en forma simultánea o

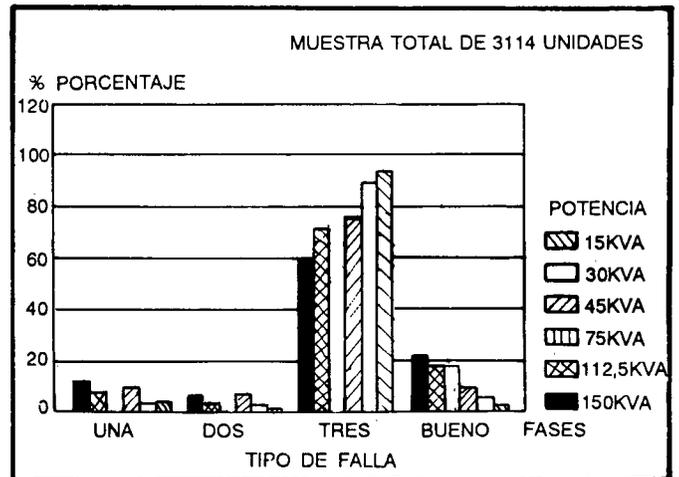


Figura 16. Falla en una, dos o tres fases para una muestra de 3.114 unidades de la EEB.

secuencial que pueden ser muy bien explicadas por la Teoría de los Lazos Inductivos.

A nivel internacional el problema de las fallas en los transformadores de distribución se ha vuelto el centro de muchos estudios con el fin de resolver el problema [21], [22], [23], [16], [24], [25], [26], [27], [28] y [29]. De estas investigaciones se desprenden algunas conclusiones útiles que complementan la Teoría de los Lazos Inductivos y que se discuten enseguida.

6. FACTORES QUE AUMENTAN LA CRITICIDAD DE LA CORRIENTE DEL RAYO A LA LUZ DE LA TEORIA DE LAZOS INDUCTIVOS.

Cambios de impedancia

Una de las posibles causas de incremento de las corrientes de alta pendiente que llegan al transformador son los cambios de impedancia cuando el pararrayos opera. En el instante de su operación, la impedancia característica cambia de un valor alto - 300 Ohmios - a la impedancia de la puesta en tierra - 10 o 15 - Ohmios -. Estos cambios de impedancia hacen que las corrientes se eleven hasta 1.9 veces, por efecto de reflexión, incrementando por lo tanto el (di/dt) de la Onda Incidente.

Comportamiento de la Tierra en estado transitorio

Otro factor que interviene en la formulación del problema corresponde a lo observado por Visacro y Portela [30] respecto al comportamiento de la permistividad del suelo y la conductividad en el rango de frecuencia de los fenómenos transitorios. Ellos indican que la resistividad decrece con el aumento de la frecuencia. Este decreci-

Muestra Total de 3.114 unidades

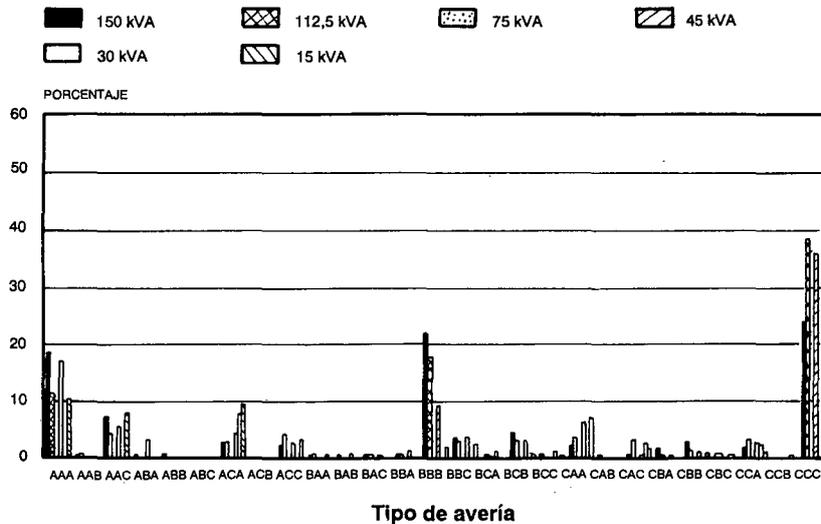


FIGURA 15. Averías en transformadores trifásicos [% rel]

Figura 17. Averías en transformadores trifásicos. Análisis estadísticos de 3.114 Unidades de la EEB.

miento de la impedancia de puesta a tierra disminuye los voltajes de paso y de contacto, pero aumenta el (di/dt) de la corriente, siendo una condición desfavorable examinada a la luz de la Teoría de los Lazos Inductivos.

