

Estudio teórico-experimental del reencendido

El fenómeno transitorio del reencendido es un problema puramente dieléctrico.

Cuando un circuito de potencia es maniobrado por un seccionador, sólo puede fluir una corriente despreciable, no superior a 0.5 amperios [1].

Sin embargo, en subestaciones capsuladas aisladas en SF₆, debido al fenómeno de reencendido, aparecen, durante tiempos muy cortos, altas corrientes y sobretensiones. El presente trabajo muestra análisis y resultados de este fenómeno, con base en mediciones de laboratorio en el Instituto de Alta Tensión de la Universidad Técnica de Darmstadt (Alemania Federal) en un seccionador aislado en SF₆, mediciones en el Laboratorio de Alta Tensión de la U.N.-Bogotá sobre un circuito equivalente de un seccionador aislado en aire y un programa digital desarrollado por el autor, con base en el método de Dommel.

HORACIO TORRES SANCHEZ
Ingeniero Electricista M Sc.
Profesor Asistente
Universidad Nacional

El uso de subestaciones capsuladas aisladas en SF₆ (Gas Insulated-Switchgear-GIS), se ha ido incrementando desde su primera aparición en el año 1969, debido a sus ventajas de confiabilidad, mantenimiento y espacio requerido para su instalación, comparadas con las subestaciones convencionales al aire libre. Para hacer un juicio comparativo entre los dos tipos de subestaciones, sobre la seguridad de servicio es muy importante el conocimiento exacto de la construcción y comportamiento de sus componentes individuales. Desde este punto de vista es primordial considerar los aparatos de maniobra, debido a que, por un lado ellos representan un importante factor de seguridad, y por otro lado, como originadores de sobretensiones internas, juegan un papel preponderante en el marco de la coordinación del aislamiento.

El comportamiento en operación del seccionador de barras había recibido muy poca atención en la literatura técnica, pues, como aparato de operación lenta, cuyo trabajo no es la interrupción de grandes corrientes, fue considerado libre de problemas. Sin embargo en subestaciones SF₆ presenta fenómenos transitorios que comenzaron a ser estudiados hace apenas diez años en diferentes países del mundo.

El presente trabajo se inició en el año 1980, cuando, gracias a una beca de especialización del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), tuve la oportunidad de trabajar, bajo la dirección del Profesor D. Koenig y el Dr. Fellmann, en el fenómeno transitorio en cuestión.

Con base en las mediciones de laboratorio hechas en el Instituto de Alta Tensión, de la Universidad Técnica de Darmstadt (Alemania Federal), los trabajos de estudiantes de último semestre del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional, y el estudio de una revisión bibliográfica hasta el año 1985, realicé el presente trabajo, que se enmarca dentro de los planes del Grupo de Investigación en Alta Tensión (GIAT), con auspicios del CINDEC (U.N) y COLCIENCIAS.

Finalmente, y para lograr una mayor experiencia en la medición de los transitorios de alta y baja frecuencia, debidos al fenómeno de reencendido, se presentan, en la parte final, los resultados de los ensayos hechos en el Laboratorio de Alta Tensión del Instituto de Ensayos e Investigación de la Universidad Nacional - Bogotá sobre un circuito equivalente de un seccionador aislado en aire.

CIRCUITO EQUIVALENTE

Los seccionadores de barras están generalmente conectados a un extremo del interruptor de potencia (Fig. 1).

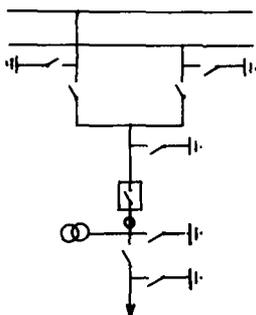


FIGURA 1. Esquema subestación doble barraje.

Cuando un circuito ha sido abierto o cerrado por un seccionador de barras, sólo puede fluir una corriente despreciable; Vgr.: corrientes capacitivas de pasatapas, barrajes, cables de muy corta duración, etc. Para tensiones nominales hasta 420 Kv, la corriente no debe ser superior a 0.5 amperios [1]

A pesar de que el seccionador maneja corrientes de pequeña magnitud, pueden aparecer, durante tiempos muy cortos, altas corrientes y sobretensiones, cuando éste es maniobrado.

En principio hay dos formas de conocer estas magnitudes: mediante mediciones y mediante cálculo digital. A continuación se presenta el segundo método. Este método tiene las ventajas de variar fácil y económicamente parámetros como presión del gas, velocidad de desplazamiento del contacto móvil, capacidades, etc. Sin embargo, es necesario tener un buen circuito equivalente de la instalación en estudio, así como la determinación exacta de la velocidad de desplazamiento, la rigidez dieléctrica de la separación entre contactos, y los parámetros R, L, C del circuito.

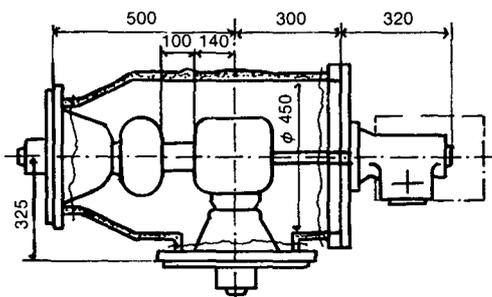


FIGURA 2. Seccionador tipo NKV 362/3150.

