



Anteproyecto de fuente de alta energía para pruebas a interruptores y grandes transformadores

Orestes Hernández
José G. Sánchez
Gualfrido Hernández

Agosto del 2001

Resumen / Abstract

Debido a que la potencia posible de obtener en los laboratorios del Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas resulta insuficiente para alcanzar la realización de ensayos (de alta corriente y energía) por métodos directos a los transformadores y desconectivos en general, de alta potencia y tensión, se hace necesario la proyección y futura construcción de un esquema de pruebas para estos fines. Son varios los métodos conocidos, por lo que se impone revisar las características peculiares de cada uno, ventajas y desventajas y llegar a la selección y proyecto del idóneo para estas condiciones. El propósito del presente trabajo es, por lo tanto, ofrecer el resultado de un análisis cualitativo de los métodos de pruebas posibles a utilizar y realizar el proyecto eléctrico general de la variante escogida.

Palabras clave: alta tensión, pruebas electricas, proyecto de laboratorio

Because of power source in Electroenergetical Test Researches Center is not enough for the high current and power tests in high tension transformers and breakers, in general by direct methods, is necessary to proyect and develop a lab lay out for these tests. There are several known methods, then must be revised every one and choice the proper for our conditions. The objective of this paper is offer the result of a cualitative analysis of the possible test methods to use and present the general electric project of the choiced variant.

Key words: high voltage, electrical test, laboratory layout

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las redes eléctricas de alta tensión ha influido no solo en las formas de configuración y operación de los sistemas, sino también, sobre sus diferentes componentes y en su particular modo de fabricación.

El diseño de los distintos equipos de alta tensión es necesariamente desarrollado con la ayuda básica de laboratorios de pruebas, en el caso específico de transformadores y desconectivos de potencia estos laboratorios son esenciales.

En los últimos 50 años las tensiones de transmisión en el mundo se han elevado a 765 kV y ya se están experimentando con 1000 kV.

Las capacidades interruptivas requeridas se han elevado hasta 5 GVA y para los próximos 25 años es posible que se llegue a 1 500 kV y 100 GVA. En lo que respecta a las redes nacionales otra es la situación debido a los problemas económicos que enfrenta el país, pero no obstante, es necesario contar con un laboratorio capaz de realizar pruebas especiales de alta energía tanto para las transformadores, desconectivos y equipos en general que lo necesiten, como para brindar a empresas foráneas que lo requieran este mismo servicio.

CONCEPCIÓN GENERAL DE UN LABORATORIO DE ALTA POTENCIA

Generalidades

Los laboratorios de alta potencia están destinados para realizar las pruebas de alta energía sobre los equipos

que constituyen las redes de alta tensión, es decir, interruptores, transformadores de potencia y de corriente, fusibles de potencia, cuchillas, reguladores de tensión, reactores, trampas de ondas, cadenas de aisladores, separadores de líneas de transmisión, subestaciones blindadas, pararrayos, etcétera.

También se puede utilizar para realizar pruebas de carga y calentamiento a grandes máquinas eléctricas en general.

Durante estos ensayos se conjugan generalmente altos valores de corriente y tensión que dan como resultado una potencia necesaria alta para verificar la prueba, principalmente cuando se trata de transformadores de potencia por su impedancia y de interruptores de potencia por su capacidad interruptiva. Por lo anterior, el problema fundamental de un laboratorio de este tipo, lo constituye la fuente de gran potencia que se requiere. La fuente puede ser:

- Generadores especiales para estos fines.
- Red de potencia.

Los generadores especiales ofrecen mayor flexibilidad e independencia en la operación del laboratorio, sin embargo, resultan muy costosos y su construcción y operación son más complicados.

La red de potencia es la fuente más económica, sin embargo, ofrece el inconveniente de las restricciones que impone la propia operación del sistema fundamentalmente por las caídas por cortocircuitos, los riesgos de pérdidas de estabilidad y posibles daños que puedan llegar a causarse a los generadores de las plantas del sistema.

Las pruebas de cortocircuito producen caídas de tensión en la red, que pueden resultar inaceptables para ciertos usuarios, principalmente algunos sistemas de utilización basándose en computadoras o sistemas de control y regulación sensibles a interferencias transitorias.

