

#### MARCO REFERENCIAL DE LOS GENERADORES DE IMPULSOS

Los ensayos de aislamiento a impulso normalizado que simulan los transitorios con frente brusco de origen atmosférico o de maniobra, se realizan con generadores de impulso.

El esquema básico de los generadores de impulso fue originalmente propuesto por E. <u>Marx</u> en 1924, los generadores de Marx son probablemente la manera más común de generar los impulsos de alto voltaje para probar cuando el nivel voltaico requerido es más alto que el disponible cargando voltajes de fuente, consiste en un cierto <u>grupo</u> de <u>capacitores</u> que se cargan en paralelo por medio de rectificadores de alta tensión, a través de <u>resistencias</u>de carga. La descarga de los capacitores se realiza a través de espinterómetros de esferas en un circuito serie que incluye resistencias amortiguadoras de las oscilaciones.

La carga de los capacitores y en consecuencia la tensión total del generador puede variarse regulando la tensión del rectificador. La polaridad de la tensión se cambia invirtiendo las conexiones de los capacitores al rectificador.

El <u>método</u>más utilizado para originar la descarga del generador consiste en aplicar un impulso de tensión al electrodo central de un espinterómetro con tres esferas, que está colocado entre el primer y segundo grupo, por medio de una fuente auxiliar. Iniciada la descarga, ésta se propaga a todos los espinterómetros de la cadena.

Hay ensayos en los que se requiere la aplicación de tensión alterna al aparato y simultáneamente aplicar la onda de impulso, esto exige que el dispositivo de disparo actúe en modo sincronizado.

Una de las más importantes aplicaciones del <u>ensayo</u> de impulso, es la detención de las fallas. No existe un método definitivo para este propósito, pero la experiencia ha demostrado que la utilización de una combinación de todos los <u>métodos</u>, asegura la detección de fallas.

La detección, mediante osciloscopios diseñados para pruebas de alto voltaje o en su defecto osciloscopios convencionales, esta basado en la premisa que: cuando un aislamiento falla en el caso de las pruebas a <u>transformadores</u>, cambia la impedancia cuando este es sometido a los impulsos de tensión. Este <u>cambio</u>causara variaciones en la corriente de impulso que fluye a través del devanado y en la tensión media a través del mismo.

Debido a la complicada <u>naturaleza</u> del ensayo de impulso y a las diferentes formas de <u>construcción</u> de transformadores, los fabricantes de estos han desarrollado a través de los años, <u>técnicas</u> de pruebas apropiadas para su uso.

Energía nominal : La energía máxima disponible por el generador es W= 7,5 kJ.

Número de etapas: Considerando a cada capacitor como una etapa, el número posible a configurar en el generador de impulsos es n=16.

Cabe resaltar que a lo largo de los años se le incorporaron diez <u>capacitores</u> adicionales (C=0,25  $\mu$ Fy V=100 kV) hasta llegar a un total de dieciséis instalados, modificando así las condiciones de operación del generador. Asimismo, el alcance de las <u>pruebas</u> de impulso tipo 1,2/50  $\mu$ s realizadas en los <u>transformadores</u> de CAIVET, requiere tensiones de prueba o BIL que no excedan los 200 kV (<u>valor</u> aplicado a transformadores de <u>potencia</u> con Vn=34,5 kV).



Existen tres técnicas apropiadas de ensayo, entre las cuales tenemos:

- a. Conexión de los terminales no sometidos a impulso.
- b. Devanados de baja impedancia.
- c. Uso de <u>condensadores</u> a través de las <u>resistencias</u>shunt de corriente.

El propósito de ensayar el transformador es simular su uso en campo. Por lo tanto, esto no es tan simple y directo como suena. El ambientede un transformador cambia frecuentemente con los años, bien porque sea traslado o porque se le adicionen en paralelo equipos o líneas. En el ensayomuchas veces se debe tener en cuenta los efectos de las líneas, cables, generadores, pararrayos, etc. Más difícil aun simular es determinar que clasede descarga atmosférica va a recibir y como este va a entrar en el sistema de distribución o transmisión.

Generalmente, las ondasde las descargas atmosféricas varían considerablemente. Para uniformizar estos ensayos, ciertas formas de onda se han normalizado; en la actualidad, la onda utilizada para los transformadoreses de 1.2/50µs; sin embargo, en algunos casos es difícil obtener la duración de 50µs en la cola de la onda. En estos casos es necesario utilizar la capacitancia máxima del generador.

Para conocer como es el comportamiento de las pruebasen alta tensión actualmente existen determinados softwareque permiten estudiar dichos fenómenos, uno de estos software son el Pspice y el ATPDraw. El primero se ha conformado como el mejor y el más utilizado simulador de circuitos electrónicos. Si bien soporta el análisisde circuitos analógicos y digitales, es en el campo analógico donde PSPICE ha alcanzado su máxima utilidad.

Además el PSPICE es un, programa de edicióngráfica de circuitos, analizador de ondas u osciloscopio virtual, editor de estímulos, una aplicación específica para optimizar el comportamiento del circuito.

El programa ATPDraw es un procesadordel ATP en ambiente Windows, usado para construir circuitos eléctricos, en el cual se puede seleccionar los componentes desde un menú los cuales tienen cajas de dialogo donde puedes introducir los valores que lo componen. Este programa fue creado por: The Bonneville Power Administration, USA, and SINTEF Energy Research, Norway.

En este punto es conveniente insistir en dos aspectos básicos que nunca se debe olvidar:

1). Los simuladores, por muy potentes no son mas que una aproximación a la realidad y en consecuencia nunca pueden sustituir la práctica de manejo real de los circuitos electrónicos y eléctricos. Por tanto, el mejor uso que se puede realizar es combinándolo con <u>el trabajo</u> en el <u>laboratorio</u>.

2). Los simuladores hacen las tareas que le encomienda el usuario y por lo tanto no debe perderse la perspectiva de que es una herramienta que la maneja el técnico.

# - FUNDAMENTOS SOBRE GENERADORES DE IMPULSOS DE TENSION.

El generador de impulsos es un equipo que genera intencionalmente transitorios de alto nivel de tensión para simular sobretensiones tipo atmosférico y de maniobra, con la finalidad de verificar la capacidad que posee un determinado dispositivo o máquina de soportar dicho impulso sin que ocurra ruptura dieléctrica en su aislamiento.



Su aplicación principal es la realización de pruebas de aislamiento (prueba de impulso) en equipos y maquinaria eléctrica en general.

#### PRINCIPIO BÁSICO DEL GENERADOR DE IMPULSOS

Muchos años de <u>investigación</u> han determinado que una sobretensión atmosférica se puede representar como un impulso unidireccional de tensión y obtenerse a partir de los circuitos mostrados en la **Figura 1**. [1]-[2]:



Circuito a



Circuito b



Analizando cualquiera de los dos circuitos propuestos se obtiene que inicialmente el condensador *C1* (que representa al generador de impulsos) es cargado con tensión continua *Vo*, de polaridad positiva o negativa, y luego es súbitamente descargado en un circuito conformado por el condensador *C2* y las resistencias *R1* y *R2*. Este <u>proceso</u> de descarga se inicia en el instante en cual se establece entre las esferas del espinterómetro *SG*un <u>arco</u> eléctrico y la tensión se transfiere a *C2*, que representa básicamente a un <u>objeto</u> bajo prueba. Entonces, la expresión analítica del voltaje de impulso en *C2* tiene la forma [1]-[2]:

$$v_{C}(t) = V_{a} \cdot K \left( e^{-it} - e^{-it} \right)$$

(1)

donde *Vo*es la tensión de carga del condensador *C1*, *K*una constante que depende del circuito <u>seleccionado</u> ( **ver Figura 1**) y *a* y  $\tilde{A}$  las raíces de la ecuación característica del sistema, cuyos inversos son las constantes de <u>tiempo</u> del mismo.

Si los parámetros de *resistivos* y *capacitivos* de la **Figura 1** son constantes y los <u>valores</u> de *a* y  $\tilde{A}$ Yde la expresión (1) son relativamente diferentes entre sí, entonces se pueden analizar separadamente dos circuitos: el del frente de onda y el de la cola, como se muestran en la **Figura 2**, para realizar este análisis tomaremos el circuito (b) de la **Figura 1**[1]- [3].



Figura 2. Circuitos para el estudio de un generador de impulsos

Ahora bien, considerando el circuito del frente de onda en el momento en que ocurre la descarga entre las esferas del espinterómetro *SG*, el condensador *C2* se carga con la constante de tiempo *T1*:

$$-\frac{1}{\beta} = T_1 = R_1 \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}_{2}$$

definida como el <u>producto</u> de la <u>resistencia</u> de frente *R1*con la capacidad equivalente <u>serie</u> de los dos condensadores *C1* y *C2*. Generalmente, se asume que C1 > C2 por lo que la relación se puede simplificar a:

$$T_1 \cong R_1 \cdot C_{2(3)}$$

que indica que la duración del frente de la onda de tensión en el condensador C2 es directamente proporcional a la resistencia de frente R1 y a la capacidad del objeto de prueba C2.

Haciendo un proceso análogo en el circuito de cola, en el instante en el cual la transferencia de carga de *C1* a *C2* es cero (debido a una redistribución de la carga eléctrica entre ambos), los condensadores se descargan en la resistencia R2 con una constante de tiempo T2 igual a:

$$-\frac{1}{\alpha} = T_2 = R_2(C_1 + C_2)_{(4)}$$

y simplificando con la suposición C1 >> C2, se tiene que:

# $T_2 \cong R_2 \cdot C_{1\,5)}$

que depende proporcionalmente de la resistencia de cola R2 y la capacidad C1.

Es importante señalar que conociendo los valores de C1, C2, T1 y T2 es posible establecer, al menos en una primera aproximación, los valores necesarios de R1 y R2 para obtener en el objeto bajo prueba la forma de onda de tensión de impulso determinada [1]- [2].