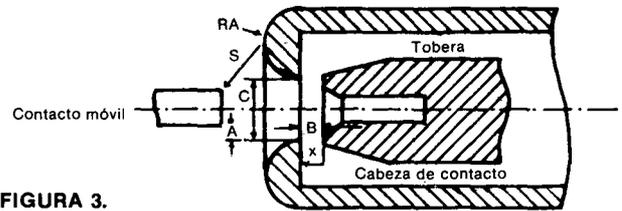


FIGURA 3.

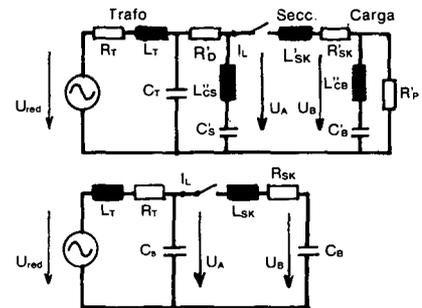


FIGURA 4. Circuito equivalente simplificado.

El seccionador investigado es similar al utilizado en la Subestación CIRCO de propiedad de la EEEB (Figs. 2 y 3) y el circuito equivalente simplificado es el mostrado en la Figura 4. [2].

EL FENOMENO DEL REENCENDIDO

Durante pruebas de aislamiento se encontró que los reencendidos son un problema puramente dieléctrico y sólo son afectados por la geometría de los contactos. [3].

Las figuras 5 a y b representan el desarrollo de las tensiones U_a y U_b , así como la tensión disruptiva U_d en función del tiempo.

Una vez el seccionador se abre, la tensión U_a sigue la tensión de alimentación, mientras que la tensión U_b , correspondiente a la descarga del condensador C_b , permanece prácticamente constante durante el tiempo que no hay reencendido, considerando una resistencia de carga infinita. La tensión disruptiva se puede considerar de una manera teórica (Fig. 5b), como:

$$U_d = K_1 \cdot s \quad (1)$$

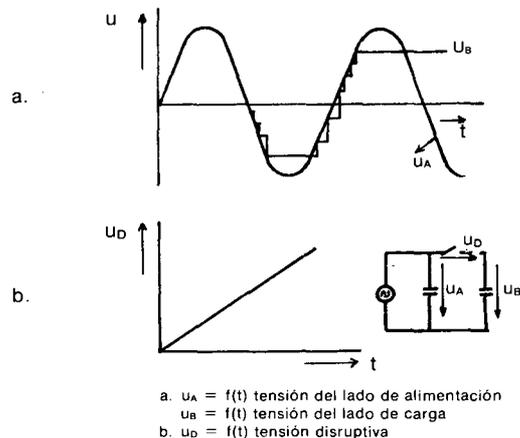


FIGURA 5. Desarrollo de las tensiones en el tiempo.

$$s = K_2 \cdot T \tag{2}$$

Donde: **S** es la distancia entre electrodos, variable con el tiempo **T**; **K₁** y **K₂** son constantes empíricas.

En condiciones reales, el desarrollo de las tensiones no es tan idealizado como en la Fig. 5a., debido a que en la conexión están interesadas configuraciones capaces de oscilar.

Debido a esto, los reencendidos están acompañados de transitorios en el dominio de las altas y bajas frecuencias, tanto en el lado de alimentación, como en el lado de carga del seccionador.

METODO NUMERICO PARA LA SOLUCION DEL TRANSITORIO

Para el caso específico del presente trabajo se escogió el método propuesto por Dommel para parámetros concentrados, y desarrollado en trabajos de grado anteriores [4], por considerar la regla trapezoidal de integración un método numéricamente estable, sencillo y viable para el cálculo de sobretensiones por maniobra, según el estudio realizado en 1978 por Tripathy, Rao y Elangovan [5].

Con base en los circuitos desarrollados por Dommel [6], [7], aplicados al circuito equivalente mostrado en la Fig. 4, se obtiene la correspondiente ecuación matricial de la forma:

$$[Y] \cdot [e(t)] = [i(t)] - [I(t-\Delta t)] \tag{3}$$

Donde:

- [Y] Matriz de admitancia nodal
- [e(t)] Vector columna de tensiones nodales desconocidas en tiempo **T**
- [i(t)] Vector columna de corrientes nodales inyectadas en tiempo **T**
- [I(t-Δt)] Vector columna, el cual se construye de las fuentes de corriente equivalentes, en tiempo **t - Δt**

Para el proceso de ejecución iterativo de la ecuación matricial (3) fue necesario utilizar dos deltas de tiempo. Durante un reencendido, las oscilaciones se presentan en el rango de los MHz, por lo tanto, para una representación correcta, se toma un DT2 entre 10 y 20 nanosegundos. Para las oscilaciones de baja frecuencia, en el rango de KHZ, se toma un DT1 entre 10 y 20 microsegundos.

El hecho de dividir el programa en dos deltas de tiempo trae como consecuencia, problemas para la resolución del sistema matricial, respecto a la actualización de historias pasadas, pues éstas son función del delta de tiempo, el cual es variado al entrar y salir del lazo interno de reencendido. Esto significa que si se ha hecho una actualización, Vgr.

para un tiempo **T3** con un delta de tiempo **DT1**, al entrar al reencendido con un **DT2**, la actualización en el tiempo **T3** no sirve para calcular las tensiones en el tiempo **T3 + DT2**. Por lo tanto, antes de entrar al lazo interno de reencendido, es necesario actualizar las historias pasadas para un tiempo **T3**, pero con un delta de tiempo **DT2**.