Comportamiento de la Resistencia no-lineal del pararrayos.

De acuerdo a la teoría de la operación de los pararrayos, es posible que por efecto del drástico cambio de impedancia en el momento en que el voltaje llega a su tensión de reacción, la corriente para alcanzar la onda del voltaje debe hacerse más escarpada. Este es uno de los comportamientos que debe investigarse en laboratorio.

7. SIMULACION MATEMATICA DEL LAZO INDUCTIVO

Haciendo una simulación digital del Lazo inductivo con el programa EMPT, tal como lo indica la Figura 18 es posible encontrar los voltajes esperados en el Lazo por efecto de la excitación del lazo.

Empleando la subrutina Line Constant pueden obtenerse algunos resultados útiles.

Cuando el modelo de la Figura 18 es alimentado con una onda negativa de $.1/15$ s; $-5kA$; $50kA/s$ el voltaje inducido entre el pasapatas y el tanque, en las tres fases es mostrado en la Figura 19. Es notorio que el voltaje inducido cambia de polaridad y es mucho mayor que el BIL del transformador, pues alcanza cerca de 155 kV.

Si cambiamos la pendiente de la corriente, el voltaje inducido puede ser menor, como el mostrado en la Figura 20 donde con una pendiente de $-20kA/s$ se obtienen cerca de 125kV.

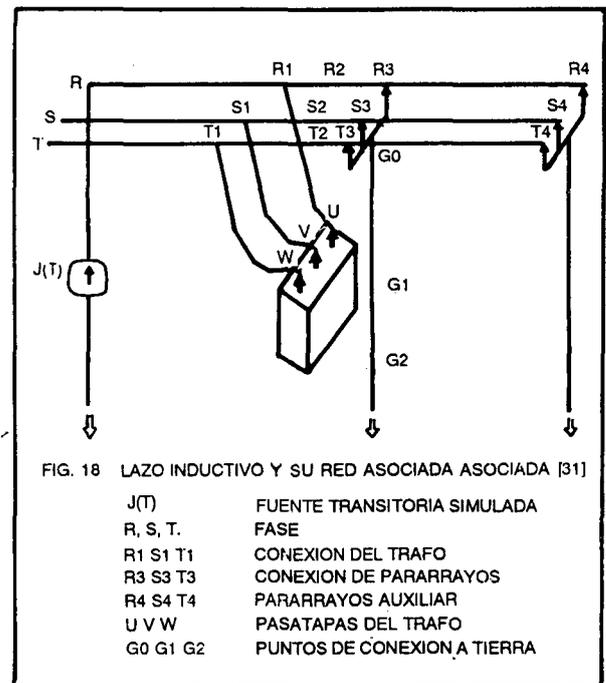


FIG. 18 LAZO INDUCTIVO Y SU RED ASOCIADA [31]

| | |
|----------|-----------------------------|
| J(T) | FUENTE TRANSITORIA SIMULADA |
| R, S, T, | FASE |
| R1 S1 T1 | CONEXION DEL TRAF0 |
| R3 S3 T3 | CONEXION DE PARARRAYOS |
| R4 S4 T4 | PARARRAYOS AUXILIAR |
| U V W | PASATAPAS DEL TRAF0 |
| G0 G1 G2 | PUNTOS DE CONEXION A TIERRA |

En la Figura 21 se muestra que los valores de pendiente para las ondas de corriente normalizadas $-8/12$ s con una pendiente de $-1.25kA/s$ no se produce una situación real, pues el voltaje generado es de apenas 23kV.