Analizando el circuito (b) de la **Figura 1**, a partir del instante en ocurrir la transferencia de energía entre el capacitor *C1* y *C2* se tiene la siguiente ecuación en el dominio de la frecuencia:

Diagnosis • Monitoring • Quality Control • Reasearch



$$V_{(s)} = \frac{V_0}{k} * \frac{1}{(S^2 + a * S + b)}_{(b)}$$

Donde:

$$a = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \vdots \\ R_1 C_1 & R_2 C_2 & R_2 C_2 \end{pmatrix},$$
$$b = \begin{pmatrix} \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \end{pmatrix},$$
8)

 $k=R_1C_2$ 

Entonces tenemos que para la ecuación en el dominio del tiempo, el voltaje en el capacitor C2 es:

$$V_{(t)} = \frac{V_0}{k} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \left[ \exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t) \right]_{(9)}$$

donde  $a_1^2$  y  $a_2^2$  son las raíces de la ecuación  $S^2 + a * S + b = 0_0$ 

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b}$$
(10)

Como el voltaje en *C2* es  $V_{(1)}$ y es la superposición de dos <u>funciones</u> exponenciales de <u>señales</u> diferentes. De acuerdo con la ecuación 10 la respuesta negativa de la raíz resulta una constante de tiempo más grande, que es  $1/\alpha_1$  que el tiempo positivo que es  $1/\alpha_2$  Un gráfico que pueda expresar la ecuación 10 es indicado es la **Figura 3**. De la ecuación 10 se puede definir lo siguiente:

$$\begin{aligned} \alpha_1 + \alpha_2 &= a \\ \alpha_1 \cdot \alpha_2 &= b \end{aligned} (11)$$





Figura 3. Onda de impulso de tensión y sus componentes.

Si no se conocen los valores de resistencia se pueden calcular usando la ecuación 11, y el (circuito b) de la **Figura 1** así como también los valores de a y b de la ecuación 7 y 8, tenemos que  $R_1$  y  $R_2$  es:

$$R_{1} = \frac{1}{2C_{1}} \left[ \left( \frac{1}{\alpha_{1}} + \frac{1}{\alpha_{2}} \right) - \sqrt{\left( \frac{1}{\alpha_{1}} + \frac{1}{\alpha_{2}} \right)^{2} - \frac{4(C_{1} + C_{2})}{\alpha_{1}\alpha_{2}.C_{2}}} \right]_{(12)}$$

$$R_{2} = \frac{1}{2(C_{1} + C_{2})} \left[ \left( \frac{1}{\alpha_{1}} + \frac{1}{\alpha_{2}} \right) + \sqrt{\left( \frac{1}{\alpha_{1}} + \frac{1}{\alpha_{2}} \right)^{2} - \frac{4(C_{1} + C_{2})}{\alpha_{1}\alpha_{2}.C_{2}}} \right]_{(13)}$$

Igualmente existen otras <u>ecuaciones</u> validas que permiten determinar de manera muy aproximada los tiempos de frente y cola [6]. Entonces siguiendo el análisis del circuito b de la **Figura 1**,podemos señalar que el tiempo (tiempo de frente) que tarda en cargar  $C_a$  a través de  $R_1$  será aproximadamente:

$$t_1 = 3.K_1 \frac{C_1.C_2}{C_1 + C_2} = 3.R_1 C_e$$
(14)

donde

 $C_{e} = \frac{C_{1} \cdot C_{2}}{C_{1} + C_{2}} \text{ si } R_{1} \text{ esta expresada en ohms y } C_{e} \text{ en microfarads, } t_{1} \text{ se obtiene en microsegundos.}$ 

De igual manera para determinar el tiempo de cola tenemos que tanto la capacitancía  $C_1 y C_2$  son descargadas a través de  $R_1 y R_2$  por lo que tenemos que el tiempo al 50% de la descarga es aproximadamente:

- 6 -



$$t_2 = 0.7(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)_{(15)}$$

#### FORMA DE ONDA NORMALIZADA DE LA TENSION DE IMPULSO

Aunque las formas de onda de las sobretensiones atmosféricas poseen gran variedad, se han estandarizado algunas de ellas para efectuar pruebas de impulso en equipos y <u>máquinas</u>eléctricas. Como onda normalizada de tensión impulsiva se entiende como aquella que posee unas características bien definidas respecto a la duración y amplitud de la misma y para el caso de la sobretensión atmosférica la Norma ANSI/IEEE Standard 4-1995 [7] establece las siguientes:

- *Valor pico*  $\vec{V}$  es la máxima amplitud de la onda, medida desde la referencia de voltaje, con una tolerancia de  $\pm 3\%$
- Tiempo de frente T1: es el primer tiempo que, medido desde un tiempo virtual T01, transcurre entre el 30% y el 90% del <u>valor</u> pico, multiplicado por 1,67. La duración del lapso será  $T_1 = 1.2 \pm 30\% \mu s_{Esto}$ es  $0.8 \le T_1 \le 1.6 \mu s$
- Tiempo de cola T2: es el mayor tiempo que transcurre hasta alcanzar el 50% del máximo valor pico. Su valor es  $T_2 = 50 \pm 20\% \mu s_0$   $40 \le T_2 \le 60 \mu s$

La Figura 4 muestra la onda plena de impulso normalizado tipo atmosférico 1,2/50 µs.



Figura 4. Forma de onda plena del impulso normalizado 1,2/50 µs [7]

Donde  $T_1$  es el tiempo de frente virtual de un impulso de tiempo atmosférico el cual es de 1.67 veces el intervalo de tiempo transcurrido entre los instante cuando un impulso tiene como valores 30% y 90% del valor pico. Tales instantes de se denominan puntos A y B del frente de la onda. Esto significa que:

$$T_1 = 1.67 * (T_{90} - T_{30})_{160}$$

También *T2* es el intervalo de tiempo entre el origen virtual  $Q_1$ y el instante en el tiempo cuando el voltaje ha disminuido a la mitad del valor pico. Por lo que *T2* se llama tiempo de cola del impulso el cual es:

$$T_2 = (t_{50} + 0.5 * t_{90} - 1.5 * t_{30})$$



 $C_2$ 

#### - RENDIMIENTO.

El factor de aprovechamiento o rendimiento de la tensión se entiende como el cociente entre el voltaje pico  $\hat{V}$  del impulso y el valor de la tensión continua a la cual está cargado el condensador *C1*. Esto es:

$$\eta = \frac{\hat{V}}{V_o}_{17}$$

Además, si *T2>>T1* se pueden hacer las siguientes aproximaciones [1], [2] para los circuitos de la **Figura 1**:

Para el circuito (a), el rendimiento queda definido como:

$$\eta \cong \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1}}_{18}$$

y para el circuito (b):

$$\eta \cong \frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{1}{\left[1 + \frac{R_1}{R_2}\right] \cdot \left[1 + \frac{C_2}{C_1}\right]}_{19)}$$

Se evidencia que el rendimiento depende de la relación  $C_1$  es decir, de la capacidad del generador y la del

circuito externo. A continuación, la **Figura 5** muestra la eficiencia en función de  $G_1$  para distintas formas de onda normalizada y considerando los dos circuitos en análisis [4]- [5].





Figura 5. Eficiencia de un generador de impulsos

Se evidencia que la configuración (a) presenta mejor rendimiento que la (b), obteniéndose el máximo rendimiento a un valor de  $C_2/C_1 \cong 0.05$  por lo que resulta conveniente en la práctica que la capacidad *C1* del generador sea muy superior a la del circuito externo y en particular a la del objeto de prueba *C2*. De esto se concluye que una condición de diseño es  $C_1 \cong 20 \cdot C_2$ [10]. Es necesario acotar que los circuitos analizados presentan cierta inductancia *L* que, si es de magnitud considerable (decenas de  $\mu$ H), puede modificar en gran medida las características del sistema. Esto se explicará más adelante.

# - CIRCUITO DE CARGA

Como se ha mencionado, el generador de impulsos se alimenta de una fuente DC de valor nominal relativamente bajo (algunos kilovoltios). El circuito comúnmente empleado para obtener dicha alimentación es un rectificador de tensión alterna, que se muestra en la **Figura 6** [4].



Figura 6. Circuito para la carga de un generador de impulsos

La tensión DC aplicada en *C1*es obtenida por medio de la rectificación de la onda alterna presente en la salida de un transformador elevador controlada por un variador de tensión (VARIAC). Cabe destacar que la resistencia *R* tiene dos funciones esenciales: limitar la corriente absorbida por el generador y desacoplarlo del circuito alimentador en el momento en que se produzca el impulso. Asimismo, desde el punto de vista económico no se utiliza un transformador elevador con tensión secundaria mayor a cientos de kilovoltios, por lo que en la práctica se implementa un circuito duplicador de voltaje como se indica en la **Figura 7** [1], [3], [4].





Figura 7. Circuito duplicador de voltaje tipo Greinacher

El variac alimenta al transformador elevador de voltaje (en el orden de kilovoltios) que a su vez está conectado al circuito propuesto por Greinacher: el condensador serie y el diodo *D1*. Esta configuración produce la carga del condensador *C*en un semiciclo de onda y permite la contribución "transformador+condensador" en el siguiente semiciclo, lo que da origen a una onda de voltaje del doble de magnitud respecto a los terminales del transformador. Finalmente, esta onda obtenida es rectificada por el diodo *D2* (rectificador de media onda) y el voltaje DC resultante proporciona el nivel de carga del condensador de etapa *C1*. Siendo *V* la tensión rms en el secundario del transformador, entonces la tensión en *C1* (en régimen permanente) resulta:

$$V_o = 2 \cdot V_{20}$$

Esto significa que la tensión de carga es del orden de las centenas de kilovoltios. Cabe destacar, que el circuito duplicador de voltaje debe ser de polaridad invertible y que los diodos D1 y D2 deben estar diseñados para soportar la tensión V cuando se polarizan en reverso [1], [2], [4].

# **GENERADOR DE IMPULSOS MULTIETAPAS**

Desde el punto de vista económico, el empleo de un generador de una sola etapa ver **Figura 1**,es válido para tensiones que no superen los kilovoltios de diseño de la etapa [4]. Además, para obtener un rango amplio de tensiones de prueba es necesario disponer de un generador de impulsos de varias etapas que cumpla con la siguiente característica: *que mediante la conexión en serie de dichas etapas se produzca la tensión de prueba deseado al momento de la descarga*. Cuyo ejemplo se muestra en la **Figura 8**.

