



Experiencia en las mediciones de los parámetros eléctricos de una doble terna de 220 kV. Parte I. Metodología para la implementación de la medición. Definición de los ensayos.

María Beatriz Barbieri
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Raúl Álvarez
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Leonardo Catalano
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Miguel D. del Pozo
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Julián Duffard
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Jorge Agüero
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Gabriel R. Burgos
ISOLUX Ing. –IECSA UTE
Argentina

RESUMEN

Una vez que el proceso de construcción de una nueva línea de transmisión ha concluido, resulta fundamental la determinación de los parámetros eléctricos con el fin de obtener modelos adecuados que representen a la línea, para los diversos estudios que lo requieran (flujo de carga, cortocircuitos, coordinación de protecciones, etc.).

En el presente trabajo, se desarrolla una metodología para la determinación de los parámetros eléctricos de una línea compacta de 220 kV en doble terna. Para el caso en particular, se planteó la problemática que al momento de la disponibilidad de la línea para las mediciones, aún no estaba definida la secuencia de energización relativa entre ambas ternas. A su vez, dicha línea ha sido planificada para que en determinados casos funcione una sola terna; con la otra de las ternas puesta a tierra en ambos extremos.

Estas condiciones diversas llevaron a la necesidad de aplicar una técnica de medición que permitiera establecer los parámetros por unidad de longitud de la matriz longitudinal de impedancia Z y la matriz transversal de admitancia Y , en lugar de medir parámetros de secuencia. De esta forma, las matrices obtenidas permiten identificar cualquier conjunto de parámetros de secuencia, para las distintas posibilidades de conexión.

A partir de esta definición se establecieron los requerimientos de equipamiento, tipo de conexiones a realizar y mediciones necesarias a fin de obtener los términos de las matrices Z e Y .

Con el objeto de evaluar el impacto de las variables desconocidas (resistividad de terreno, variaciones de altura de conductores, resistencia de hilo de guarda, etc.), en la definición de las mediciones a realizar, se efectuaron análisis de sensibilidad de los parámetros a dichas variables.

PALABRAS-CLAVE

“Parámetros” - “Secuencia” - “Impedancia” - “Admitancia” - “Modelo” - “Ensayos” - “Línea compacta” - “Doble terna” - “Simulaciones” - “Medición”

1. INTRODUCCIÓN

Se construye una línea aérea en doble terna de 220 kV, que interconecta dos Estaciones Eléctricas (ET) ubicadas entre sí aproximadamente a 25 km (Ensenada de Barragán; ETEB y Hudson; ETH) y para su entrada en servicio al sistema, se debe verificar el estado dieléctrico y determinar parámetros característicos de la misma mediante mediciones. Es de hacer notar que estas pruebas corresponden al paso inmediato posterior de haber sido terminado el montaje de la línea.

Este trabajo es la primera parte de un trabajo que presenta la experiencia en los ensayos y mediciones de los parámetros eléctricos de una doble terna de 220 kV. En los primeros puntos se indican los ensayos realizados a la línea en campo como la verificación de continuidad e identificación de las fases, verificación del aislamiento de las fases, ensayos de tensión resistida con tensión continua; medición de resistencia óhmica con corriente continua. En el último punto se plantea la metodología para la medición de los parámetros eléctricos de la doble terna. Se decide determinar los parámetros de la matriz de impedancia longitudinal Z y la matriz de admitancia transversal Y [1- 3], de modo de poder caracterizar y simular por completo cualquier situación que se presente ante distintas posibilidades de energización de la línea. En esta parte se hacen cálculos mediante el programa ATP (Alternative Transient Program) a fin de estimar los parámetros, y de este modo determinar las necesidades de la fuente de excitación y el equipamiento necesario para realizar las mediciones. En la parte II del trabajo se procede a describir las mediciones y usar los valores resultantes en las matrices a fin de obtener por cálculo, los parámetros de secuencia directa y homopolar como es habitual en las líneas de transmisión para su posterior análisis y estudios de flujos de potencia, cortocircuitos, ajuste de protecciones etc .