RESULTADOS

La relación de la capacidad de carga **C_b** a la capacidad **C_s**, juega un papel importante en la magnitud de las sobretensiones y sobrecorrientes de alta y baja frecuencia:

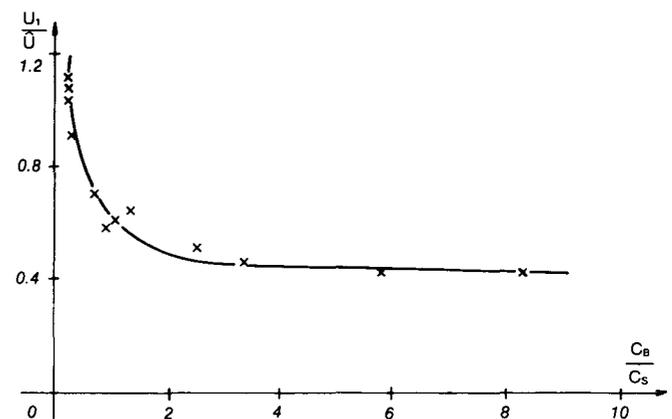


FIGURA 6. Efecto de los parámetros **C_b** y **C_s**

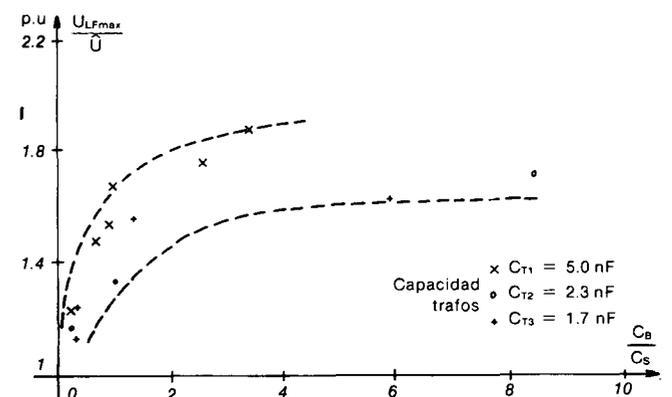


FIGURA 7. Sobretensiones de baja frecuencia medidos.

- A menor relación **C_b/C_s** mayores son las sobretensiones de alta frecuencia (Fig. 6), pero menores las sobretensiones de baja frecuencia (Fig. 7), para un caso de prueba de un seccionador de 550 Kv/ [9].
- Respecto al número de reencendidos, estos son mayores a medida que aumenta la relación **C_b/C_s** (Fig. 8a, b, c).
- En las figuras 9, 10 y 11 se presentan los desarrollos de las tensiones **U_a** y **U_b**, para una apertura del seccionador a diferentes velocidades de apertura: 0.5 y 1.0 m/seg, a dos bares de presión y para tensiones de 80 y 100 Kv.

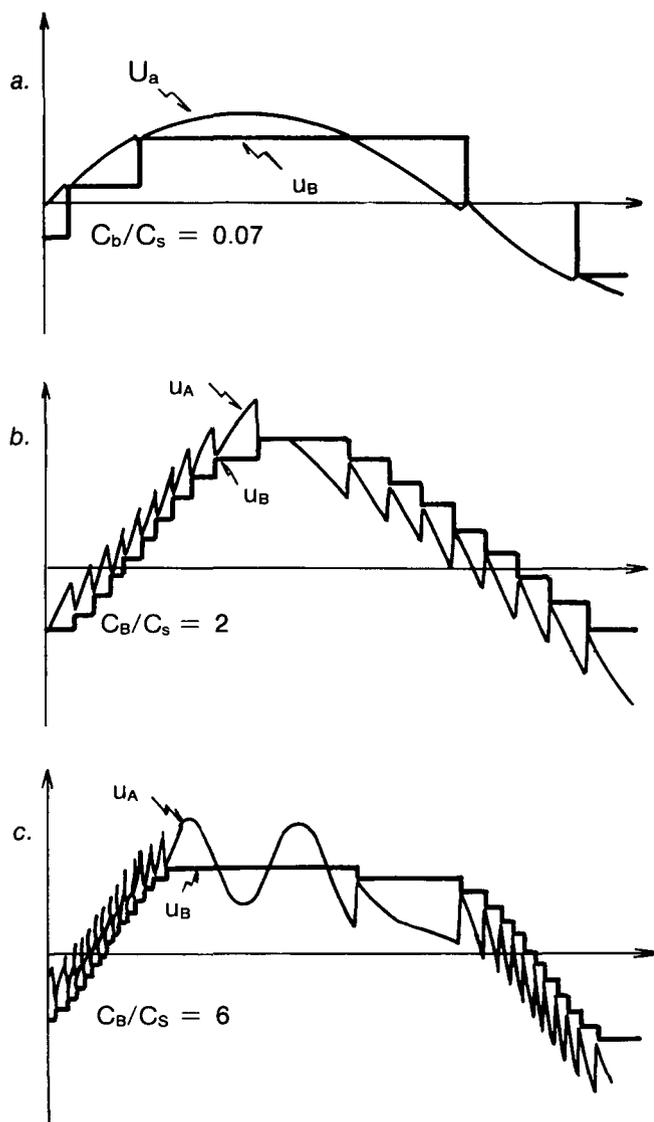


FIGURA 8. Características de U_A y U_B para diferentes relaciones C_b/C_s .