El generador consta de *n* etapas en donde los condensadores *C1* de cada una de éstas son cargados en paralelo, a la tensión DC deseada, a través de la resistencia de frente *R1*, de cola *R2* y de carga *Rc* (ésta última de un valor mucho más grande que las demás -alrededor de las decenas de Kohm-), como se esquematiza en la **Figura 9**.





Figura 8. Esquema de un generador de impulsos multietapa [3]





Figura 9. Circuito equivalente de la fase de carga de un generador de impulsos multietapa [4]

Cuando ha transcurrido cuatro o cinco veces la constante de tiempo de este proceso (*t1*), todos los condensadores se cargan a la tensión pico  $V_0 = 2 \cdot V_{\text{En este instante, el generador de impulsos está disponible para iniciar la descarga en el circuito externo.$ 

Posteriormente, en la fase de descarga del generador y considerando que la resistencia de carga *Rc*?8, el circuito queda reducido al representado en la **Figura 10**.





Figura 10.Circuito equivalente de la fase de descarga de un generador de impulsos

Si se provoca la descarga disruptiva en los espinterómetros, las *n* etapas se "conectan" en serie y en la salida de alta tensión *AT* del generador aparecerá una tensión dada por la relación:

$$V_{AT} = \eta \cdot n \cdot \sqrt{2} \cdot V_{21}$$

donde ? es el rendimiento de una etapa, *n* es el número de etapas y *V* es el valor eficaz de la tensión de salida del transformador elevador. Cabe destacar que con respecto a *AT* y a *C2*, el generador es un circuito de una etapa con capacitancía equivalente *C1/n*, resistencia de frente equivalente  $R \cdot R_1$  y resistencia de cola equivalente  $R \cdot R_2$  cuyo esquema se ve en la **Figura 11**.



Figura 11. Circuito equivalente de un generador multietapa [2]-[4]

Este circuito es muy útil para calcular los parámetros del generador puesto que se reduce a alguno de los circuitos de una etapa señalados en la **Figura 1**.

- 13 -



#### .-CARACTERÍSTICAS NOMINALES DEL GENERADOR DE IMPULSO MULTIETAPAS.

Como todas las máquinas o aparatos, el generador de impulsos es definido por varios <u>datos</u>que representan sus características eléctricas, a saber [2], [4]:

#### - TENSIÓN NOMINAL.

La tensión nominal de salida de un generador de *n* etapas es el voltaje máximo de carga *Vo* multiplicado por el número de etapas, esto es:  $V_n = n \cdot V_o$  En realidad el voltaje máximo del impulso  $\hat{V}$  que puede ser aplicado al objeto de prueba es menor que  $n \cdot V_o$  ya que el rendimiento en la generación de la tensión de impulso es menor al 100%. Típicamente, el voltaje de carga *Vo* está en el rango de 50 *kV* a 400 *kV* mientras que los generadores son construidos para impulsos de voltaje que pueden llegar hasta los 5 *MV*.

#### - CAPACITANCÍA NOMINAL.

La capacitancía nominal C1/n de un generador de impulsos es la capacitancía por etapa C1 dividida entre el número de etapas *n*. Generalmente, C1/n es mínimo cinco veces la capacitancia del objeto de prueba o de lo contrario la eficiencia de voltaje será muy baja [6] (para diseño con máximo rendimiento ver el inciso 2.3 de este capítulo). Usualmente, la capacitancia por etapa se diseña para valores que estén por el orden de los 200 *nF* a 2000 *nF*.

#### - ENERGÍA NOMINAL.

La energía nominal de un generador está dada por la máxima energía que éste puede almacenar; y se

puede calcular empleando la expresión 
$$W = \frac{1}{2} \cdot n \cdot C_1 \cdot V_o^2$$
El rango típico está entre los 10 *kJ* y 100 *kJ*.

#### - NUMERO DE ETAPAS.

La selección del número de etapas depende de varios factores. Para formas de onda con oscilaciones apreciables, es necesario reducir la inductancia *L* del circuito y esto se logra limitando las etapas y por consiguiente, el número de resistencias de frente y cola se mantienen en la mínima cantidad posible. El otro factor es el voltaje de carga *Vo*, que indica la cantidad de capacitores de carga a utilizar y por ende el número de etapas *n*. Por lo general, los generadores de impulsos pueden tener desde unas pocas etapas hasta, por ejemplo, cincuenta de ellas.

# 2.5.- ESQUEMA COMPLETO DEL CIRCUITO DE PRUEBA DE IMPULSO

El circuito del generador de impulsos multietapa debe ser completado con otros elementos indispensables para la prueba de impulso; es decir, anexarle los aparatos y equipos necesarios para la medición de la

tensión de carga *Vo* de las etapas del generador y la medición de la tensión de impulso V aplicada al objeto de prueba. La **Figura 12** muestra el esquema completo para realizar una prueba de impulso tipo atmosférico 1,2/50 µs [4].



Figura 12. Esquema completo del sistema de prueba de impulso

El sistema de prueba está conformado por el generador de impulsos, el alimentador DC para la carga de los capacitores de etapa (con su respectivo divisor óhmico), el divisor de tensión para la medición de la tensión de impulso, el espinterómetro vertical y el objeto de prueba.

La medición de la tensión de carga *Vo* se realiza por medio del divisor de tensión, siendo (Rm+r) el valor total de la resistencia e (*I*) la corriente que la atraviesa, por lo que la tensión está dada por la <u>ley</u> de Ohm:

# $V_o = (Rm + r) \cdot I_{22}$

Por otra parte, la medición de la tensión de impulso se efectúa mediante el divisor de tensión que disminuye el voltaje a un valor adecuado para ser registrado por un osciloscopio. Cabe destacar que los elementos constituyentes del divisor de tensión -resistencia de alta tensión, de baja tensión, inductancia y capacitancia- pueden incidir directamente en la forma de onda de la tensión de impulso, como se explicará más adelante.



#### - METODOS DE INICIO DE LA DESCARGA DEL GENERADOR DE IMPULSOS.

El inicio de la descarga entre las esferas de cada etapa del generador se hace de forma "natural" o mediante el uso de un sistema auxiliar [2]-[3]. El primer método (descarga natural), se aplica para obtener la tensión de impulso deseada con alguno de los siguientes procedimientos:

- Con las esferas ajustadas a una distancia superior a la del inicio de la descarga, el generador es cargado a una tensión prefijada. Luego, se disminuye la separación interelectródica con un accionamiento a distancia hasta provocar la ruptura del aire.
- Las esferas de la primera etapa se ajustan a una distancia correspondiente a la tensión de descarga. Luego, se aumenta pausadamente la tensión de carga hasta que ocurra la ruptura.

Una alternativa al método de ruptura natural es el empleo de un sistema auxiliar para el inicio de la descarga, el cual posee como principal ventaja una mayor precisión del valor de la tensión provista por el generador, resultando en la reducción de la dispersión de campo eléctrico que se verifica en el caso de inicio natural. A continuación se describen algunas técnicas empleadas para iniciar la descarga con sistemas auxiliares.

#### - DISPOSITIVO ELECTROMAGNÉTICO

El espinterómetro de la primera etapa está compuesto por tres esferas, mostradas en la **Figura 13**, donde las externas *1* y *3*soportan toda la tensión de carga mientras que la esfera central *2* es sometida a un potencial intermedio a través de un divisor óhmico. Mediante un dispositivo electromagnético se conecta un contacto metálico entre las esferas *2* y *3* de tal modo que aparezca la tensión de carga entre las esferas *1* y *2*, provocando la descarga natural.



Figura 13. Inicio de la descarga de un generador de impulso con un dispositivo electromagnético [4]

#### - TRIGATRON.

El espinterómetro de la primera etapa del generador está constituido por una esfera y una semiesfera (ambas huecas); dentro de ésta última se instala un electrodo eléctricamente aislado (aproximadamente de un milímetro de diámetro) que tiene como función iniciar "la chispa" que conduce a la descarga completa entre el espinterómetro. El esquema se muestra en la **Figura 14**.





Figura 14. Espinterómetro de la primera etapa del generador con trigatrón [1]

La aplicación de una tensión de varios kilovoltios (alrededor de 4 *kV* a 10 *kV*) entre el electrodo interno y la semiesfera puesta a tierra provoca una distorsión del campo eléctricoque asegura una descarga controlable entre los dos electrodos principales (esfera-semiesfera) a un valor de tensión disruptiva más bajo que el requerido en condiciones de ruptura natural.

# -MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DE IMPULSO

En la prueba de impulso es necesario efectuar la medición de la tensión que se aplica al objeto de prueba, la cual se puede hacer utilizando algunos de los siguientes métodos: *a través de un espinterómetro de esferas, por medio del divisor de tensión conectado a un osciloscopio* y *por medio del divisor de tensión conectado a un voltímetro pico.* 

# -MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DE IMPULSO MEDIANTE EL ESPINTERÓMETRO DE ESFERAS.

La norma ANSI/IEEE Standard 4-1995 [7] define al espinterómetro como "un dispositivo constituido por dos electrodos metálicos, esféricos y de igual diámetro, donde la distancia que los separa es regulada a voluntad". Al aplicar entre dichas esferas un potencial, la descarga -a cierta distancia de ruptura- ocurre a un valor de tensión predeterminado. En la prueba de impulso, este valor es el voltaje pico de la onda o nivel básico de aislamiento (BIL) del equipo a ensayar. La disposición física de las esferas se hace vertical u horizontalmente, como se ve en la **Figura 15**.









Las dimensiones mostradas son las distancias exigidas a los soportes y <u>bases</u> de las esferas, donde A y B son las distancias mínimas a tierra (clearances) del espinterómetro respecto a cualquier objeto circundante. Cabe destacar, que para espacios interelectródicos pequeños la ubicación de cualquier objeto a tierra en la vecindad del espinterómetro no afecta considerablemente la medición, pero a espacios entre esferas más grandes la presencia de superficies tales como paredes -incluso a la distancia B- tiene un importante efecto. La **Tabla I** muestra las separaciones mínimas y máximas que debe tener el espinterómetro respecto a cualquier objeto ubicado en las cercanías.