2. CARACTERÍSTICA DE LA LÍNEA

La línea objeto de los ensayos y mediciones consiste en una doble terna desarrollada en configuración compacta, del tipo coplanar vertical y haz conformado por dos subconductores. La distancia total aproximada de la traza es de 25 km (25245 m) y se encuentra conformada por 215 piquetes, de los cuales 13 corresponden a vértices (retenciones). Así, la línea comienza en el piquete 00 en la ETEB y culmina en el piquete N° 214 en la ETH. En la Fig. 1 se presenta un esquema de la estructura típica de la línea. Teniendo en cuenta que la línea está desarrollada en la topología de doble terna, durante su funcionamiento pueden darse diferentes condiciones de operación; como por ejemplo: a) Una terna energizada (T1), y la otra (T2) fuera de servicio y puesta a tierra. Ídem anterior pero con la otra terna energizada (T2) y la restante (T1) fuera de servicio y puesta a tierra, y la tercera alternativa las dos ternas energizadas (paralelo). Bajo estas condiciones las impedancias y admitancias de secuencia que modelan las líneas dependerán de las condiciones de operación.

En la Tabla I se indica la ubicación relativa de los conductores, considerando eje de abscisa (x) a la torre, y ordenadas (y) altura respecto del terreno, las geometrías y resistividades de los mismos. Los datos de las resistividades de los cables de guarda han sido estimados a partir de datos de otros cables de guarda similares, pues al momento de hacer las mediciones no se disponía de estos datos.

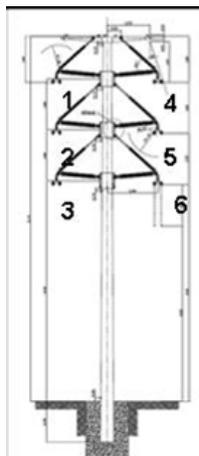


Tabla I –Ubicación relativa de los conductores, y geometría

Conductores	Radio in m	Radio ext rout m	Resistencia Cada conductor Ohm/km	Pos. Horizontal (x) Horiz m	Altura en Torre (y) Vtower m	Altura en el Vano (y) Vmid m	Haz Separ cm
1	0.4	1.22	0.0949	2.96	18.5	16.1	40
2	0.4	1.22	0.0949	2.96	15.55	13.15	40
3	0.4	1.22	0.0949	2.96	12.6	10.2	40
4	0.4	1.22	0.0949	-2.96	18.5	16.1	40
5	0.4	1.22	0.0949	-2.96	15.55	13.15	40
6	0.4	1.22	0.0949	-2.96	12.6	10.2	40
Guarda 1	0.4	0.825	0.29	2.5	21.15	20	0
Guarda 2	0.3	0.525	1.00	-2.5	21.15	20	0

Fig. 1 - Esquema de la estructura típica

3. ENSAYOS Y MEDICIONES

Ensayos de verificación de continuidad e identificación de las fases

El objeto de este ensayo es verificar que cada conductor de fase tenga continuidad galvánica entre ambas Estaciones Transformadoras (ETEB y ETH).

Para ello, se aplicó una tensión continua de 500 Vcc en el extremo de cada fase de la línea desde ETEB, y se puso a tierra el extremo opuesto (por medio de una pértiga) estando las restantes fases “flotando” ver **Fig. 2**. De esta forma se verificó la continuidad de los conductores, con una identificación definida de cada fase en la ETEB (Barragán), mostrada en la **Fig 3**. Para estas pruebas se empleó un megóhmetro.