Estas circunstancias hacen que la solución de utilizar la red, sea aceptable, a pesar de los riesgos e incomodidades que esto origina. La prueba de cortocircuito en la mayoría de los equipos, con excepción de los interruptores, es usual realizarla por métodos directos, es decir, una sola fuente proporciona la corriente y la tensión requerida para la prueba. En el caso de los interruptores de alta tensión, debido a la imposibilidad en muchos casos de alcanzar en forma directa la prueba necesaria, se recurre a

métodos indirectos sintéticos¹ en los cuales se adiciona a la fuente de potencia convencional otra fuente de alta tensión de poca potencia que se hace intervenir como se verá más adelante.

Para el caso de pruebas de calentamiento y cargabilidad en transformadores existen dos métodos esenciales:

- Prueba con carga real.
- Prueba con carga simulada.

El método de carga real es el más exacto de todos los métodos, pero los requerimientos de energía son excesivos para transformadores grandes.

Los transformadores pequeños pueden ser probados en condiciones de carga real, cargándolos con reóstatos, bancos de lámparas, cajas de agua, etcétera.

Dentro del método de carga simulada se encuentran:

a) El método de cortocircuito, en el cual se producen las pérdidas totales por el efecto de la corriente de cortocircuito.

b) El método de oposición, en el cual el voltaje y la corriente nominal son inducidos en el transformador de prueba. Para esto se requiere una fuente para el voltaje, que sustituirá las pérdidas de vacío y otra fuente para la corriente que suplirá las pérdidas de carga.

Este método tiene la ventaja sobre el de cortocircuito en que las mediciones de temperatura se hacen diferentes y sin necesidad de hacer correcciones a diferencias del otro método donde es necesario tomar primero una medición de la temperatura del aceite para pérdidas totales, a continuación reducir la corriente de cortocircuito a la de carga, y después de una hora, medir la temperatura en los devanados. Finalmente, es necesario hacer determinadas correcciones.²

No obstante, la mayor complejidad que presenta para las mediciones el método de cortocircuito, este tiene la ventaja de necesitar solamente una sola fuente de energía con menor voltaje de trabajo (algo más que la caída en la impedancia del transformador) lo que hace que en grandes unidades este factor sea decisivo para su elección.

De todo este análisis se puede concluir que el laboratorio a proyectar debe tomar la energía de alimentación para los ensayos, de la red o sistema, directamente a través de un transformador que permita

un amplio margen de variación de voltaje y capaz de soportar mecánicamente cortocircuitos súbitos repetidos de corta duración.

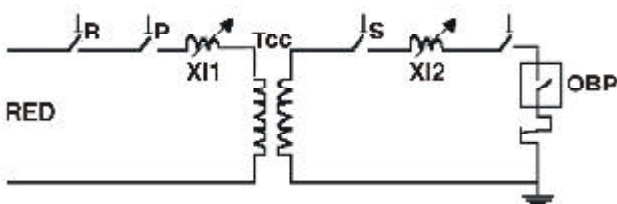
Descripción del circuito para pruebas sintéticas

Los requisitos básicos que debe satisfacer un interruptor, son aquellos a los que lo somete la red en la cual deberá trabajar. Es por ello que los primeros ensayos que se efectuaban fueron los ensayos de campo, sin embargo, al surgir la necesidad de contar con instalaciones que permitiesen reproducir y controlar dentro de ciertos límites, los parámetros que están en juego durante la interrupción, se tuvo que recurrir a las pruebas directas de laboratorio. Una prueba directa es aquella en la cual tanto la corriente de falla como la tensión transitoria de restablecimiento se obtienen de un mismo circuito.

Con el crecimiento de los sistemas eléctricos, se alcanzarán niveles de potencia de prueba muy elevados, difíciles de obtener aún en los grandes laboratorios del mundo. Es por ello que surgió la idea de realizar ensayos sintéticos que permitiesen probar los interruptores de muy alta tensión. En esencia, como ya se dijo, un ensayo sintético es aquel en que se utilizan dos circuitos diferentes, perfectamente sincronizados entre sí, uno de los cuales proporciona la corriente de falla (circuito de corriente) y el otro que produce la tensión transitoria de restablecimiento (circuito de tensión), obteniéndose con ello, una ganancia en la potencia de la prueba.