CONCLUSIONES

A partir de los análisis de fallas y la aplicación de la Teoría de los Lazos Inductivos, podemos obtener las siguientes conclusiones:

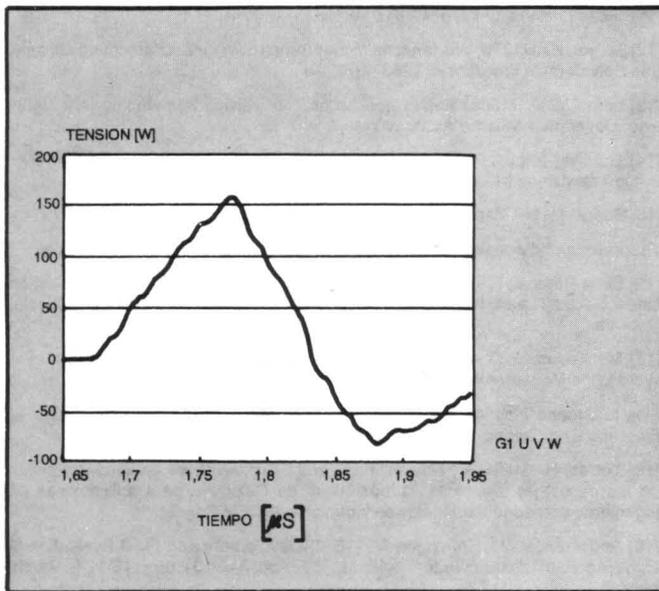


Figura 19:
Voltaje entre el pasatapas y tierra para onda de - 50kA/ s

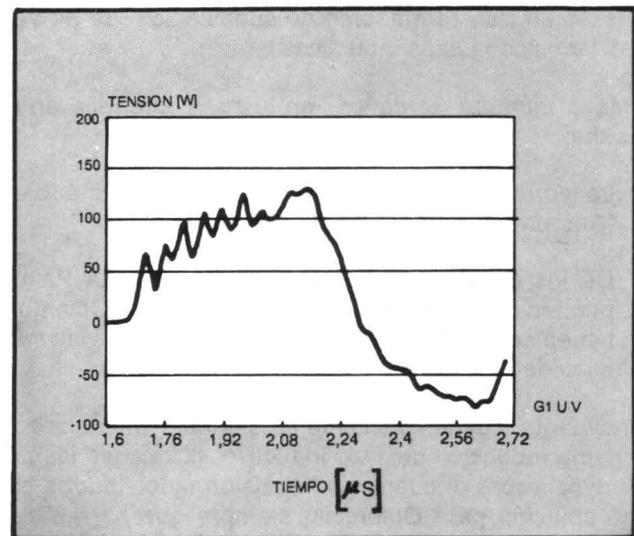


Figura 20:
Voltaje entre el pasatapas y tierra para onda de - 20kA/ s

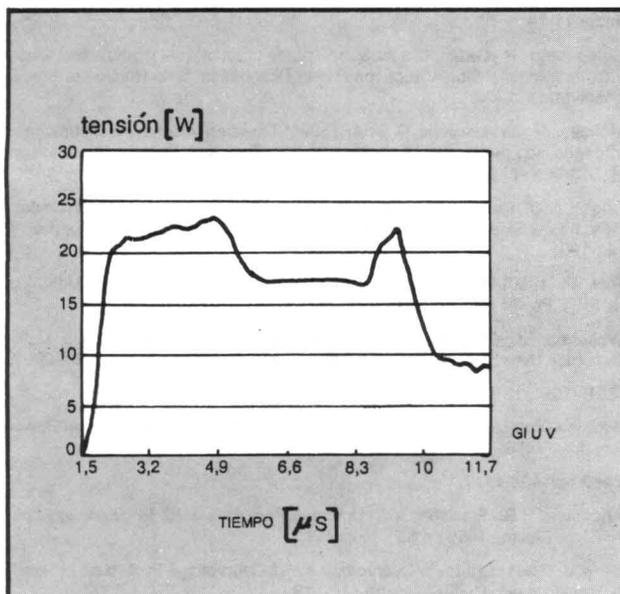


Figura 21:
Voltaje entre el pasatapas y tierra para onda de - 1.25kA/ s

- La Teoría de los Lazos Inductivos explica la generación de sobretensiones transitorias que pueden hacer fallar el transformador , cuando el pararrayos opera.
- En Colombia y en otros países como Ecuador y Brasil la mayoría de los transformadores se encuentran instalados de acuerdo a la misma norma: la REA. Por lo tanto todas estas unidades están expuestas a sobretensiones transitorias cuando opera el pararrayos.
- Las fuentes de corriente de alta pendiente son fundamentalmente dos: Los rayos negativos - que de acuerdo a las mediciones en La Palma pueden ser los más

frecuentes en Colombia- con un valor medio de su pendiente de **-25kA/ s** y las sobretensiones inducidas que se hacen más críticas con la resistividad del terreno y que por análisis teóricos deben estar en el orden de los Amperios por nanosegundo.