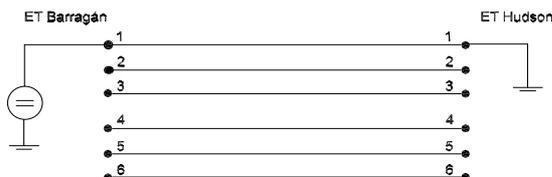


Fig. 2 - Ensayos de continuidad e identificación de fases

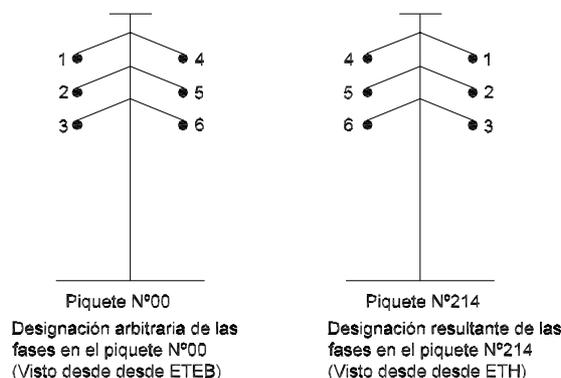


Fig. 3 - Identificación relativa de fases

Ensayos de verificación del aislamiento de las fases

El objeto de este ensayo fue el de verificar el aislamiento de cada fase, estando las fases restantes puestas a tierra, ver **Fig. 4**.

Para ello se aplicó la tensión continua de 5 kVcc durante 10 minutos y se registraron los valores de resistencia de aislamiento para diferentes instantes del tiempo de aplicación.

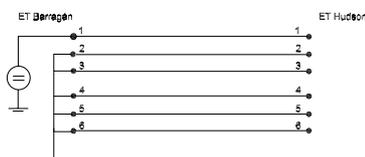


Fig. 4 - Configuración de ensayo de resistencia de aislamiento

Para estos ensayos se empleó un megóhmetro.

Ensayos de tensión resistida con tensión continua

El objeto de este ensayo fue el de verificar el aislamiento con alta tensión de cada fase respecto a tierra con las restantes fases puestas a tierra ver **Fig. 5**.

Para ello se aplicó una tensión continua de aproximadamente 50 kVcc durante 15 minutos y se registraron los valores de la corriente derivada.

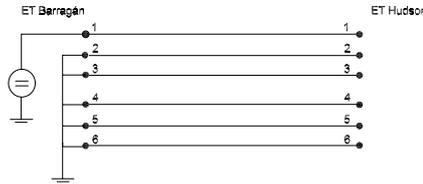


Fig. 5- Configuración de ensayo de tensión resistida aplicada con tensión continua

Para la realización de estos ensayos se empleó una fuente, de modo tal de tener una incertidumbre en la tensión aplicada del 1 %.

Medición de Resistencia óhmica con corriente continua

El objetivo de estas mediciones fue el de determinar la resistencia de corriente continua de los conductores de cada fase.

La medición se realizó en dos fases a la vez, es decir realizando cortocircuitos en la ETH y midiendo desde la ETEB. Consecuentemente las combinaciones de resistencias medidas fueron:

$$R_{12}=R_1+R_2,; \quad R_{13}=R_1+R_3,; \quad R_{23}=R_2+R_3$$

y por otro lado: $R_{45}=R_4+R_5,; \quad R_{46}=R_4+R_6,; \quad R_{56}=R_5+R_6$

En la Fig. 6 se presenta el esquema de medición para el caso de la medición de las fases 1-2.

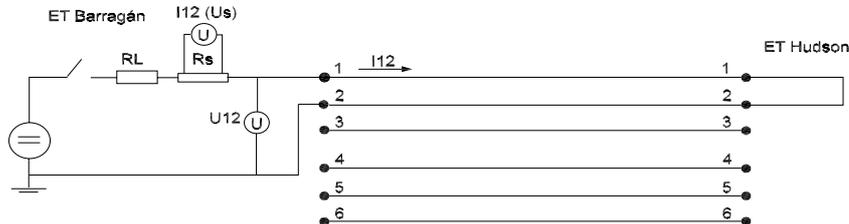


Fig. 6 - Configuración de ensayo para la medición de la resistencia con corriente continua