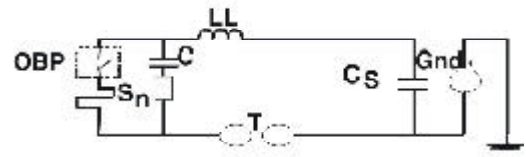
Existen varios métodos de pruebas sintéticos, pero solo se analiza el método de inyección de corriente en paralelo, el que produce de una manera más fiel, los efectos que originan las pruebas directas y por esto es el más ampliamente utilizado a nivel mundial.³

Una concepción particular de un circuito sintético es el que se presenta en la figuras 1 y 2, las que por separado muestran, los circuitos de corriente y de tensión respectivamente.



Circuito de corriente.

1



Circuito de tensión.

2

Su conjunto podría ser el circuito sintético a construir en el Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergética, según se muestra en la figura 3.

Este circuito permitirá probar interruptores hasta 34,5 kV nominales y 16 kA de corriente de cortocircuito.

En estas figuras:

A: Fuente de potencia.

Ipo C: Interruptor trifásico de 34,5 kV que alimenta el circuito de prueba.

Ir o B: Interruptor trifásico de respaldo a *Ip o C.*

T_p : Transformador trifásico de prueba de 1 MVA.

Conexión estrella aterrada por el primario y 34,5 kV.

Secundario de voltaje variable de 3 -13,5 kV.

Proporciona una corriente máxima de 16 kA a 3 kV,
durante 0,5 s.

Is o D: Interruptor trifásico de sincronización, 13,8 kV nominales, 2 kA nominales y 25 kA de capacidad interruptiva.

Este tiene doble función; protege a *TP* de un cortocircuito y sirve como sincronizador para el inicio de la prueba.

XL1: Banco de reactores limitadores de la corriente de cortocircuito. Puede constituirse por varias inductancia conectadas en serie para garantizar un amplio rango de valores que va desde 0,170 mH hasta 21mH y cubrir así un intervalo de corriente desde 200 A hasta 16 kA.

Esquema de circuito sintético.

3

C_1, C_2, C_3 y C_4 : Cuchillas.

I o F : Interruptor trifásico auxiliar de idénticas características que I_s .

Su función principal es la de separar al interruptor prueba del circuito de corriente en un ensayo sintético.

OBP: Objeto a prueba.

Sh: *Shunt*, derivador de corriente, tipo resistivo, no inductivo.

Ch: Banco principal de capacitores.

Lh: Inductancia reguladora de la corriente de inyección I_h .

C y **R**: Elementos reguladores de la tensión transitoria de restablecimiento.

T: Trigatrón.

GCd: Generador de corriente directa, para cargar el banco principal de capacitores **Ch**.

H: Circuito de tensión.

Sincronización de eventos

La sincronización de un ensayo sintético es un hecho que requiere de un profundo conocimiento del comportamiento específico de cada equipo.³ Por ejemplo, puede ser indispensable conocer el tiempo de operación de apertura del interruptor auxiliar I_a y para ello será imprescindible la aplicación de un estudio estadístico riguroso, en condiciones bien determinadas, con lo cual podrá obtenerse no solamente el tiempo promedio de operación del equipo, sino también la dispersión del mismo y con ello podrá decidirse si el interruptor puede ser utilizado con una completa garantía en la ejecución del ensayo.

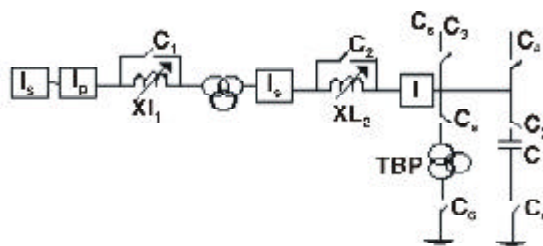
En el esquema escogido, la sincronización entre el circuito de corriente y el circuito de tensión se realiza por medio de un trigatrón.¹¹

El trigatrón, a su vez, es controlado por un circuito de control del disparo, que selecciona el punto de cortocircuito donde deberá dispararse el trigatrón, descargando el banco principal de capacitores **Ch** y generando así la corriente de inyección. Por último, el circuito anterior también es controlado por un circuito sincronizador el cual debe controlar todos los eventos que se requieren en la ejecución del ensayo.

El circuito sincronizador ordena a cada equipo especificado la ejecución de un evento y el conjunto de eventos particulares, interrelacionados en el tiempo, ofreciendo la garantía de la correcta ejecución del ensayo sintético.