Diámetro de las esferas D [mm]	Amin	Amix	Besin
62.5	7D	9D	14S
125	6D	8D	12S
250	5D 4D	7D 6D 6D	10S 8S 8S
500			
750	4D		
1000	3,5D	5D	75

Tabla I. Distancias de las esferas hacia cualquier objeto (extracto) [7]

Adicionalmente, en la **Tabla II** se encuentra un extracto de las calibraciones para impulsos de tensión tipo atmosférico 1,2/50 µs de polaridad negativa al 50% de la tensión disruptiva [1]-[2]-[7], válidas para las siguientes condiciones ambientales:

- Temperatura ambiente=20 °C
- Presión atmosférica=101,3 *kPa*=760 *mmHg*.

Es de notar que una de las esferas es conectada a tierra, específicamente al circuito de retorno del generador de impulsos, mientras que la otra va al terminal de alta tensión que conecta también al objeto de prueba.



Separación de las esferas [mm]	V	oltaje pico [ <u>k</u>	N
	Diámetro de las esferas [cm]		
	6,25	12,5	25
5	17,2	16 <mark>,</mark> 8	
10	31,9	31,7	
15	45,5	45,5	
20	58,5	59,0	
25	69,5	72,5	72,5
30	79,5	85,0	86,0
35	(87,5)	97,0	99,0

Tabla II. Separación de las esferas con una de éstas puesta a tierra (extracto) [1]-[2]-[7]

# - ERRORES DE LA MEDICION.

Las mediciones de impulsos de voltaje están generalmente sujetas a considerables errores causados por contaminaciónen el aire (polvo y otras partículas) y alrededor o en contacto con las esferas (polvo, grasa, etc.); por lo que los valores entre paréntesis en la **Tabla II** -definidas para espaciamientos superiores a 0,5D- poseen un error de  $\pm 5\%$  si las distancias máximas a tierra de la **Tabla I** son respetadas. El error de los demás valores se ubica en  $\pm 3\%$  [4], [7].

#### -ELECTRODOS DE ESFERAS.

Los requerimientos en cuanto a las dimensiones y montaje de las esferas que constituyen al espinterómetro establecen que las mismas deben ser construidas de tal manera que sus superficies sean lisas, libres de irregularidades (en especial en los puntos de ruptura dieléctrica), que la curvatura sea lo más uniforme posible y además limpias y secas. Asimismo, el diámetro de la esfera medido entre dos puntos cualesquiera de su superficie no debe exceder el 2% de su valor nominal [7].

#### - RESISTENCIA SERIE EN EL CIRCUITO DE MEDICION.

La conexión de alta tensión del generador de impulsos con el espinterómetro es generalmente hecha a través de una resistencia anti-inductiva (máximo  $L=30 \ \mu$ H) de un valor que no exceda los 500 O. Esta condición aplica en los casos en los que se utilizan esferas de diámetros grandes con la finalidad de eliminar las oscilaciones de alta frecuencia (ocasionadas por las ondas viajeras reflejadas por efecto de desacoplamiento de las impedancias características de las líneas de interconexión) entre el espinterómetro y el conductor de alta tensión conectado al mismo. En casos donde se empleen esferas de diámetros más pequeños, este fenómeno se considera despreciable [7], [12].

# - PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICION DE LA TENSION DE IMPULSO.

Garantizando que las superficies de las esferas del espinterómetro vertical están en buen estadoy libres de contaminación (y aún así, en el mejor de los casos, el error es del 3%), para la determinación del valor pico de la tensión de impulso existen dos procedimientos, a saber [4], [7]:



- Si la tensión es de valor desconocido se ajusta, en pasos, la distancia interelectródica a no más del 2% del valor esperado para la descarga y se aplican seis (6) impulsos para cada ajuste. El intervalo entre cada descarga no debe ser menor a 5s. La tensión disruptiva al 50% (*V50*%) se obtiene interpolando entre dos ajustes de la distancia interelectródica ó el ajuste de tensión, entonces el primero corresponderá a dos (2) descargas ocurridas en los seis impulsos sugeridos y la otra en cuatro (4) descargas o mas.
- Otro procedimiento es el de mantener la distancia interelectródica constante y prefijada al valor indicado en la **Tabla II**.Variando la tensión del generador no más del 2% del valor esperado y aplicando sucesivamente dos series de diez (10) impulsos al espinterómetro (el intervalo de tiempo entre cada impulso no debe ser menor a 5s) se verifica la tensión tabulada *V50%* si ocurren de cuatro a seis descargas en dichas series.

# - FACTOR DE CORRECCIÓN POR CONDICIONES AMBIENTALES.

Las tensiones de descarga reportadas en la **Tabla II** están referidas a condiciones ambientales normalizadas (temperatura ambiente=20 °C, presión atmosférica=760 *mmHg*), por lo que si existe un cambio en alguna de éstas es necesario reajustar el voltaje *V50%* aplicando un factor de corrección.

El valor de la tensión de descarga corregida *V50%corr* se puede definir por medio de la siguiente expresión:

$$V_{50\% corr} = k_d \cdot V_{50\% 23)}$$

donde *kd* es el factor de corrección en función de la densidad relativa del aire (DRA) ?*r* y *V50%* es la tensión de descarga a condiciones ambientales normalizadas (ver **Tabla II**).

La expresión para calcular la densidad relativa del aire ?r está dada por:

$$\rho_r = \frac{p}{p_o} \cdot \frac{273 + t_o}{273 + t_{24}}$$

donde *po* es la presión atmosférica normalizada (760 *mmHg*), *p* es la presión atmosférica a las condiciones de prueba, *to* la temperatura ambiente normalizada (20°C) y *t* la temperatura en grados centígrados a las condiciones de prueba. En la **Tabla III** se muestra el factor de corrección de la tensión disruptiva *kd* a distintos valores de densidad relativa del aire [6].

DRA	0,70	0,75	0.80	0,85	0,90	0.95	1.00	1,05	1,10	1,15
Ka	0,72	0,77	0,82	0,86	0,91	0,95	1,00	1,05	1,09	1,13

Entonces, para determinar la tensión de ruptura -a una separación de esferas dada- cuando la DRA es diferente de la unidad se selecciona el valor *kd* asociado y se emplea la expresión (23).

Otro aspecto a resaltar es el error introducido por efectos de la humedad en el aire dentro del recinto de la prueba (alrededor del 3% en laboratorios [7]), aunque para niveles de tensión menores a 300 kV éste se considera despreciable.



# - MEDICION DE LA TENSION DE IMPULSO MEDIANTE EL DIVISOR DE TENSION Y EL OSCILOSCOPIO.

Este es el método de medición de tensión de impulso ampliamente utilizado. El divisor de tensión, al conectarse en el terminal de alta tensión del sistema de prueba, reduce el voltaje a un valor accesible para la medición con el osciloscopio (algunas centenas de voltios) y la interconexión se hace vía <u>cable coaxial</u>, como se muestra en la **Figura 16**.

El divisor consta de dos impedancias en serie Z1 y Z2 (con Z1 >> Z2) donde la tensión de impulso a ser medida es aplicada entre los terminales exteriores de la configuración y el osciloscopio es conectado entre el terminal intermedio y el externo inferior.



Figura 16. Esquema básico para la medición de la tensión de impulso

# - MEDICIÓN DE LA TENSIÓN DE IMPULSO MEDIANTE EL DIVISOR DE TENSIÓN Y EL VOLTÍMETRO PICO.

Como método complementario se emplea un voltímetro pico para registrar la tensión de impulso, que según Chubb y Fortescue, consiste en dos diodos, un capacitor C y un miliamperímetro [1], [3], [4]. Brevemente se explica su funcionamiento: "Considerando que los semiperíodos positivos y negativos del voltaje V(t) son iguales, con valor pico Vp, entonces el valor promedio de la corriente rectificada que circula por el galvanómetro es:

$$I_{(t)} = \frac{C}{T} \left[ V_{(\frac{T}{2})} - V_{(0)} \right]_{25}$$

Por consiguiente, la tensión pico indicada por el instrumento es finalmente:

$$V_{p} = \frac{\hat{I}}{2fC}_{26}$$



La **Figura 17**muestra el circuito básico de un voltímetro pico. Cabe destacar que este método se ha ido remplazando por nuevas tecnologías para mediciones de este tipo, como por ejemplo el uso de osciloscopios digitales con <u>memoria</u> [4].



Figura 17. Circuito del voltímetro pico

# RESPUESTA DE LOS DEVANADOS DEL TRANSFORMADOR FRENTE A FENOMENOS DE IMPULSO – CALCULO DE LA CAPACITANCIA

Cuando una descarga atmosférica incide en un transformador el voltaje originado se distribuye por todo el devanado, produciendo esfuerzos dieléctricos sobre el aislamiento.

El efecto de la incidencia de un impulso en un devanado del transformador puede dividirse en tres periodos de tiempo [8].

Como en el primer intervalo es extremadamente corto, usualmente fracciones de microsegundos. En este periodo no puede penetrar una cantidad significativa de corriente al devanado debido a su inductancia. La única corriente que penetra es la corriente de desplazamiento que aparece en las capacitancias asociadas al arrollado. Esta origina una distribución inicial de voltaje que es totalmente capacitiva y que responde a la forma:

$$e_{x} = \frac{E \sinh \frac{\alpha_{d}}{L}}{\sinh \alpha_{d}} \sum_{27}^{27}$$

Donde: *<sup>44</sup> es un factor geométrico propio del arrollado y L la longitud total de mismo.* 

La constante es la razón entre la capacitancia a tierra de la espira respecto a su capacitancia serie

$$\varepsilon = \sqrt{C_{g} \ / C_{s}}$$

La no uniformidad en la distribución del potencial se produce por la no uniformidad en la corriente de fuga que circula a lo largo del devanado, esto debido a la derivación de parte de esta corriente por las capacitancias a tierra. La constante define la no uniformidad de la distribución de potencial en el devanado en este instante de tierra.