La aplicación de tensión a cada par de fases, se realizó con una fuente de 6 Vcc, en serie con una resistencia limitadora de 60 mΩ (RL), y en serie con un shunt (Rs) de 5 A/60 mV. Midiendo la tensión sobre Rs se determinó la corriente que circuló en cada caso. Las tensiones se midieron con dos multímetros marca Fluke. Durante las pruebas, la temperatura promedio medida en la ETEB fue de 34 °C (t_{prom}). De esta forma, los valores de resistencia de cada una de las fases, se calcularon como:

$$R_1 = \frac{1}{2} [R_{12} + R_{13} - R_{23}] \qquad R_2 = \frac{1}{2} [R_{12} + R_{23} - R_{13}]$$

$$R_3 = \frac{1}{2} [R_{13} + R_{23} - R_{12}] \qquad R_4 = \frac{1}{2} [R_{45} + R_{46} - R_{56}]$$

$$R_5 = \frac{1}{2} [R_{45} + R_{56} - R_{46}] \qquad R_6 = \frac{1}{2} [R_{46} + R_{56} - R_{45}]$$

A partir de los valores medidos, los valores calculados a 20 grados resultan: $R_1=1,23\Omega$; $R_2=1,22\Omega$; $R_3=1,22\Omega$; $R_4=1,23\Omega$; $R_5=1,23\Omega$; $R_6=1,24\Omega$;

El valor teórico esperado de esta medición, de acuerdo a las características de los conductores de fases y la longitud de la línea es $1,20 \Omega$ ($R=0.0475 \Omega/\text{km} \cdot 25,245\text{km}$, corresponde a 2 conductores por fase de $0,0949 \Omega/\text{km}$), el error es del 2%.

4. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA LÍNEA.

Como se indica en la introducción se pretende determinar los parámetros de la matriz de impedancia longitudinal \mathbf{Z} y la matriz de admitancia transversal \mathbf{Y} , de modo de poder caracterizar por completo cualquier situación de energización que se presente. En esta Parte I se indican los cálculos realizados previamente a las mediciones de los parámetros de la línea, de modo de definir el equipamiento necesario para realizar los ensayos de campo.

La línea está construida con 6 conductores de fases y dos cables de guarda, estos últimos se hayan puestos a tierra en cada una de las torres, con lo cual el orden de las matrices \mathbf{Z} e \mathbf{Y} puede reducirse de 8 a 6 [1].

Matriz \mathbf{Y}

Todos los cuerpos conductores suspendidos en el espacio establecen una capacitancia entre sí, los de una línea de transmisión no son una excepción, y las capacidades entre las fases y tierra son parte de este sistema. [1,3].

Como resultado, aparecen corrientes entre conductores y tierra y entre conductores de cada fase durante la operación.

Las capacitancias de la línea pueden ser calculadas por kilómetro recorrido mediante una solución electrostática de las ecuaciones de campo, teniendo en cuenta la sección del cable. El resultado de este cálculo es una matriz de admitancia en derivación

La derivaciones de corrientes se indica en la **Fig. 7**, para una línea de 3 conductores.

La ecuación 1 muestra la relación tensión a corriente después de calcular a la frecuencia correspondiente cada elemento de admitancia para un sistema de 6 conductores (doble terna).