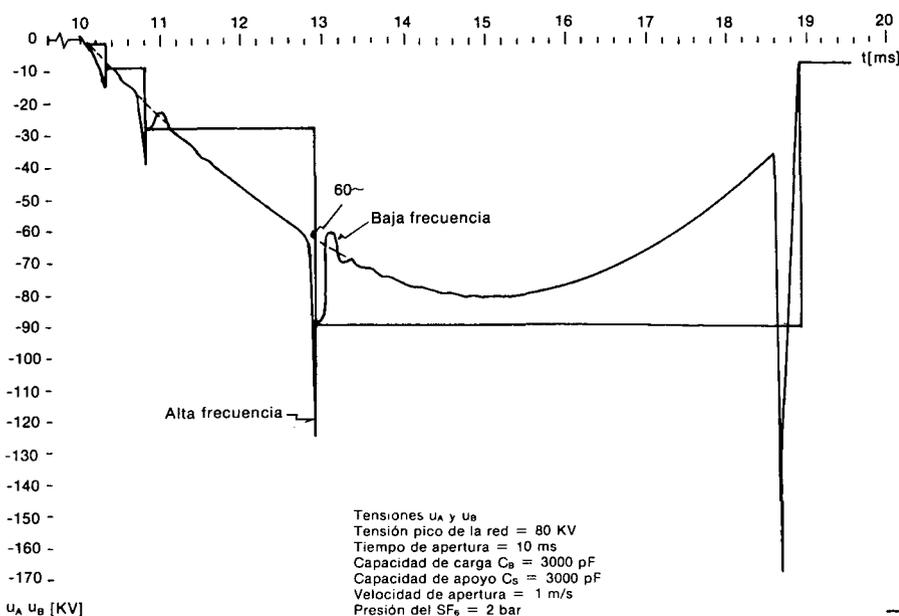
- La figura 12 presenta los desarrollos de tensión transitoria de alta frecuencia, durante un reencendido, para una relación $C_b/C_s = 10$
- La figura 13 presenta las corrientes transitorias de arco, del orden de kiloamperios, como función de la tensión de la red, para dos diferentes relaciones de capacidad, obtenidas con el programa digital desarrollado y que coincide con las pruebas de laboratorio realizadas en la Universidad de Darmstadt [8]
- Respecto al tiempo de duración del reencendido, siempre será mayor para velocidades de desplazamiento menor, como puede observarse en ensayos de laboratorio [8], cuyos resultados se muestran en la figura 14.

MEDICIONES EN LABORATORIO

Para lograr un mejor dominio en la medición de sobretensiones, para en un futuro aplicarlo a un caso real (Vgr: Maniobra en Seccionador de GIS-SF6), se montó el circuito equivalente de la figura 4 en el Laboratorio de Alta Tensión del Instituto de Ensayos e Investigación de la Universidad Nacional de Colombia.

El seccionador fue representado con electrodos esféricos de 5 cm. de diámetro cada uno y aislados en aire a una presión constante de 564 mm. de Hg. La capacidad de carga C_b fue simulada con un condensador de 100 nF, la Capacidad $C_s = 20$ pF fue calculada como configuración cilindro-placa y la tensión eficaz aplicada fue de 7.386 voltios.

Debido a la necesidad de tener un alto grado de precisión en el ángulo de apertura o cierre (arco entre los electrodos esféricos) del seccionador, se construyó un Interruptor Electrónico de Angulo Programable (IEAP) [10], el cual se montó en el lado de baja tensión del tablero de control.



— FIGURA 9.

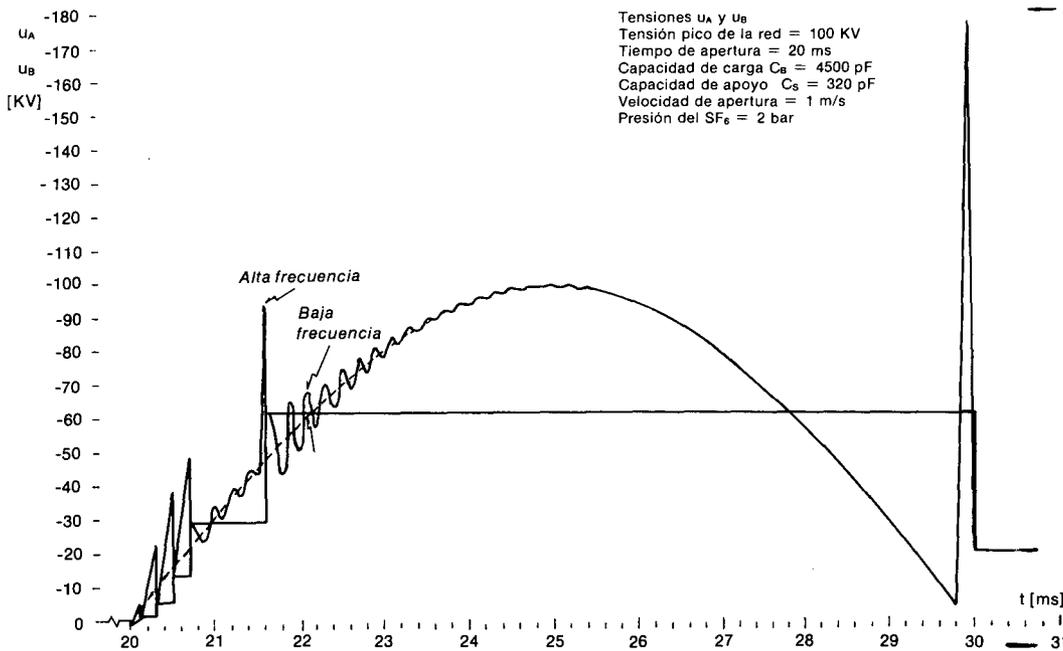


FIGURA 10.