#### -REPRESENTACION DE LOS DEVANADOS DEL TRANSFORMADOR A FENOMENOS DE IMPULSO ATMOSFERICO

Si representamos el transformador como <u>una red</u> equivalente compuesta por resistencias, inductancias y capacitancias, **Figura 18**. De esta figura se observa que el aislamiento entre espiras, próximo al terminal por donde penetra el impulso, esta sometido a los mayores esfuerzos dieléctricos. Esto implica el porque de la alta incidencia de fallas en las primeras espiras del devanado y particularmente, recobra importancia cuando el impulso posee un tiempo de formación de cresta reducido.



Figura 18. Red Equivalente de Resistencias, Inductancias, capacitancías de un transformador

L = Inductancia

 $C_s = _{Capacitancía Serie entre Bobinas}$ 

C<sub>g</sub> = <sub>Capacitancía</sub> Shunt Bobinas Tierra

 $R_{I} =$  Perdida de la Resistencia Inductiva

 $R_{g} = _{Perdida \ de \ la \ Resistencia \ Capacitiva \ Serie}$ 

 $R_{g} = Perdida de la Resistencia Capacitiva Shunt$ 

En el instante de la incidencia del impulso en el transformador los elementos capacitivos solo reaccionan en el frente de la onda estableciéndose de esta manera una distribución inicial del potencial que usualmente es no uniforme. Igualmente en el <u>final</u> del fenómeno lo cual ocurre durante la cola de la onda, el elemento resistivo es el que prevalece estableciéndose una distribución final usualmente uniforme, tal como se muestra en la **Figura 19**.





Figura 19. Distribución Inicial y Final del Voltaje de Impulso

Entre el extremo inicial y final del arrollado se desarrollan complejos sistemas de oscilaciones como se muestran en la **Figura 20**, las cuales son efectos de la transferencia de energía <u>electrostática</u> a electromagnética; producidas en las inductancias y las capacitancias del arrollado.



Figura 20. Distribución de los Transitorios con el impulso de voltaje

La respuesta electrostática se produce por el acople capacitivo entre arrollado, tal como se muestra en la **figura 20**. Esta configuración puede interpretarse como un sistema de condensadores, en el cual el voltaje se reparte en proporción directa a la capacitancia. El acople capacitivo de un punto respecto a otro es mayor mientras mas próximos estén.

La respuesta electromagnética es más lenta en el tiempo y puede ser analizada mediante el circuito equivalente del transformador, como se muestra en la **figura 21**.





# Figura 21. Circuito Equivalente de las Capacitancías en la Bobina

Algunas alternativas para solucionar estos inconvenientes a los devanados del transformador sometidos a fenómenos de impulso son los siguientes:

- Reforzar el aislamiento en las primeras espiras sometidas a esfuerzos dieléctricos. A pesar de esto, todavía se detectan fallas en este punto del aislamiento, debido fundamentalmente a la respuesta oscilatoria del potencial en los tiempos posteriores.
- Ínter lazar el devanado, de forma de que su secuencia eléctrica no coincida con su secuencia geométrica, equilibrando las diferentes capacitancias a tierra.
- Colocar pantallas metálicas adyacentes a los devanados, compensando la corriente de fuga a través de las capacitancias a tierra.

Como en la matriz de capacitancia de barra esta contenida la informaciónacerca de la red capacitiva del transformador. Esta red es responsable de la distribución inicial de voltaje en los devanados, como lo señalamos anteriormente. Entonces la red capacitiva modela los efectos electrostáticos del arrollado relacionados con el campo eléctrico que aparece al aplicar el voltaje sobre los terminales. En este estudio no se toma en cuenta los efectos magnéticos que pueden estar asociados a las corrientes de desplazamiento de las corrientes capacitivas [9].

Los esfuerzos electrostáticos que aparecen sobre el devanado en la prueba de impulso dependen en último caso de la distribución de los campos eléctricos en el exterior de los conductores del devanado. Al reducir el análisis de campos a un análisis circuítal a través de un número finito de elementos, por lo que se pueden identificar tres tipos de parámetros en la red, a saber, capacitancias entre los elementos del arrollado, capacitancias entre un elemento y tierra, y capacitancia serie a lo largo del elemento.

Aunque en estricta teoríaexcite una capacitancia entre cada par posible de elementos en el presente estudio se considerará solamente la capacitancia entre los devanados del transformador. Ver **figura 22**. Donde:

BTE: Devanado de Baja Tension Externa de la Bobina.

AT: Devanado de Alta Tensión de la Bobina.

BTI: Devanado de Baja Tensión Interna de la Bobina.







Es necesario, para poder aplicar con efectividad las técnicas desarrolladas en el presente trabajo, y poder establecer una relación entre la geometría de los arrollados bajo estudio y los parámetros de sus redes equivalentes. [11].

Las bobinas que estudiaremos tienen arrollados tipo capas, debido a su simetría, presentan una mejor distribución de esfuerzos mecánicos y eléctricos, proporcionando un buen comportamiento en fenómenos transitorios.

De acuerdo al tipo de núcleo que se utiliza, el arrollado pude ser construido de dos formas, tal como se muestra en la **Figura 23**.

- a) Concéntrico: Para núcleo tipo Columna.
- b) Alterno: Para núcleos tipo acorazado.



Figura 23. Tipos de Núcleos Según el Tipo de Arrollados.

En el núcleo tipo acorazado el arrollado tiene forma rectangular, lo que facilita el enfriamiento y reduce el espacio ocupado por el devanado. El núcleo tiene forma rectangular, lo que asegura una superficie máxima para el paso del flujo en el interior de los arrollados. La desventaja de esta forma constructiva radica en que utiliza una longitud mayor de conductor.

# TIPO DE BOBINA

Para nuestro estudio utilizaremos una bobina de estructura biconcéntrica, en donde, generalmente, el arrollado de baja tensión se divide en dos partes, una interior y otra exterior, respecto al devanado de alta

- 26 -



tensión. Este tipo de estructura reduce los valores de tensión de cortocircuito para una misma potencia. Esto permite obtener equipos de mayor potencia nominal para las mismas dimensiones y peso del núcleo. **Figura 24**.



Figura 24. Bobina Tipo Biconcéntrica

Normalmente cada sección de la bobina tiene una capacitancía entre el arrollado sometido a la prueba de impulso y la bobina que es aterrada, entonces todas las capacitancías en paralelo a tierra es la suma de las capacitancías individuales de la bobina [20].

# - CALCULO DE LA CAPACITANCIA PARA PRUEBA DE IMPULSOS A UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.

Para el <u>cálculo</u>de la capacitancia tomaremos un devanado de baja tensión interno como un cilindro en paralelo con el devanado de alta tensión y este en paralelo con el devanado de baja tensión externo. **Figura 25.** 





Figura 25. Representación de la bobina como dos cilindros

Entonces para calcular la capacitancia entre los devanados tenemos que [20]:

$$C_{B} = 1.06 \frac{AL}{B}_{28}$$

Donde A es el diámetro interno de la bobina de baja tensión interna y la alta tensión la cual se calcula mediante:

 $A = I_H + O_{L29}$ 

 $I_{H}$  = Diámetro interno del devanado de alta tensión (superficie metálica).

 $O_I =$  Diámetro externo del devanado de baja tensión (superficie metálica).

L =Longitud de la columna de la bobina desde arriba hasta abajo plano estático.

B = Espacio entre la alta tensión y la baja tensión en mm. Metal a Metal.

Para evaluar la capacitancia de un transformador monofásico de distribución, tomaremos los valores de un transformador tipo estándar el cual tiene los siguientes valores nominales de diseño:

Tabla IV. Características del Transformador para el Estudio



Kya.	15
Tensión A.T.	13800
Tensión B.T.	120/240
Kbil Alta Tensión	125
Kbil Baja tensión	30
Frecuencia	60 Hz
Conductor A.T.	Alambre de Cobre (Ø0.83mm)
Conductor B.T.	Foil de Aluminio (120*0.3mm)
Espesor Papel Aislante	0.125mm
Espesor Papel Refrigerante	3.25mm

De la hoja de diseño del transformador tomamos los espesores de la bobina (ver **Tabla V**), esta tabla nos permitirá determinar el valor de la capacitancia.

			CAB BT	CAB AT	
	Espes. A1	Espes. A2	Espes. B1 (BT)	Espes. B2(AT)	Esp. Med
BASE	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
BTI	11.2	11.2	14.6	14.6	12.1
BARR1	3.0	3.0	4.9	3.0	3.2
AT	28.0	28.0	34.5	36.5	30.0
BARR2	3.0	3.0	4.9	3.0	3.2
BTE	11.2	11.2	14.6	14.6	12.3
AISL EXT	0.8	0.8	2.3	0.8	0.8
TOTALES	59.2	59.2	77.7	74.6	

Tabla V. Espesores de la Bobina Para el Cálculo de la Capacitancia

En la siguiente Figura 26 podemos ver como es la distribución de los espesores en la bobina.



Figura 26.Vista de la Bobina desde donde se Indica la Colocación de los Espesores



Tomando los valores del cuadro de espesores y utilizando las **Ecuaciones (28) y (29)**, tenemos lo siguiente:

#### - CAPACITANCÍA ENTRE BTI – AT.

Cálculo de las Áreas:

$$I_H = (Esp.Medio(Base + BTI + Barr 1) = 2.0mm + 12.1mm + 3.2mm = 17.3mm$$
  
 $O_I = (Esp Medio(Base + BTI) = 2.0mm + 12.1mm = 14.1mm$   
 $A = 17.3mm + 14.1mm = 31.4mm$ 

Espacio Entre la Bobina BTi-AT en (mm)

$$B = 3mm$$

Capacitancia BTi-AT:

$$C_{k} = 1.06 * \frac{(31.4mm)*120mm}{3} = 1331.36pF$$

- CAPACITANCÍA ENTRE AT – BTe.