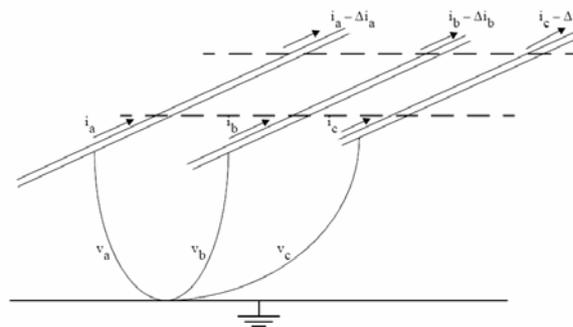


Fig. 7 – Corriente capacitiva de una línea

Dado que las pérdidas en el aire son despreciables, la resistencias de fuga de línea entre conductores son esencialmente infinitas, resultando la corriente en derivación es puramente capacitiva, o sea $Y_{ij}=j\omega \cdot C_{ij}$. Los elementos de la matriz de admitancia en derivación son por lo tanto directamente proporcionales a la frecuencia.

En el caso que nos ocupa, para poder medir cada uno de estas admitancias (capacidades), en el caso de la línea que nos ocupa se debe excitar cada conductor con una fuente de tensión (50 Hz) conectada entre el mismo y la tierra, poniendo el resto de los conductores a tierra en el extremo de excitación mientras que el otro extremo de la línea se deja abierto. Así se obtienen los valores para la longitud total de la línea y como la línea es corta estos parámetros divididos por la longitud dan los valores por unidad de longitud.

$$\begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \Delta I_3 \\ \Delta I_4 \\ \Delta I_5 \\ \Delta I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Por ejemplo para determinar los parámetros de la primera columna de la matriz se debe aplicar tensión en el conductor 1, y medir las corrientes a tierra de los otros conductores:

$$Y_{11} = \frac{I_1}{U_1} \Big|_{U_2=U_3=U_4=U_5=U_6=0}$$

Matriz Z

Dada una sección transversal de la línea se puede calcular el flujo vinculando entre cada conductor cuando se hace circular una corriente. Este cálculo se basa en la solución de las ecuaciones de Maxwell para el campo magnético que rodea un conductor de gran longitud portador de corriente [1 - 4]. El cálculo de flujo de enlace da como resultado una matriz de impedancia en serie, expresada en ohmios / kilómetro. Estas impedancias determinan la caída de tensión a lo largo de una sección de línea, como se muestra en **Fig 8**. Para poder medir cada una de estas impedancias se debe excitar cada conductor con una fuente de tensión aplicada entre dicho conductor y la tierra, poniendo todos los conductores en el otro extremo a tierra, mientras que en el extremo de excitación los otros conductores se dejan abiertos. Como la línea es corta estos parámetros divididos por la longitud real de la línea dan los valores por unidad de longitud.

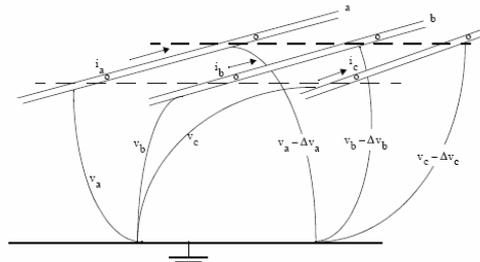


Fig. 8 – Caídas de tensión en una sección de una línea de tres conductores.

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \\ \Delta U_4 \\ \Delta U_5 \\ \Delta U_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

En el caso la Z_{11} está dada por:

$$Z_{11} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{I_2=I_3=I_4=I_5=I_6=0}$$

Equipamiento Disponible para realización de Ensayos de Campo.

Para poder evaluar el equipamiento necesario para realizar las mediciones en campo, tanto de las admitancias como de las impedancias, se hicieron cálculos de los parámetros de la línea usando el programa ATP, de modo de determinar las corrientes y tensiones que debían medirse y aplicarse. Se dispone como equipamiento de excitación de un transformador convencional bifásico de 300 kVA, relación 0,25/20 kV. También se dispone de reactores en baja tensión para compensación de la corriente capacitiva. En la **Fig. 9** se indica el circuito de inyección para medir la capacidad o matriz **Y**, y en la **Fig. 10** se indica el circuito de inyección para medir la **Z**.