Descripción del circuito para las pruebas de calentamiento

El circuito a utilizar para las pruebas de calentamiento es el que se muestra en la figura 4.



Circuito de prueba de calentamiento.

4

donde:

Tp: Transformador de prueba trifásico de 1 MVA. Conexión estrella aterrada por el primario y 34,5 kV. Secundario de voltaje variable 3 a 13,5 kV. Corriente máxima de trabajo de 74 A.

TBP: Transformador a prueba.

C: Banco trifásico de capacitores.

I_p, I_s e I : Interruptores similares a los de los esquemas sintéticos.

C_1, C_2, \dots, C_8 : Cuchillas.

Teniendo en cuenta que la prueba de calentamiento se llevaría a cabo mediante el método de cortocircuito, como ya se expresó, se expondrá mediante un ejemplo cómo funcionaría este esquema.

Con este circuito se puede probar, mediante resultados directos, transformadores cuyo voltaje de impedancia, en línea, esté entre 3 y 13,5 kV y necesite una corriente para suplir las pérdidas en el cobre de algo menos de 74 A.

Con relación a la potencia reactiva del equipo a prueba, esta puede ser compensada de acuerdo con la magnitud de la batería de capacitores que logre conectarse.

De esta forma, contando con 18 capacitores monofásicos de 4 500 V, 200 kvar y 18 unidades más de 2 200 V, 100 kvar se pueden compensar un total trifásico de hasta 3 600 kvar inductivos a 13,5 kV y hacer un buen número de combinaciones para suministrar el reactivo a los voltajes y potencia inductivas que se pudiera necesitar.

Si por ejemplo, se le va a realizar la prueba de calentamiento a un transformador trifásico de 30 MVA, 115/13,8 kV, estrella- estrella y 10 % se tendrá, que en el momento en que se cortocircuiten sus devanados secundarios y se aplique por el primario el voltaje de impedancia, sus parámetros serán: $V_1 = 10\%$; $Un_1 = 11,5 \text{ kV}$; $V_2 = 0$.

$$I_1 = I_{n1} = 150,6 \text{ A por fase.}$$

$$I_2 = I_{n2} = 1\,255 \text{ A por fase.}$$

donde:

U_1 y U_2 : Voltajes de líneas en los devanados.

Un_1 : Voltaje nominal del primario.

I_1 e I_2 : Corriente que circula por los devanados primarios y secundarios.

I_{n1} e I_{n2} : Corrientes nominales de los devanados.

Como es necesario, de la prueba de cortocircuito a voltaje reducido se obtuvieron los valores de pérdidas en el cobre, potencia reactiva y resistencia de cortocircuito por fase del transformador a 85 °C.

Sus valores son:

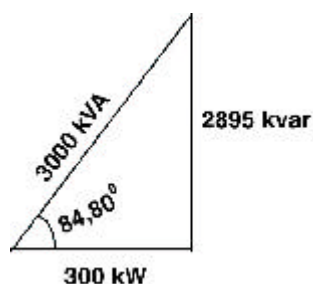
Pérdidas en el cobre (P_{cc}) = 100 kvar.

Potencia reactiva (P_x) = 995 kvar.

Resist. de cortocircuito (R_{cc}) = 4,4 Ω .

React. de cortocircuito (X_{cc}) = 44,3 Ω .

El triángulo de potencia trifásica de la prueba se muestra en la figura 5.



Triángulo de potencia de la prueba.

5

Si esta prueba de calentamiento se realizara sin la utilización del banco de capacitores, el transformador de prueba debería suministrar entonces toda la energía asociada al equipo a prueba, es decir, 300 kW trifásicos de potencia activa y 2 985 kvar de potencia reactiva, este sería un total de 3 MVA con una corriente de línea de 150,6A.

No se ha considerado en este análisis que en la etapa inicial y más prolongada de este ensayo, realmente la fuente debe suministrar además de esta potencia, la potencia de vacío del transformador. Sin embargo, si se trata de compensar al máximo la reactancia inductiva del equipo que se prueba con la adición de capacitores combinados

en serie y paralelos hasta lograr un valor de reactancia capacitiva igual o cercano a esta, la componente de potencia reactiva necesaria en la prueba quedaría compensada por el banco. Por supuesto, ahora el transformador de prueba solo tiene que suministrar las componentes de pérdidas y corriente activas, más la pequeña porción de reactivo que queda por la diferencia lógica entre las magnitudes de reactancia inductiva y capacitiva.