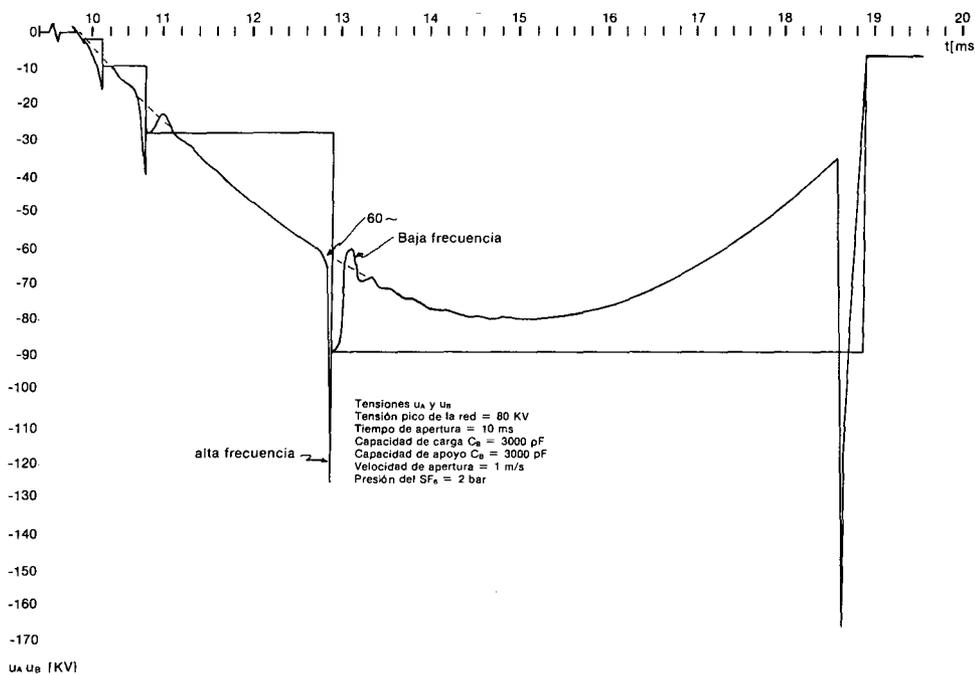


FIGURA 11.

Al establecerse un arco entre los electrodos esféricos (seccionador), el circuito no queda permanentemente cerrado, debido al paso por cero de la tensión alterna. Para los resultados deseados fue necesario detectar que sucede en uno solo de los reencendidos, o sea cerrar el seccionador por unos ciclos únicamente y poder obtener mayor y mejor información que cuando se establece el arco por un tiempo indefinido. Para tal efecto se determinó una distancia de 0.4 cm. de separación entre los electrodos esféricos, luego se fijó una diferencia de tensión no disruptiva (U_{nd}) entre los electrodos, pero muy cercana a la tensión a la cual se produce el arco sostenido (U_r), para que cuando se cierre el IEAP en un ángulo de 90° , sea más fácil la ionización y

producción del arco, a diferencia de los casos en que opera el IEAP en 0° y 180° , tal como se ilustra en la figura 15.

Para acople al osciloscopio fue utilizado un divisor resistivo de $140 M\Omega$, 75Ω con cable coaxial doblemente apantallado de 75Ω .

ANALISIS DE LOS REGISTROS OBTENIDOS

Registro de Tensión sobre U_A

En la foto N^o 1 se aprecian comparativamente cierres a 180° (superior), 90° (medio) y 0° (inferior). Los cierres a 180° y 0° no presentan reencendido por la condición anotada en el numeral anterior (figura 15), mientras que en el cierre a 90° se observa el establecimiento del