Determinación del los valores de Tensión y Corrientes

A partir de la geometría de la línea y considerando distintos valores de resistividad del terreno, flechas de los conductores, resistencia de los cables de guarda etc. se calcula con el ATP la matriz **Z** y la matriz **Y** de la línea con objeto de poseer una estimación de los valores esperados como resultados de las mediciones. A modo de ejemplo se indican en la Tabla I los valores obtenidos por cálculo para los datos de la línea, considerando dos resistividades de terreno: en las Tablas IIa y IIb se muestran los resultados para el caso de 3 Ω .m, y en la Tabla III se indica lo propio para una resistividad de 100 Ω .m, los valores de capacidad no dependen de este parámetro, solo se indican en la Tabla IIa.

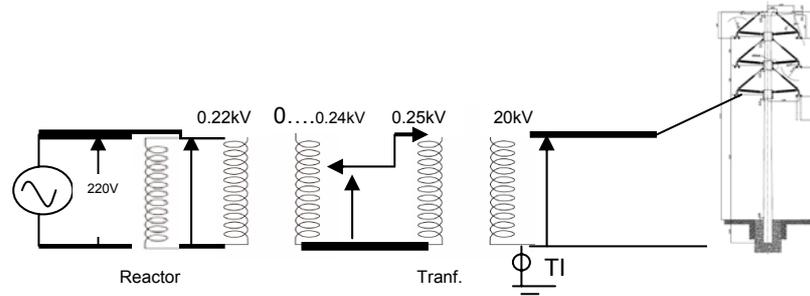


Fig. 9 – Excitación para medir la Capacidad.

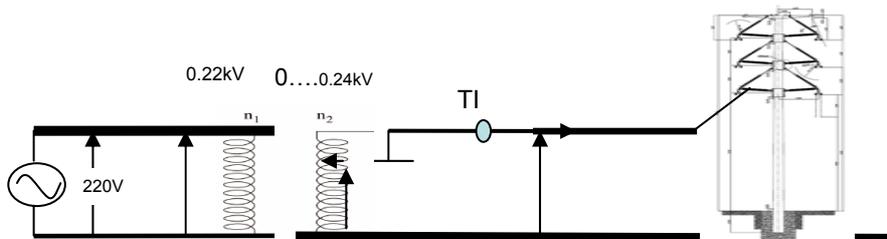


Fig. 10 – Excitación para medir la impedancia serie, matriz Z.

Tabla IIa. Matriz de Capacidades

C F/km	1	2	3	4	5	6
1	1.20E-08					
2	-2.96E-09	1.24E-08				
3	-1.03E-09	-3.01E-09	1.18E-08			
4	-1.18E-09	-7.97E-10	-4.75E-10	1.20E-08		
5	-7.95E-10	-9.49E-10	-8.24E-10	-2.97E-09	1.24E-08	
6	-4.74E-10	-8.24E-10	-1.29E-09	-1.03E-09	-3.01E-09	1.18E-08

Tabla IIb. Matriz de Impedancia Z (+jX), Para Resistividad del terreno 3 Ohm.m

R Ohm/km	1	2	3	4	5	6
1	1.08E-01					
2	5.60E-02	1.01E-01				
3	5.32E-02	5.10E-02	9.71E-02			
4	6.18E-02	5.83E-02	5.56E-02	1.13E-01		
5	5.59E-02	5.33E-02	5.13E-02	5.78E-02	1.02E-01	
6	5.31E-02	5.11E-02	4.95E-02	5.48E-02	5.19E-02	9.77E-02

X Ohm/km	1	2	3	4	5	6
1	3.99E-01					
2	1.70E-01	4.23E-01				
3	1.35E-01	1.88E-01	4.36E-01			
4	1.22E-01	1.26E-01	1.19E-01	4.13E-01		
5	1.18E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.75E-01	4.25E-01	
6	1.15E-01	1.39E-01	1.52E-01	1.42E-01	1.92E-01	4.39E-01