- La pendiente de la onda incidente puede incrementar se acuerdo a los siguientes factores:
 - * Cambio de impedancia de línea aérea a la resistencia de puesta a tierra.
 - * El comportamiento de la puesta a tierra en estado transitorio.
 - * La conducción del parrayos al lograrse la tensión de reacción.
- La simulación del lazo inductivo muestra voltajes de polaridad **Positiva**, a pesar de que la onda incidente era negativa. Esto contradice la práctica común de ensayo de unidades con onda de choque negativa, siendo más crítica la positiva. Este resultado puede considerarse en la formulación de una nueva norma de instalación y protección de transformadores de distribución.
- Las pendientes de subida y de bajada de la onda definen la magnitud de los voltajes inducidos.
- La Teoría de los Lazos Inductivos explica los siguientes daños de unidades de distribución:
 - * Fallas tres bobinados de transformador a pesar de la operación del pararrayos.
 - * Daños en bancos de condensadores y cables en los sitios de transición de línea aérea a cable.

* Fallas en transformadores de subestación de 34.5kV instalados con Lazos Inductivos.

* Mayor número de daños en la zona rural que en la urbana.

La teoría también explica porqué los transformadores "Autoprottegidos" fallan menos en Colombia.

De los datos registrados en la zona de La Palma pueden deducirse que algunas regiones de Colombia tienen actividades eléctricas atmosféricas de las más altas del mundo.