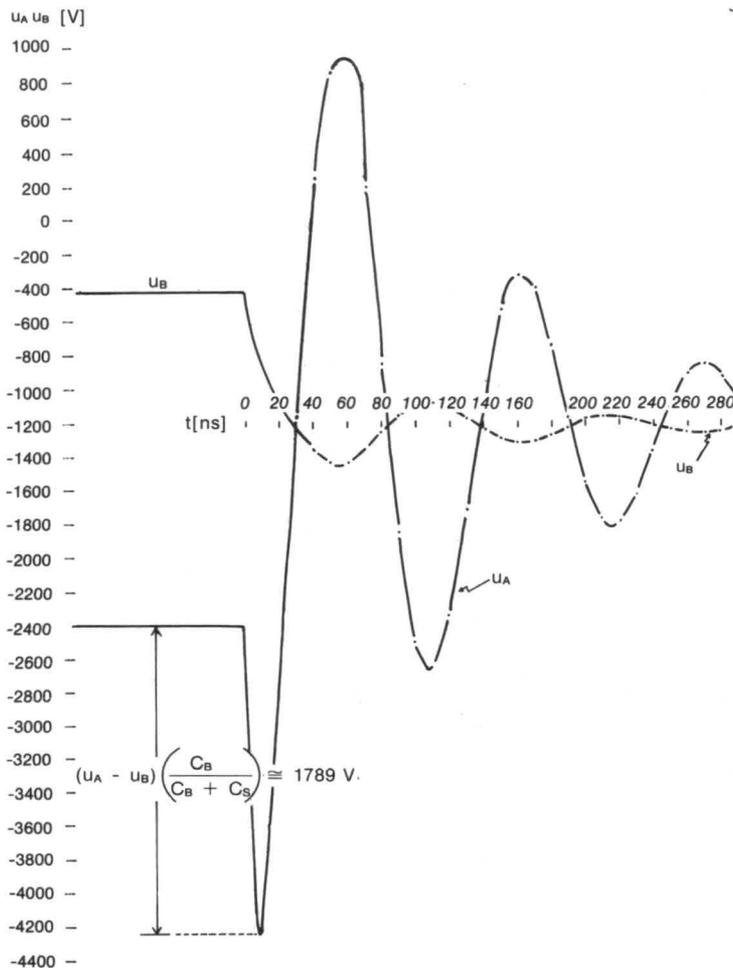
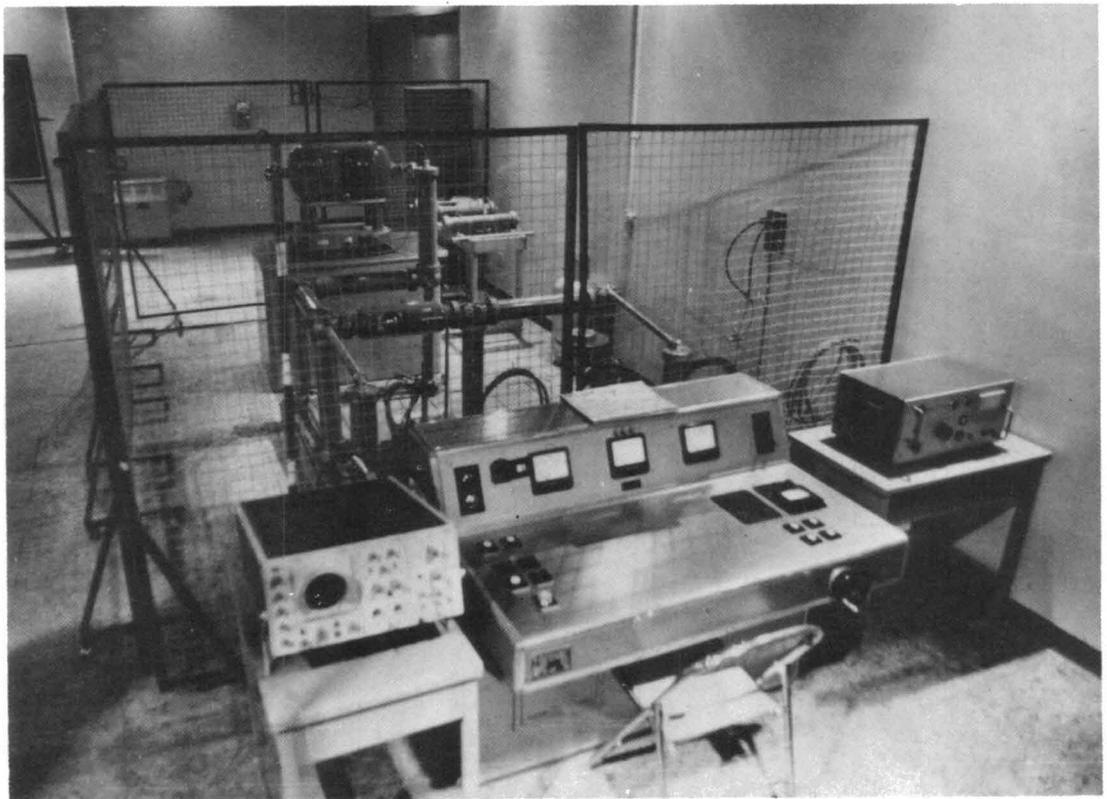


FIGURA 12. Desarrollo de tensiones de alta frecuencia U_A U_B durante reencendido
 Caso: $C_B = 3000 \text{ pF}$ $C_S = 300 \text{ pF}$ $C_B > C_S$