Tabla III. Matriz de Impedancia Z (+jX), Para Resistividad del terreno 100 Ohm.m

R Ohm/km	1	2	3	4	5	6
1	1.27E-01					
2	7.49E-02	1.19E-01				
3	7.17E-02	6.85E-02	1.14E-01			
4	7.97E-02	7.60E-02	7.31E-02	1.31E-01		
5	7.50E-02	7.17E-02	6.91E-02	7.75E-02	1.21E-01	
6	7.17E-02	6.87E-02	6.64E-02	7.39E-02	6.97E-02	1.15E-01
X Ohm/km	1	2	3	4	5	6
1	4.25E-01					
2	2.00E-01	4.57E-01				
3	1.67E-01	2.24E-01	4.75E-01			
4	1.50E-01	1.58E-01	1.54E-01	4.43E-01		
5	1.54E-01	1.75E-01	1.78E-01	2.12E-01	4.64E-01	
6	1.48E-01	1.76E-01	1.92E-01	1.77E-01	2.30E-01	4.79E-01

Con los valores calculados de capacidades y considerando una longitud de la línea del orden de 25 km, se estiman los valores de tensiones a aplicar y a medir y corrientes a medir, esto se hace para las alternativas planteadas.

Para el caso de la medición de capacidad (admitancia), aplicando una tensión del orden de 19 kV entre cada fase y tierra con las otras fases puestas a tierra en el extremo de excitación y el otro extremo abierto, se obtiene una corriente en la propia fase del orden de 1,8 A, y en las otras fases de 500 mA a 70 mA ver **Fig. 9**. El valor de la corriente en el bobinado de BT del transformador es del orden de 150 A, merced a un reactor, esta corriente se compensa, llevando la corriente de BT a valores del orden de 10 A.

En campo se verificó que los valores resultantes del acoplamiento entre la fase excitada y las restantes sean mucho menores que los valores estimados en los cálculos (menor valor calculado: 70 mA).

Para la medición de la impedancia serie **Fig 10**, si se quiere una corriente en la línea del orden de 5 A, para usar puntas de corriente disponibles, la tensión a aplicar entre cada fase y tierra es del orden de 50 a 60 V, y las tensiones a medir en las fases acopladas es del orden de 14 a 26V dependiendo de la resistividad del terreno y las fases correspondientes. Los resultados obtenidos considerando otras variantes de los datos de la línea arrojaron valores de corriente y tensión del orden de los indicados en este punto.

5. CONCLUSIONES

En esta presentación (Parte I) se muestran los distintos ensayos/mediciones que se realizaron sobre una línea de transmisión doble terna y se plantea un método para determinar los parámetros característicos de la línea. Se hace un modelo de la línea mediante el ATP de modo de estimar las corrientes y tensiones que se esperan medir. Este método de medición tiene la ventaja de poder determinar los parámetros de la línea utilizando una fuente de excitación monofásica, un transformador de corriente, un amperímetro, un transformador de tensión y un voltímetro. Una vez obtenida mediante las mediciones las matrices **Z** e **Y** de la línea, se puede determinar los valores de secuencia en cualquier situación de energización que se presente en la operación de la línea, esta actividad se presenta en la Parte II de este trabajo.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L.V. Bewley “*Travelling waves on transmission System*”. Second edition Dover publication Inc. New York 1963
- [2] Edited by Juan A. Martinez-Velasco “*Power System Transients. Parameter Determination*”. CRC Press Taylor & Francis Group. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300. Boca Raton, FL 33487-2742. © 2010 by Taylor and Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business.
- [3] *EMTP/ATP . Theory Book*.
- [4] *Program Application Guide PSS/E V30*



**Décimo Quinto Encuentro Regional
Ibero-americano del CIGRÉ**
Foz de Iguazú-PR, Brasil
19 al 23 de mayo de 2013



[5]Rubens Dario Fuchs “*Transmissao de Energia Elétrica. Linhas Aéreas*”.2da edicao