Para el caso tratado, dado que $X_{cc} = 44,3 \Omega$, utilizando los capacitores de 2200 V, 100 kvar, cuya reactancia capacitiva (X_c) es de 48,4 Ω , se puede obtener este mismo valor de (X_c) pero haciendo una combinación de cuatro unidades en serie, para poder soportar el voltaje de fase a que estarán sometidas (6639,5V) y conectado en paralelos una batería de capacitores de estas mismas características. Como se verá la X_c resultante vuelve a ser 48,4 Ω .

El diagrama fasorial de las corrientes puede apreciarse en la figura 6.



Diagrama vectorial de la prueba.

6

donde:

I_c : Componente capacitiva.

I_r : Componente inductiva.

I_s : Componente resistiva.

$I_t - I_c$: Reactivo resultante de la compensación del reactivo inductivo.

I_s : Corriente total que aporta el transformador de prueba.

I_r : Corriente de cortocircuito que llega al transformador a prueba.

PROYECTO ELÉCTRICO

El proyecto de la fuente solo abarca desde el transformador T_p que se encontrará al lado de la subestación de 34,5 kV del CIPEL, donde estarán instalados además de este, los interruptores I_r , I_p e I_s y los reactores X_{L1} y X_{L2} con las cuchillas C_1 y C_2 .

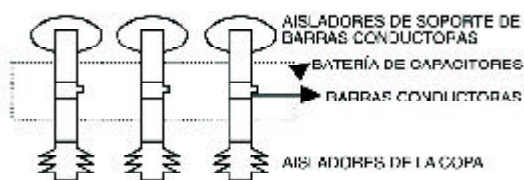
De la línea de 34,5 kV a través de dos interruptores I_r e I_p va conectado X_{L1} con la cuchilla C_1 en forma de *shunt*, como se muestra en la figura 3. A continuación se conectaría el devanado primario del T_p .

Al secundario del T_p quedan asociados en serie I_s y XL_2 con C_2 y a continuación I_a . Mediante una copa de 13,8 kV se bajan 3 cables de 80 A de capacidad nominal de corriente.

Estos cables van soterrados por la línea ya existente hasta las cabinas de reguladores del laboratorio principal del CIPEL. De aquí por la canal principal llegarán a otra copa de salida trifásica

Dentro del laboratorio principal, en lo que se llamará área de prueba de alta energía estarán situadas las baterías de capacitores con las cuchillas y barras para hacer combinación serie-paralelo con estas. Estas baterías quedarían fijadas a la pared.

En un plano por delante de los capacitores se encontrarán la capa de salida de la fuente con tres barras conductoras que estarán sujetas por el extremo a la pared mediante tres aisladores de 13,8 kV (figura 7).



Posición de las barras conductoras.

7

En las barras se encuentran conectores para las tomas de energía.

En el área de pruebas de alta energía se ubicará la cabina de control para la prueba de calentamiento. Esta conllevaría un sistema para regular y medir el voltaje de la fuente y panel o mesa para los instrumentos de medición del ensayo.

El completamiento del esquema de pruebas sintéticas que conlleva una cabina para la pruebas de los interruptores y todo el sistema de sincronización de eventos será objetivo de otro trabajo más especializado por la imposibilidad técnica y material de los autores en estos momentos.

Secuencia de operaciones

En caso de realizarse pruebas de interruptores deben seguirse los siguientes pasos.

1. Abrir las cuchillas C_1 , C_2 , C_5 y C_7 y cerrar C_3 y C_4 .
2. Seleccionar los valores adecuados de X_{L1} y X_{L2} .
3. Cerrar los interruptores I_r , I_p e I_a .
4. Cerrar el interruptor la prueba.
5. Selección del voltaje necesario en T_p .
6. Cerrar el interruptor $I_{s'}$ con lo cual se inicia el flujo de corriente de cortocircuito a través del interruptor a prueba.

A partir de aquí comienza a trabajar el sistema de sincronización de ensayo.

Previo al cierre de $I_{s'}$ el generador de corriente directa debió cargar los bancos de capacitores.