Finalmente, puede concluirse este trabajo mencionado con una reducción del lazo inductivo -colocando los pararrayos sobre el cuerpo del transformador- puede ser una solución para Colombia, siempre que se realicen pruebas a los nuevos montajes y -especialmente-, se midan las características de los rayos que ingresan al sistema de distribución en Colombia, empleando para ello líneas experimentales de medida.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Universidad Nacional y a Colciencias por el apoyo a la presente investigación. Al Ingeniero Antonio Mejía por sus valiosos comentarios. A los ingenieros Olga Beatriz Callejas, Jorge Gutiérrez y Nelson Alonso y los técnicos de la EEB en La Palma por su apoyo. A los estudiantes Antonio Lizarazo, Julián Vega, David Palomá, Nestor Vaca por su colaboración y a la Doctora. Leonor Lozano por su respaldo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Román, F. (1990) Análisis de las fallas en transformadores de distribución causadas por la operación del pararrayos ante sobretensiones externas. Trabajo presentado en el VII Congreso de Energía Eléctrica ACIEM-Cundinamarca. Bogotá. Mayo.
- [2] Román-Campos, F. (1990) Distribution Transformers Failures caused by Lightning Arresters operation in the presence of external overvoltages. The first International Conference on Power Distribution. Belo Horizonte, Brazil. November 11-14.
- [3] Guhl, E. (1975) Colombia: Bosquejo de su geografía tropical. Tomo 1. Instituto Colombiano de Cultura. Biblioteca Básica Colombiana. pp. 173-231.
- [4] Castaño, O. (1990) Análisis estadístico de los fenómenos atmosféricos por series de Tiempo para la Sabana de Bogotá. Proyecto de Postgrado. Universidad Nacional Depto. de Eléctrica. Dir. Gustavo Pérez.
- [5] UTP. Proyecto de grado. Estudios del nivel cerámico de la ciudad de Pereira. Facultad de Ingeniería Eléctrica.
- [6] Rural Electrification Association -REA- (1968). Bulletin 160- 1 January. Engineering and operations manual for Rural Electric Power Systems. Rural Electrification Administration. US Department of Agriculture. Lightning Protection.
- [7] ICEL (1970) Normas para el diseño y construcción de sistemas de transmisión y distribución. Instituto Colombiano de Energía Eléctrica ICEL.
- [8] Prinz, H. (1976) Gewitterelektrizität als Gefahr Bulletin ASE/ VSE 67 pp.1313-1322,24 December 18.
- [9] Prinz, H. (1977) Die Blitzentladung in vier Parameterdarstellung. Bulletin ASE/VDE 68, pp 600-603, 12-18 Juni.
- [10] Hasse, Wiesinger. (1982) Handbuch für Blitzschutz und Erdung. VDE Verlag pp.38.
- [11] Uman (1969) Lightning. Mac Graw Hill.
- [12] Berger, Karl (1973) Wissenschaftlichen Bericht über die Blitzforschung auf dem San Salvatore in den Jahren 1963-1971.
- [13] Lewis, W.W. (1965) The Protection of Transmission Systems against Lightning. Dover publications, Inc. New York.
- [14] Guidice, E., LLo Piparo, G.B Il fenomeno della Fulminazione Edizioni RAI Radio Televisione Italiana. Torino.
- [15] Boeck, Muller, Zaengl. Hochspannungstechnik. Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung. Springer Verlag.
- [16] De la Rosa, F. (1985) Effect of close lightning on Electric Power Distribution Lines. Doctor Thesis. Institute for High Voltage Research. University of Uppsala. Sweden.
- [17] Mackerras, D., Darveniza, M. (1986) Description of the Project for the World Wide Measurement of the ratio of Cloud. Flashes to Ground Flashes in Lightning Storms University of Queensland, Dpt. of Electrical Engineering, Report No. EE 86/9. June
- [18] Torres, H., Mejía, A., Román, F. et al. (1990) Avances en el conocimiento de las descargas eléctricas atmosféricas en Colombia para aplicaciones en Ingeniería. Jornadas Nacionales en Ingeniería. ACIEM Bogotá.
- [19] Anderson, V.N.; Kroninger, M. (1984) Development and Field Evaluation of Lightning Earth-flashcounter. Science. IEE Poc. Vol 131 pp. 118-124. March, 1984.
- [20] Román, Campos, F.; Cuartas, W. (1988). "Detector y Contador de descargas eléctricas atmosféricas". V Jornadas Nacionales de Ingeniería Eléctrica. ACIEM Bogotá.
- [21] Araújo, R.; Diniz, J.; Cherchiglia, L.; Eriksson, A. (1990) Geldenhuy, H Applied Lightning Research in an intertropical mountainous area. The First International Conference on Power Distribution. Belo Horizonte Brazil. November 11-14
- [22] Geldenhuy, H.; Gaunt, C. Insulation Coordination of rural distribution lines. The First International Conference on Power Distribution. Belo Horizonte, Brazil. November 11-14, 1990.
- [23] Mundim, A.; Zabudowski, G. et Al. (1990) Transformadores de Distribuição. Desempenho sob descargas atmosféricas. The First International conference on Power Distribution I SIDE Belo Horizonte, Brazil. November 11-14.
- [24] Dugan, R.C., Kershaw, S., Smith, D. (1990) Protecting Distribution Transformers From Low Side Surge Currents. IEEE Power Delivery Oct. Vol 5 Number. 4 pp 1892-1901.
- [25] Rizk, F. (1990) Modeling of transmission Line Exposure to Direct Lightning Strikes. IEEE Power Delivery Oct. Vol 5 Number 4 pp 1983-1997.
- [26] Whitehead, J., Driggans, R. (1990) TVA's Experience with The Sunya Lightning Detection Networks. IEEE Power Delivery Oct. Vol 5 Number 4 pp 2054-2062.
- [27] IEEE (1990) IEEE Working Group Report: Summary of IEEE. Guide for the Protection of Network Transformers. IEEE Transactions on Power Delivery July. Vol 5. Number 2 pp 1408-1417.
- [28] Anderson, R.B., Eriksson, A.J. Lightning Parameters for Engineering Application. Cigre Electra. N 69 pp 65 - 101.
- [29] Huse, J. (1981) Lightning Overvoltages and Overvoltage Protection of Distribution Transformers CIRED/Jun. pp 110-113.
- [30] Visacro, S.; Portela, C. Soil Permittivity and Conductivity behaviour on frequency range of transient phenomena in Electric Power Systems. COPPE-Federal University of Rio de Janeiro Brazil.
- [31] Lizarazo, L. Vega, J. Teoría de los Lazos Inductivos. Parte I Proyecto de Grado UN. Director; F. Román-Campos.

HOJA DE VIDA

Francisco Román Campos es Ingeniero Electricista, Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia, Investigador Principal en la Caracterización de Rayos en Colombia. Especialista en Alta Tensión, Universidad Fridericiana de Karlsruhe, Magister Scientiarum en Potencia Eléctrica Universidad Nacional de Colombia.