Cálculo de las Áreas:

$$I_{H} = (Esp.Medio (Base + BTI + Barr1 + AT) =$$

$$2.0mm + 12.1mm + 3.2mm + 30mm = 47.3mm$$

$$O_{I} = I_{H} + (Esp.Medio (Barr2) = 47.3mm + 3mm = 50.5mm$$

A = 47.3mm + 50.5mm = 97.8mm

Espacio Entre la Bobina BTi-AT en (mm)

B = 3mm

Capacitancia AT-BTe:

$$C_{k} = 1.06 * \frac{(97.8mm) * 120mm}{3} = 4146,72.36pF$$

#### Capacitancia Total:

Entonces la capacitancia total de la bobina es:

$$C_{kTotal} = 1331.36 pF + 4146,72 = 5478.08.72 pF$$

- 30 -



Este valor obtenido se suma al valor de la capacitancía del divisor de tensión para realizar los ajustes y cálculos necesarios para las pruebas de impulso 1.2/50µseg al transformador, este valor total es el que se

conoce como

Luego de este cálculo se procedió a comprobar el mismo midiendo la capacitancia mediante el equipo DOBLE el cual posee un error de medición de ±2%, donde (C LH) es la capacitancía entre el devanado de baja tensión interna y alta tensión, y (C HL) es la capacitancía entre el devanado de alta tensión y baja tensión externa.

Tabla VI. Lecturas de las Capacitancias con el Equipo DOBLE

Modo UST	Lectura (pF)
CLH	1320
CHL	3987

En la **Tabla VII** se puede observar los valores de capacitancia obtenidos mediante los cálculos y los valores de capacitancia medidos con el equipo DOBLE.

Tabla VII. Capacitancias Calculadas y Medidas

	Bti-AT (pF)	AT-BTe (pF)
Calculados	1331.36	4146,36
Medidos	1320	3987

Como los valores de capacitancia son influenciados por la geometríade la bobina, estos muchas veces no son constantes para todos los diseños de una misma capacidad y características de construcción. Así podemos ver en la tabla anterior VII como los valores calculados y los medidos difieren uno del otro.

- DESCRIPCIÓN DEL GENERADOR DE IMPULSOS El generador de impulsos de tensión se emplea para realizar pruebas de impulso a sus transformadores de potencia según los lineamientos de los estándar ANSI/IEEE Standard 4-1995 [7]. La **Figura 27** muestra al generador de impulsos a estudiar:



- 31 -





Figura 27. Generador de impulsos

Las dimensiones físicas del generador de impulsos abarcan aproximadamente seis metros de altura -desde la base hasta el último condensador- y un metro con diez centímetros entre cada una de las columnas aislantes que soportan a los capacitores de etapa. Alrededor de éste se encuentran dispuestos los demás equipos constituyentes del sistema de prueba de impulsos, a saber: el divisor de tensión, el espinterómetro vertical y líneas de interconexión, así como también los shunts y los cables coaxiales. Por otra parte, la mesa de <u>control</u>del generador y el osciloscopio se ubican en la Sala de Pruebas del Laboratorio Trifásico; disponiendo en su totalidad un área aproximada de nueve metros cuadrados.

# - DATOS NOMINALES:

Los datos nominales que caracterizan al generador de impulsos son los siguientes:

- *Modelo* : M 7.5-600-4V 1970
- Forma de onda: 1.2/50 μs
- Voltaje de alimentación : 208 V
- Tensión de los <u>servicios</u> auxiliares: 24 V
- Tensión nominal: El máximo voltaje de carga del generador es Vn=600 kV.
- *Capacitancía nominal*: El generador de impulsos posee dieciséis condensadores de valor nominal *C1*=0,25 µF cada uno y un voltaje nominal *Vn*=100 *kV*.



#### - SISTEMA DE PRUEBA DE IMPULSO.

Algunos ejemplos de mediciones de la onda de tensión de impulso hechas en pruebas en vacío (específicamente, sin objeto de prueba pero con el capacitor de precarga del divisor de tensión) antes de efectuar la configuración al generador de impulsos y sus componentes, se muestra en la **Figura 28**.



Figura 28. Ejemplo del frente y cola de la onda de impulso en vacío

La gráfica expuesta corresponde a una configuración de resistencia de frente R1=102W, resistencia de cola R2= 709W, capacitancías del generador de impulso 0.125mF (2 etapas) y para valores aproximados de tensión de impulso V=60 *kV* de polaridad negativa y rango de temperatura ambiente *Tamb*=21°C-24°C; que demuestran el comportamiento inadecuado del sistema respecto a las normas estudiadas y además altas oscilaciones en el frente de la onda mayor a 3%.

El ejemplo de la **Figura 29**es resultado de conectar únicamente al divisor de tensión y al espinterómetro vertical; es decir, las pruebas se hicieron en vacío y se pueden apreciar fuertes oscilaciones en el frente de onda que hacen de obligatoria necesidad su disminución o amortiguación. Por lo tanto, es prioridad obtener la onda de impulso normalizada en esta condición.





Figura 29. Onda como resultado de conectar las capacitancías 1 y 2 del generador de impulsos.

Luego de esto se procedió a realizar la prueba de manera de obtener el menor ruido en el frente de la onda de impulso, además los ajuste que se realizaron fueron los de ir cambiando las capacitancías del generador de impulso de manera progresiva y escalonada, resultado de esto se puede ver en la **Figura 30**.



Figura 30. Onda como resultado conectar las capacitancías 2 y 3 del generador de impulsos.





Figura 31. Ejemplos de la forma de onda de tensión sin objeto de prueba, posterior a las modificaciones-Capacitancía 4 y 5 conectadas.

Así pues, para este caso planteado no hubo soluciones inmediatas debido a que se decidió, como una primera acción correctiva importante, aplicar el mantenimiento parcial al generador de impulsos como:

- a. Se sustituyo de la línea de cobre de Ã~4mm, por una línea de Ã~15mm.
- b. Se cambiaron las capacitancías del generador de impulso.
- c. Se calibro la distancia de los espinterometros horizontales de manera de reducir el ruido en el frente de la onda.

Es evidente que las formas de onda obtenidas con los nuevos cambios no tienen la forma de la onda de impulso normalizada tipo atmosférico 1,2/50 µs, lo que hace necesario analizar los fenómenos involucrados en el comportamiento de dicha forma de onda. Éstos son básicamente la inductancia presente en el circuito y las reflexiones de la onda viajera por el mismo, así como también los valores de resistencia de frente y cola.

# - INDUCTANCIA.

Como se ha explicado, las inductancias internas del generador de impulsos (debida principalmente a las resistenciasde frente y cola) y las externas (debida a los conductores de interconexión) oscilan con la capacitancia del circuito externo. Según la norma internacional ANSI/IEEE Std 4-1995[7] y la norma europea IEC 60 [12], el sobrepico máximo de las oscilaciones no debe exceder el 3% del valor de la tensión pico aplicado al "objeto de prueba". Normalmente la inductancia del generador de impulso es aproximadamente de 3 a 5  $\mu$ H por etapa y el conductor es de 1 $\mu$ H/m. [6].



#### - ONDAS REFLEJADAS.

El otro fenómeno involucrado son las oscilaciones superpuestas de alta frecuencia debidas a los rebotes de onda viajera en la línea conectada entre el generador y el divisor de tensión y también entre el divisor y el espinterómetro vertical (considerando que las impedancias características de los cables coaxiales están acopladas con los atenuadores).

#### - RESISTENCIA DE AMORTIGUAMIENTO.

Como el divisor de tensión presenta una respuesta oscilatoria se hace necesario introducir una resistencia de amortiguación cuyo cálculoprevio se puede hacer con la siguiente expresión (para condición crítica) [1], [3], [5], [6], [10]:

$$R_{d} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}_{32)}$$

Donde *L=es la inductancia del generador de impulso* y *C=es la capacitancia del divisor y la carga*, en el momento del ensayo. También se puede utilizar una expresión empírica válida para la condición en la cual la respuesta inicial alcanza un máximo sobrepico de 10% respecto al escalón y que proporciona el valor de Rd, a saber [10]:

$$R_d = 1.2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}_{33}$$

Para el ensayo en vacio se realizara el siguiente ejemplo; con un valor de L=  $3\&\mu H$ , C=3000pF y aplicando la ecuación 32 y 33 tenemos lo siguiente:

$$R_{d} = 2 \cdot \sqrt{\frac{3\mu H}{3000 \, pF}} = 63.2 \Omega \ R_{d} = 1.2 \cdot \sqrt{\frac{3\mu H}{3000 \, pF}} = 37.9 \Omega$$

Es evidente que el rango de la resistencia de amortiguamiento no supera las decenas de ohmios, por lo que es importante el valor de *Rd* no sólo porque amortigua las oscilaciones sino que influye proporcionalmente en el tiempode frente de la onda, por lo que tiene que existir para su determinación un compromiso entre el amortiguamiento y *T1*, por lo que es necesario tomar en cuenta el valor de la capacitancía de la carga.

Cada vez que existe variación del valor de capacitancia, ya sea por cambios en el divisor capacitivo como en el valor del objeto de prueba o carga es necesario calcular el valor de Rd.

#### -SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL GENERADOR DE IMPULSOS.

Un aspecto a considerar en la prueba de impulsos de tensión es el tiempo en demasía que se invierte en predeterminar los parámetros del generador de impulsos -resistencia de frente y cola, número de etapas, número de capacitores por etapa- para obtener la forma de onda normalizada 1,2/50  $\mu$ s(los operadores del equipo afirman que la duración del preajuste puede ser de hasta un día), trayendo como consecuencia un injustificado aporte de horas/ hombre y retraso en el cronograma de pruebas de los transformadores en producción.



Por consiguiente, si se conocen adecuadamente los valores de los parámetros disponibles y los fenómenos involucrados en la prueba de impulso es posible realizar una simulación del sistema y utilizarla como referencia importante en el ajuste inicial de la configuración. A partir de esta consideración, es necesario "precisar" cuál es el modelo circuital más conveniente para cada uno de los parámetros involucrados en el sistema de prueba de impulsos, como se explicará en el siguiente apartado.