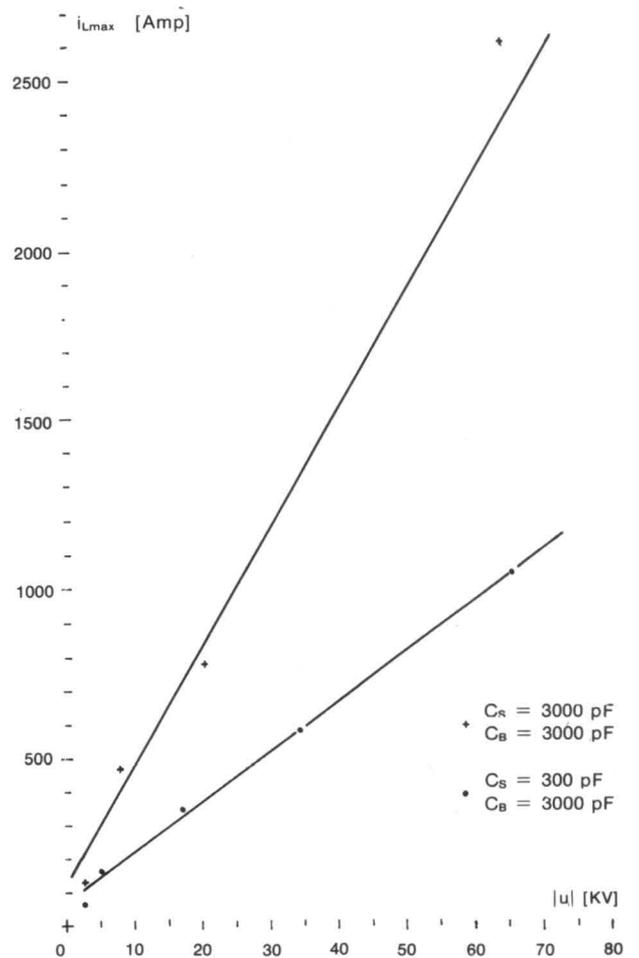
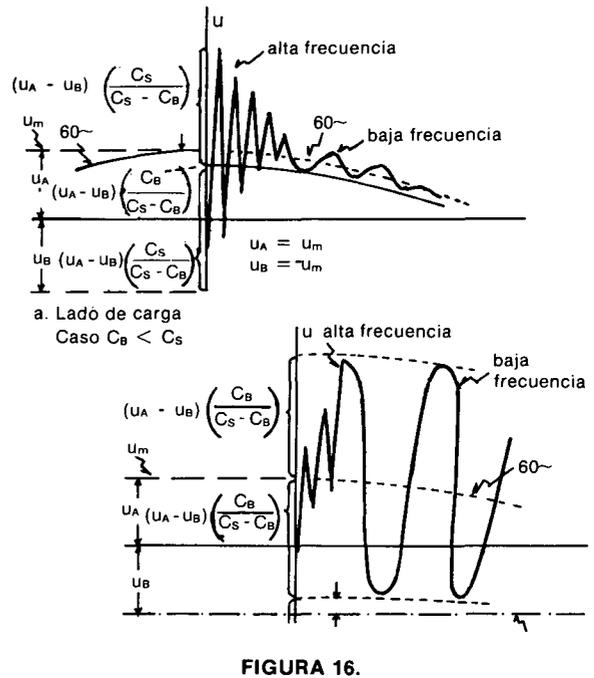
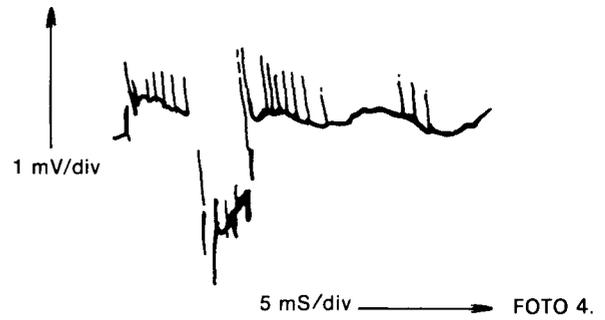
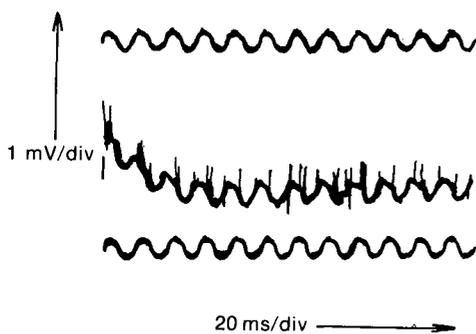
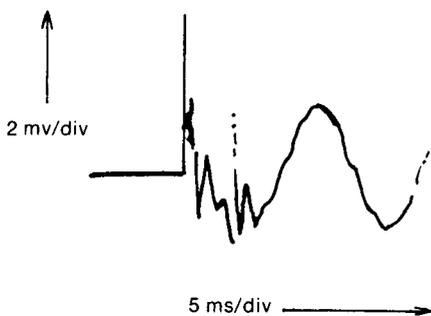
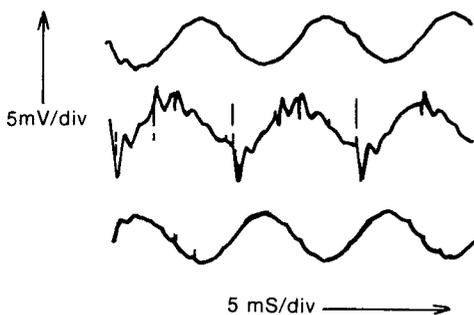
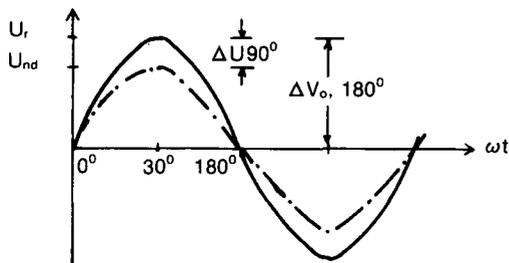
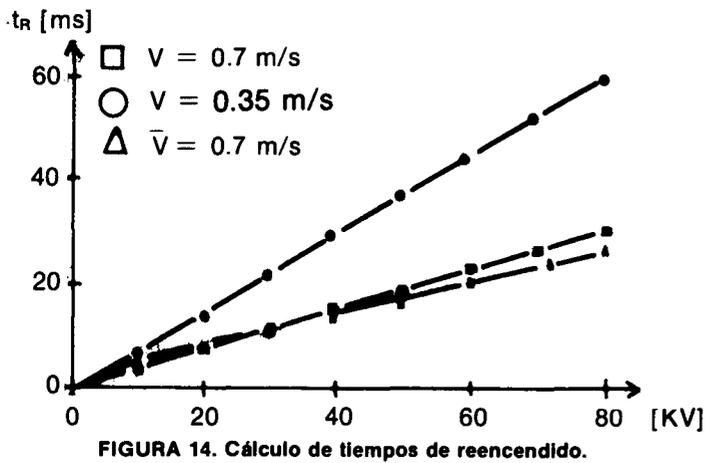