Para el caso de la prueba de calentamiento a transformadores los pasos serían los siguientes:

1. Selección del esquema necesario en la batería de capacitores y conexión de estas barras conductoras.
2. Conexión del transformador a prueba a las barras conductoras.
3. Cierres de las cuchillas C_1 , C_2 , C_5 y C_7 y apertura de C_3 y C_4 .
4. Cierre de I_r , I_p , I_s e I_a .
5. Selección del voltaje necesario e inicio de la prueba.

Lista de componentes

Para la fuente de alta energía, como se puede apreciar en los esquemas mostrados, se ha tratado que los componentes y el circuito, hasta cierto punto, sean útiles tanto para los ensayos sintéticos como para la prueba de calentamiento. Del conjunto de ambos esquemas de ensayos es necesario entonces, por ahora:

1. Transformador de 1MVA, 34,5/3-13,5 kV con las características ya mencionadas.
2. Los interruptores I_r , I_p , I_s e I_a con las características ya escritas.
3. Ocho cuchillas seleccionadoras.
4. Reactores X_{L1} y X_{L2} con características descritas.
5. Diesiocho capacitores de 4 500 V y 200 kvar y diesiocho de 2 200 V y 100 kvar.
6. Dos copas trifásicas.
7. Cables para tres líneas de 13,8 kV y 80 A.
8. Tres barras conductoras rígidas con capacidad nominal de corriente de 2 000 A.
9. Tres aisladores de soporte de 13,8 kV.
10. Tres conectores para unir cables de gran calibre a las barras conductoras.

11. Setenta y dos juegos de cuchillas para conexión de los capacitores.

ANÁLISIS ECONÓMICO

Un análisis cuantitativo del valor monetario que conlleva la ejecución de este proyecto, es imposible hacerlo en estos momentos, por no disponer de los datos económicos sobre los componentes necesarios.

Cualitativamente, puede valorarse que el hecho de poder realizar en el Centro, ensayos de esta naturaleza lo pondría a la vanguardia en el país y en algunos países de América en este aspecto.

La posibilidad de poder brindar el servicio especializado de pruebas a grandes transformadores, fusibles e interruptores colocarían al CIPEL en una posición competitiva muy ventajosa con relación a otros laboratorios de alto voltaje, lo que permitiría la adquisición de ingresos apreciables por este concepto.

CONCLUSIONES

1. El proyecto de pruebas sintéticas lleva la parte del proyecto de control y automática que consiste en lo más complejo del mismo.
2. Para el esquema de las pruebas de calentamiento solo restarían los detalles del control y medición de voltaje que serían un proyecto específico a hacer contando con los equipos reales.
3. En caso de obtenerse los componentes para el esquema propuesto de calentamiento estas pruebas pueden realizarse de inmediato.
4. En caso de que se lleve a efecto la puesta en marcha del proyecto, sobre la marcha del mismo se pueden hacer las adecuaciones necesarias.

RECOMENDACIONES

Como recomendaciones del trabajo se proponen:

1. Tratar de obtener con la cooperación del MINBAS los componentes necesarios.
2. Llevar a cabo un estudio más profundo para poder instaurar en el Centro las pruebas sintéticas.
3. Realizar el proyecto de controles y mediciones de los esquemas propuestos.

REFERENCIAS

1. Fausto, R. S.: "Métodos sintéticos para probar interruptores de potencia", *Resumen de informe técnico*, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México 1990.
2. Hernández, O. y otros: "Metodología para la determinación de las características de cargabilidad en transformadores de distribución", *Informe técnico*, CIPEL, Ciudad de La Habana, 1990.
3. De la Rosa A. R. y otros: "Desarrollo de pruebas de cortocircuito a equipos de interrupción por el método sintético", *Resumen de informe técnico*, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, 1990.

AUTORES

Orestes Hernández Aréu, Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Investigador Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), Ciudad de La Habana
e-mail: orestes@cipel.ispjae.edu.cu

José G. Sánchez Glean, Ingeniero Agroindustrial, Ingeniero Electricista, Grupo de Alta Tensión, CIPEL, ISPJAE, Ciudad de La Habana

Gualfrido Hernández Puentes, Electricista Industrial, Grupo de Alta Tensión, CIPEL, ISPJAE, Ciudad de La Habana



Holguín, Cuba
Del 19 al 21 de junio