Para las modelaciones del generador de impulso utilizaremos el programa Pspice y ATPDraw los cuales presentan características de diseñocompletamente diferentes ya que el primero es un completo simulador para diseños analógicos y digitales, fundamentalmente se utiliza en la rama de la electrónica, el segundo es para realizar análisisde transitorios en sistemaseléctricos de potencia, el cual puede ser adquirido libremente mediante una solicitud a cualquier comité dependiendo de la ubicación del solicitante. Con sus sofisticados modelos internos, puede simular diseños de alta frecuencia, diseños de circuitos integrados de baja potencia y circuitos de potencia.

# - MODELOS CIRCUITALES PARA LA SIMULACION.

La escogencia de los modelos circuitales de los elementos y dispositivos que conforman tanto al generador de impulsos como al sistema de pruebas se hace a continuación:

# - RESISTENCIA DE FRENTE Y COLA.

La **Figura 32**representa el modelo típico de las resistencias de frente y cola utilizadas en el generador de impulsos, donde *R* y *L* equivalen a la resistencia e inductancia nominales considerándolas como parámetros concentrados [13], [26]. La inductancia de estas no se tomara en cuenta para la modelación ya que las mismas no afectan la onda. La capacitancia en paralelo, que representa al aceite dieléctrico, no será tomada en cuenta por ser de un valor extremadamente pequeño (mediciones realizadas establecen un rango aproximado de 7 *pF* a 15 *pF*), por lo que en la modelación no existirá un cambio importante al despreciarla.





# - RESISTENCIA DE CARGA.

La resistencia electrolítica se puede representar como una resistencia concentrada o un circuito abierto (debido al gran valor que posee respecto a las de frente y carga). La **Figura 33** muestra como se pudiera representar en la simulación computacional. Aunque para efectos de nuestro ensayo no la utilizaremos ya que por ser un valor muy alto que tiende a infinito y solamente esta presente en el momento de la carga de los capacitores.





Figura 33. Resistencia electrolítica

# -CONDENSADORES DE ETAPAS.

Asumiendo el modelo teórico clásico de un dieléctrico [10]-[14], la capacitancia de etapa del generador de impulsos se define por una rama resistiva y capacitiva en paralelo, como se muestra en la **Figura 34**. El condensador *Cp*es la capacitancia ideal del dieléctrico y la resistencia *Rp* representa las pérdidas de energía del mismo. Ésta última está en el orden de giga-ohmios, por lo que a de ser despreciada en la simulación.



Figura 34. Condensador de etapa

# - CONDUCTOR DE INTERCONEXIÓN

El conductor de interconexión se puede representar como una línea de transmisión sin pérdidas con parámetros distribuidos [31], tal y como se muestra en la **Figura 35**.



Figura 35. Línea de interconexión

De esta consideración, la impedancia característica *Zlínea* se puede estimar de forma aproximada con el empleo de la curva mostrada en la **Figura 36** [18].





Figura 36. Impedancia característica de un conductor aéreo

Pero nosotros la calcularemos a través de la siguiente ecuación [1],

$$Z_{inex} = 60 * Ln \left(\frac{4.H}{D}\right) - Ln \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + 2\left(\frac{H}{L}\right)^2}\right)_{36}$$

para una altura promedio del conductor de H=2m; L=4m. y un radio promedio de r=0,015 m. se obtiene una  $Z_{\text{Inter}} \cong 376.64\Omega$  valor que es bastante típico para este tipo de conductores. Asimismo, experiencias han demostrado que el tiempo de propagación de la onda

# $\tau_{v}$

esta influenciado por la velocidad de la luz [1] el tiempo de propagación se calcula con la expresión donde *x* es la longitud del conductor y *c*es la velocidad de la luz

# $c = 300 x 10^6 m/s$

Entonces para una longitud de

# x = 4m

$$au_{\mathbf{y}} \cong 10 ns$$

# - DIVISOR DE TENSIÓN.

Conociendo que el divisor de tensión es del tipo resistivo con apantallamiento capacitivo, el circuito que puede modelar aproximadamente a este equipo es el mostrado en la **Figura 37** [1], [16]. Éste está conformado por la resistencia de alta tensión *RAT*, su inductancia *LAT*, la resistencia e inductancia de baja - 39 -



tensión, *RBT* y *LBT* respectivamente, por la capacitancía  $C=3000 \ pF$  y por las capacitancias a <u>tierra</u> uniformemente distribuidas *Ce* (despreciables respecto a *C*).



Figura 37. Modelo del divisor de tensión

# -ESPINTEROMETRO VERTICAL.

En la descarga del generador de impulsos el espinterómetro vertical no tiene actuación alguna en este proceso (para onda plena), por lo que se puede despreciar o modelar como un capacitor de valor pequeño (simples mediciones realizadas en el equipo con esferas de diámetro *Dnom*=12,5 *cm* y separación de 80 *cm* arrojaron que la capacitancia es de aproximadamente 25-35 *pF*). La **Figura 38** muestra el espinterómetro de esferas.



Figura 38. Espinterómetro vertical

# -ESPINTEROMETRO HORIZONTAL.

Para iniciar la descarga del generador de impulsos las esferas de etapa se pueden sustituir por un cortocircuito [14],[17] o por un interruptor inicialmente abierto, que se ve en la **Figura 39**.





Figura 39. Espinterómetro horizontal

Un aspecto a considerar en la modelación es el valor de la resistencia de "cierre" del interruptor o resistencia del arco eléctrico, la cual se calcula con la Ley de Toepler, a saber [18]:

$$R_{arco} \cong \frac{a_{r} \cdot d}{\int I_{arco} \cdot dt}_{37}$$

donde aT= 80.10-3 *Vs/m* y *d* es el espacio interelectródico. Típicamente *Rarco* oscila entre 0-10000 y como por lo general la caída de tensión no es significativa para los niveles de tensión empleados en las pruebas de impulsos con el generador, se utilizará *Rarco*=0-100.

# -OSCILOSCOPIO

El circuito del osciloscopio utilizado para las pruebas de la tensión de impulso será el mostrado en la **Figura 40**y representa la impedancia de entrada de los canales de medición.



Figura 40. Modelo del osciloscopio

# -CABLES DE MEDICIÓN.

El modelo del cable coaxial se indica en la **Figura 41** y se considera ideal (sin pérdidas), por lo que los parámetros que lo definen son la impedancia característica Zoy el tiempo de viaje (o de retardo) tv. Éste

 $t_r = \frac{d}{v}$  donde *d*es la distancia del cable y *v* es la velocidad de propagación de la onda de impulso en el mismo, las características técnicas del cable coaxial RG-59 señala que la velocidad de propagación es del 83% de la velocidad de la luz entonces la velocidad para este cable será de  $v = 240 \times 10^6 m/s$  y el tiempo de propagación será de  $t_r = 5m/240 \times 10^6 m/s = 23.83 ns$  [6]-[14].





Figura 41. Cable coaxial

# - PUESTA A TIERRA:

Asumiendo el electrodo de puesta a tierra como parámetro concentrado, el modelo circuital del mismo, para fenómenos transitorios, queda definido como el mostrado en la **Figura 42** [3].



Figura 42. Modelo de la barra de puesta a tierra

La resistencia, inductancia y capacitancia de la barra -de longitud *l*y radio *a*- se pueden calcular con las siguientes expresiones [3]:

# .- CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LA BARRA DE ATERRAMIENTO (R):

$$R = \frac{\rho}{4\pi} \ln(\frac{4i}{a})_{(38)}$$

$$R = \frac{20\Omega m}{4*\pi} \ln(\frac{4*2m}{0.012m}) = \frac{10.34\Omega m}{2m} = 5.17\Omega$$

-CALCULO DE LA CAPACITANCIA DE LA BARRA DE ATERRRAMIENTO (C):

$$C = \frac{\varepsilon_{r} \cdot l}{18 \cdot \ln(\frac{4l}{d})} \cdot 10^{-9}$$
(39)  
$$C = \frac{9 \cdot 2m}{18 \cdot \ln(\frac{4 \cdot 2m}{0.012m})} \cdot 10^{-9} = 153.79 \, pf$$

- 42 -



# -CALCULO DE LA INDUCTANCIA DE LA BARRA DE ATERRAMIENTO (L):

$$L = 2l \cdot u \ln(\frac{4l}{d}) \cdot 10^{-7} H$$
(40)

$$L = 2 * (2m) \dots \ln(\frac{4 * 2m}{0.012m}) \cdot 10^{-7} = 2.6 \mu H$$

donde ? es resistividad del terreno (de 20 a 30 *Om*),  $\mu$  la permitividad de la barra (típicamente de valor  $\mu$ =1,00) y *er* la constante dieléctrica relativa del <u>suelo</u> (*er*=9 para terrenos típicos).

#### - SIMULACIONES

Agrupando todos los elementos descritos anteriormente, se logra establecer la configuración básica para una prueba de impulso. Ahora bien, una prioridad es lograr simular el circuito de prueba en condiciones de vacío ya que, como se mencionó anteriormente, al determinar los parámetros normalizados en esta situación se puede asegurar que la forma de onda cuando se incluye el objeto de prueba no sufre modificaciones sustanciales (para ciertos casos); A continuación se explican en detalle las simulaciones propuestas:

#### - MODELACIONES DEL CIRCUITO PARA LAS PRUEBAS DE IMPULSO EN VACIÓ.

A continuación un ejemplo de un circuito propuesto tanto en Pspice como en ATPDraw, para la simulación de pruebas de impulso en Pspice se ilustra en la **Figura 43** y se han considerado todos los cálculos y mediciones anteriormente descritas.





- 43 -





Figura 44. Medición de la tensión de impulso en vacío simulada en Pspice

A continuación se muestra el circuito realizado en ATPDraw, para la simulación del generador de impulso en vació el cual se muestra en la **Figura 44**.Para la simulación con el ATPDraw se utilizaron los mismos valores de la simulación con el Pspice.

La forma de onda de tensión resultante de la simulación en ATPDraw se muestra en la Figura 45.