FIGURA 13. Corrientes transitorias de arco como función de la tensión de la red, para diferentes relaciones de capacidad.



arco en tres ciclos, con interrupciones de éste cada cuarto de ciclo, debido al fenómeno de reencendido.

En la foto N° 2 se aprecia el reencendido de alta frecuencia, con un factor de sobretensión de 2.5 p.u., y la amortiguación del mismo a baja frecuencia. Este resultado fue el esperado de acuerdo al análisis hecho en [2].

Registro de Tensión sobre U_b

En la foto N° 3 se aprecian comparativamente cierres a 0° (superior), 90° (medio) y 180° (inferior). En 0° y 180° no hay arco entre los electrodos esféricos, sin embargo se observa una onda de tensión de valor máximo 1 mV (1866 voltios) que corresponde a la tensión residual sobre el condensador debido a anteriores cierres. Al quedar el condensador sin alimentación de la fuente, se descargará a través del divisor resistivo de $140 \text{ M}\Omega$, con una constante de tiempo de 14 segundos. Al presentarse el reencendido cada cuarto de ciclo y teniendo en cuenta la constante de tiempo de descarga, se explica el registro de la onda de tensión residual en 0° y 180° .

Finalmente puede observarse en la foto N° 4 la sobretensión de reencendido de alta frecuencia

de un factor de 1.61 p.u. y su posterior amortiguación de baja frecuencia, del orden de 2 KHZ.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el resumen de una metodología desarrollada en [2] para el análisis del fenómeno transitorio que ocurre durante la apertura de un seccionador en una subestación capsulada, aislada en SF6. Con base en esta metodología se desarrolló un programa digital en

lenguaje TI-BASIC, el cual permite analizar las sobretensiones y corrientes transitorias, tanto en el rango de las altas como bajas frecuencias.

Finalmente, y dentro del marco del Proyecto de Investigación: "Estudio Teórico-Experimental de las sobretensiones" [11] se montó en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Nacional el modelo de seccionador, con aislamiento en aire, cuyos resultados son analizados.

REFERENCIAS

1. VDE - Bestimmung 0670 Teil 2/9.81 VDE - Verlag GmbH, Berlin.
2. TORRES, H. **El fenómeno transitorio por apertura de seccionador en subestaciones capsuladas aisladas en SF6**. Proyecto Posgrado U.N. 1985. Bogotá.
3. BOHN, W. **Schaltverhalten eines SF6 - gekapselten Trennschalters bei Gleich- und Wechselspannungsbeanspruchung**. Darmstadt, - 1978.
4. DUQUE, DELGADO, AMAYA. **Análisis de sobretensiones por el método de Dommel. Parte 1. Proyecto de Grado U.N. 1984, Bogotá.**
5. TRIPATHY, RAO, ELANGOVAN. **Comparison of Stability Properties of Numerical Integration Methods for Switching Surges**. IEEE, PAS Vol. 97 Nov/DEC. 1978. Pgs. 2318-2316.
6. DOMMEL, H. **Berechnung elektromagnetischer Ausgleichvorgänge in elektrischen Netzen mit Digitalrechner**. Bull. ASE 60. 1969. Pgs. 538-548.
7. DOMMEL, H. **A Method for Solving Transient Phenomena in Multiphase Systems**. Proc. 2nd. Power System Computation Conference. Stockholm 1966.
8. FELLMANN, K. H. **Untersuchungen zum Kapazitiven Schaltverhalten im Trennschaltern in SF6 Isolierten metallgekapselten Schaltanlagen**. Darmstadt. Dissertation 1983.
9. GORABLENKOW, KYNAST, LUEHRMANN. **Switching of Capacitive Currents by Disconnectors in Gas Insulated Substations**. IEEE, PAS, Vol. 103, Jun. 1984. Pgs. 1363-1370.
10. PARRA, J.J., LAVERDE, I., PEDREROS, E. **Estudio teórico-experimental de las sobretensiones**. Proyecto de Grado U.N. 1986. Bogotá.
11. TORRES, H., ROMAN, F., MEJIA, A. **Estudio teórico-experimental de las sobretensiones en el sistema de potencia eléctrico colombiano**. Proyecto de Investigación. COLCIENCIAS-CINDEC.