Figura 45. Ejemplo del circuito de prueba realizada en ATPDraw



Figura 46. Onda de tensión obtenida luego de la simulación en ATPDraw

Luego de la simulación tanto en Pspice como el ATPDraw se puede observar como ambos <u>programas</u> muestran de manera aproximada como es la onda de impulso, hay que tomar en cuenta que las mismas realizaron en vació sin objeto de prueba.

- 45 -



Se puede notar en la tabla siguiente como a pesar de tener tanto para la simulación en Pspice como en ATPDraw los mismos elementos en el circuito e igual valor en los elementos, los valores de tiempo en el valor pico de tensión difiere 0,27&µseg. Se puede señalar que esta diferencia puede ser provocada por los <u>algoritmos</u>de iteración de los programas, sin embargo no influye en el resultado <u>final</u> de las pruebas por ser un valor muy pequeño.

	Simulación ATPDraw	Simulación Pspice
Frente	(1.83µs; -54.02V)	(2.10µs;-54.56V)
Cola	(39.10µs; -27,07V)	(39.10;-27.30V)

Tabla XIV. Valores de Frente y Cola Resultado de la	Simulación
---	------------

Es importante señalar que no se tomaron en cuenta las condiciones ambientales para el calculo de los valores de resistencia de frente y cola, solamente se calculo estos valores mediante las <u>ecuaciones</u> 14 y 15 y con una tensión de prueba de 100kV pico.

En la siguiente **figura 47**, se grafico las tres ondas es decir la onda de ambas simulaciones y una tomada de una prueba en vació del generador de impulso configurado con los mismos valores de la simulación.



Figura 48. Onda de tensión de la Simulación y Generador de Impulso (Vació)

En la <u>grafica</u> anterior se puede ver como existe una cierta aproximación entre la simulación y la prueba con el generador de impulso, es importante señalar que la desviación en la cola de la onda y el ruido en la cresta de la onda esta influenciada por las características y su <u>estado</u>actual de algunos elementos del equipo de prueba como son las resistencias y las etapas de generador de impulso.

Sin embargo se puede ver como la simulación independientemente de que esta sea realizada en Pspice o ATPDraw permite obtener una buena aproximación de las pruebas con el generador de impulso, a pesar de tener la tensión pico de la onda fuera de los rangos establecidos por la norma Std-4 IEEE, la cual señala que el tiempo donde ocurre la tensión pico a de estar entre (0,8&µs - 1,6&µs).



Igualmente el tiempo de cola el cual es el tiempo que transcurre hasta alcanzar el 50% del máximo valor pico su valor no esta entre (40&µs -60&µs), ya que el valor medido fue de -39,10&µs es decir 0.90&µs por debajo del valor mínimo señalado en la norma.

- SIMULACIÓN y aplicación de la prueba de impulso a un TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.

#### - SIMULACIÓN CON EL OBJETO DE PRUEBA.

Para comprobar la utilización de la simulación en las pruebas de impulso realizaremos la prueba a un transformador de tipo monofásico tipo distribución, siguiendo lo señalado por la norma venezolana COVENIN 3172 y Std-4 IEEE [19], [7].

El objetivo de esta prueba consiste en comprobar el aislamiento entre espiras del devanado bajo ensayo, entre este y los demás devanados y el tanque o cualquier otro elemento puesto a tierra cuando se le aplica una onda de choque. El transformador que utilizaremos para la simulación y su posterior comprobación mediante la utilización del generador de impulso tiene las siguientes características:

Tabla XV.Características de Diseño del Transformador de 25kva.

Capacidad Nominal	25 kVA
Tensión Alta Tensión	13800/23900Y(Voltios)
Tensión Baja Tensión	120/240 (Voltios)
Nivel de Aislamiento AT	125KBil
Nivel de Aislamiento BT	30KBil
Frecuencia	60Hz
Conductor de Alta Tensión	Alambre de Cobre (Ø 1.03mm)
Conductor de Baja Tensión	Foil de Aluminio (160*0.6mm)

Como nuestro objetivo no es comprobar el aislamiento del transformador ni mucho menos hacerle un análisis de acuerdo a su tipo de construcción, solo nos enfocaremos a comprobar las simulaciones y poder realizar la comprobación de las mismas con el objeto de prueba.

Primero se calcula los valores de capacitancía del objeto de prueba, tomando los espesores del diseño se tiene lo siguiente:

Tabla XVI. Espesores Bobina de 25kva -13800-120/240 V.

#### **CUADRO DE ESPESORES**

			CAB BT	CAB AT	1
	Espes. A1	Espes. A2	Espes. B1 (BT)	Espes. B2(AT)	Esp. med
BASE	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
BTI	12.7	12.7	16.1	16.1	13.9
BARR1	3.0	3.0	5.0	3.0	3.2
AT	27.5	27.5	37.3	39.3	31
BARR2	3.0	3.0	5.0	3.0	3.2
BTE	12.7	12.7	16.1	16.1	14.0
AISL EXT	0.8	0.8	2.3	0.8	0.8
TOTALES	61.8	61.8	83.8	80.4	

#### - CAPACITANCIA ENTRE BTI – AT.

Cálculo de las Áreas:



 $I_{\mu} = (Esp.Modio(Baso + BTI + Barr 1) = 2.0mm + 13.9mm + 3.2mm - 19.1mm$ 

$$O_L = (Esp. Medio(Base + BTI) = 2.0mm + 13.9mm = 15.9mm$$

A = 19.1mm + 15.9mm = 35mm

Espacio Entre la Bobina BTi-AT en (mm)

B = 3.2mm

Capacitancia BTi-AT

$$C_{k} = 1.06 * \frac{(35mm) * 160mm}{3.2} = 1855 pF$$

- CAPACITANCIA ENTRE AT- BTe

Cálculo de las Áreas:

$$I_H = (Esp.Medio(Base + BTI + Barr1 + AT) = 2.0mm + 13.9mm + 3.2mm + 31mm = 50.1mm$$

$$A = 50.1mm + 53.3mm = 103.4mm$$
  $O_L = I_H + (Esp.Medio(Barr 2) = 50.1mm + 3.2mm = 53.3mm$ 

Espacio Entre la Bobina BTI-AT en (mm)

$$B = 3.2mm$$

Capacitancia AT-BTi.

$$C_{k} = 1.06 * \frac{(103.4mm) * 160mm}{3.2} = 5480.2pF$$

Entonces la capacitancía total de la bobina es:

$$C_{kTatal} = 1855 pF + 5480.2 = 7335.2 pF$$

Este valor obtenido se suma al valor de la capacitancía del divisor de tensión para realizar los ajustes y cálculos necesarios para las pruebas de impulso 1.2/50 $\mu$ seg al transformador, este valor total es el que se conoce como  $C_2$ 

Este valor lo validamos con el equipo DOBLE dando como resultado lo siguiente:

Tabla XVII. Capacitancias Calculadas y Medidas

	Bti-AT (pF)	AT-BTe (pF)
Calculados	1855	5480.2
Medidos	2230	4580

- 48 -



# - CAPACITANCIA DEL GENERADOR DE IMPULSOS

Para la simulación del generador de impulso utilizaremos 2 etapas las cuales tienen cada una los siguientes valores nominales:  $0.25\mu$ F – 100kV, entonces a capacitancia de generador  $C_1$ 

$$C_1 = \frac{0.25\mu f}{2} = 0.125\mu F$$

# - CALCULO DE LA RESISTENCIA DE FRENTE, RESISTENCIA DE COLA Y RESISTENCIA DE AMORTIGUAMIENTO:

Utilizando las ecuaciones 15 y 16, tenemos lo siguiente:

#### -RESISTENCIA DE FRENTE:

Para un tiempo 
$$T_1 = 1.2 \,\mu seg C_2 = 7335.2 \,pF + 3000 \,pF = 10335.2 \,pF_y C_1 = 0.125 \,\mu F_{entonces}$$

$$R_1 = 1.2useg * \frac{0.125uF + 10335.2pF}{0.125uF * 10335.2pF} * \frac{1}{3} = 41.48\Omega$$

- RESISTENCIA DE COLA:

Para un tiempo  $T_2 = 50 \mu seg C_2 = 10335.2 pF_y C_1 = 0.125 \mu F_{entonces:}$ 

$$R_2 = 41.48\Omega$$

- RESISTENCIA DE AMORTIGUAMIENTO:

$$R_2 = 50 useg * \frac{1}{0.7} * \frac{1}{0.125 uF + 10335.2 pF} - 41.48 \Omega = 483.14 \Omega$$

Los valores de resistencia de frente, cola y amortiguamiento que se calcularon anteriormente son los valores que utilizan para la simulación en Pspice y ATPDraw, así como también para la configuración del generador de impulso para la prueba con el transformador.

# CONCLUSIÓN

Luego de realizar las diferentes investigacionesque incluyeron revisiones de temas relacionados a las pruebas de impulso y libros de ingeniería de alta tensión, se pudo crear un circuito tanto en Pspice como en ATPDraw que permite simular y representar de forma aproximada el generador de impulsos .

Además de poder simular pruebas en el generador de impulsos, también se pudo estimar de manera teórica y practica la representación de un transformador monofásico, además de esto poder calcular la capacitancia del transformador y de esta manera tener con mas certeza los valores, que permiten simular y realizar las pruebas de impulso a los transformadores.

Por existir fallas en el trigatron no se pudieron realizar pruebas de onda cortada, igualmente por no tener un osciloscopio con suficientes canales disponibles no se pudo capturar la onda de corriente, sin embargo es



importante señalar que este trabajo no pretendía conocer las condiciones de aislamiento del transformador utilizado en la prueba.

La utilización del Pspice y ATPDraw en la simulación permitió conocer el funcionamiento del equipo bajo dos modelos circuitales diferentes desde el punto de vista de la colocación o diagramación de los elementos para la simulación, sin embargo el ATPDraw es mas sencillo de programar y permite manipular el archivofuente del mismo así como también al momento de surgir algún error este programa señala donde esta ocurriendo el mismo.

\_\_\_\_\_

#### TEXTO APROBADO Y APTO PARA DIFUSION Y ENSEÑANZA 2009 - INDUCOR UTNLAT

PREPARADO POR:

CORREGIDO POR: