



Experiencias en el diagnóstico del aislamiento de los generadores de potencia

Experiences in the diagnosis of the insulation of power generators

Santiago Alfredo - Dorrbercker Drake
 William José - Torres Medina
 Julio Alberto - Molé Menéndez

Recibido: Noviembre del 2011

Aprobado: Enero del 2012

Resumen/ Abstract

El aislamiento de los generadores eléctricos de gran potencia (Turbogeneradores e Hidrogeneradores) es el componente que más influye en su confiabilidad operacional, por lo cual es vital conocer su estado para aplicar las acciones correctivas requeridas. Para alcanzar tal fin, existen múltiples ensayos, controles y criterios relativos a inspecciones sensoriales, muchos de ellos concebidos hace más de medio siglo y que aún subsisten en variantes modernizadas, mientras que otros, más modernos, han sido generalizados y perfeccionados constantemente. Las técnicas y métodos para la aplicación de los ensayos, controles e inspecciones también han evolucionado. En este trabajo se resumen algunas experiencias en la aplicación de los ensayos más actuales relativos a la evaluación de la contaminación, la detección de deficiencias en la protección anticorona, la presencia de descargas parciales internas y la evaluación del envejecimiento del aislamiento, que son aplicados en las áreas de influencia de los autores.

Palabras clave: aislamiento principal, envejecimiento, descargas parciales, ensayos del aislamiento, generadores de potencia.

The insulation of power generators (Turbogenerator and Hydrogenerators) is the component that influences more in its operational reliability, thus is vital to know its state to apply corrective actions. In order to reach such aim, multiple tests, sensorial controls and criteria regarding inspection have been developed, many of conceived them for more than half century and that still subsists in modernized variants, whereas others, more modern, have been generalized and perfected constantly. The techniques and methods for the application of the tests, controls and inspection also have evolved. This work reviews some experiences in the application of recent improvements to insulation tests about the evaluation of contamination, detection problems in the anticorona slot protection, internal partial discharges and the evaluation of the aging, that are applied in the areas of influence of the authors.

Key Words: ageing, Main insulation, on line controls, partial discharges, power generators, tests of the insulation.

INTRODUCCIÓN

Los grandes generadores sincrónicos impulsados por turbinas hidráulicas, turbinas de vapor o turbinas de gas, figuran entre los elementos de mayor esencialidad para los sistemas eléctricos de potencia. Según algunos autores, el aislamiento constituye 50...80% del costo total del generador, por otra parte, recientemente se reconoció que el aislamiento eléctrico es la parte más débil de la mayoría de los aparatos eléctricos[1], mientras que desde el siglo

pasado existe el consenso de que aproximadamente el 90% de las salidas prolongadas de los generadores de potencia se debe a fallos del aislamiento [2].

Un aspecto importante a tener en cuenta para la correcta aplicación e interpretación de los ensayos del aislamiento de los generadores es el hecho de que en la mayoría de los sistemas eléctricos es posible encontrar tanto máquinas modernas como máquinas modernas de tecnología antigua y, no en poca medida, máquinas antiguas, cada una de ellas con características muy diferentes en su sistema aislante demandando inspecciones más frecuentes que las máquinas modernas [3].

Entre las principales causas de los fallos que se presentan en el aislamiento de los turbogeneradores (TG) e hidrogeneradores (HG) se encuentran las siguientes: Contaminación del devanado, Deficiencias en la protección anticorona, Descargas parciales internas y Envejecimiento del aislamiento. El presente trabajo tiene como objetivo resumir algunas experiencias en la aplicación de los ensayos más actuales relativos a la evaluación de la contaminación, la detección de deficiencias en la protección anticorona, la presencia de descargas parciales internas y la evaluación del envejecimiento del aislamiento, que son aplicados en las áreas de influencia de los autores.

DETECCIÓN DE CONTAMINACIÓN EN EL DEVANADO

Ensayos de absorción

La absorción dieléctrica está relacionada con las heterogeneidades que existen en el aislamiento principal debido a la falta de integración entre las capas individuales que lo componen, aunque también puede estar relacionado con la orientación de moléculas dipolares, la formación de cargas volumétricas, la presencia de impurezas, de microcavidades y de humedad (*moléculas de agua*), entre otros.

La realización de los ensayos agrupados bajo esta denominación, se sustenta en el comportamiento de la corriente de absorción, la cual, aparecen, además de la corriente capacitiva, la corriente de conducción y la corriente de fuga, al aplicársele un escalón de CD al aislamiento. En la figura 1 puede observarse como la corriente capacitiva se extingue prácticamente de modo instantáneo, mientras que la corriente de absorción tiende lentamente a cero, a la vez que la corriente total tiende a estabilizarse a la suma de la corriente de conducción y la corriente de fuga.

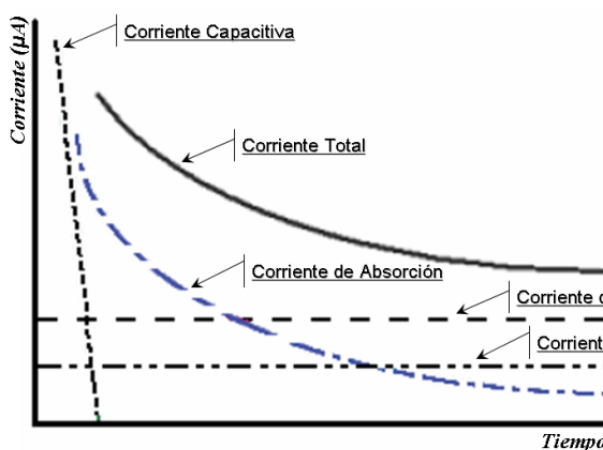


Fig.1 Corrientes en un aislamiento sometido a CD.

Estos ensayos, del tipo fuera de línea, por lo general se efectúan con un Megóhmetro y los niveles de la tensión de ensayo se eligen a partir de la tensión nominal de la máquina (ver tabla 1).

Tabla 1 Tensiones de ensayo recomendadas para los ensayos de absorción [4]

Tensión nominal del generador	Tensión de ensayo recomendada
< 100 V	500 V
1000 ... 2500 V	500 ... 1000 V
2501 ... 5000 V	1000 ... 2500 V
5001 ... 12000 V	2500 ... 5000 V
> 12000 V	5000 ... 10000 V

Los ensayos de absorción aceptados por los autores para la detección de contaminación son: el índice de polarización (IP) y el índice de absorción (IA).

El IP se define como la razón existente entre la Resistencia de Aislamiento medida al minuto y a los 10 minutos, es decir:

$$IP = R_{10'}/R_{1'} \quad (1)$$

Donde $R_{1'} \wedge R_{10'}$ son las resistencias de aislamiento medidas en el primer y décimo minuto de comenzado el ensayo. La interpretación del grado de contaminación a partir de IP se expone en la tabla 2.

Tabla 2 Criterios de contaminación asociados a IP [4]

Condición del aislamiento	IP
Criterios para aislamientos poliméricos	
Contaminado	$IP \leq 2$
Aceptablemente limpio y seco	$2 < IP \leq 4$
Limpio y seco	$IP > 4$
Criterios para aislamientos asfálticos	
Contaminado	$IP \leq 2$
Limpio y seco	$2 < IP \leq 6$
Limpio y seco, pero deteriorado térmicamente	$IP > 7$

El IA se define como la razón existente entre la corriente a absorción a los 30 segundos y a los 60 segundos, es decir:

$$IA = \frac{I_{Abs\ 30s}}{I_{Abs\ 60s}} = \frac{I_{30s} - I_0}{I_{60s} - I_0} \quad (2)$$

Donde I_0 es la corriente de conducción y se determina como:

$$I_0 = \frac{i_{1'} \cdot i_{10'} - i_{3,16'}^2}{i_{1'} + i_{10'} - 2 \cdot i_{3,16'}} \quad (3)$$

Donde $i_{1'} \wedge i_{10'}$ son respectivamente las corrientes medidas en el primer y décimo minuto de ensayo y $i_{3,16'}$ corresponde a la corriente medida a los 3 minutos y 10 segundos de iniciado el ensayo. La interpretación del grado de contaminación a partir de IA se expone en la tabla 3.

Tabla 3 Criterios de contaminación interna asociados a IA

Condición del aislamiento	IA
Contaminación Profunda	$IA \leq 1$
Contaminación Media	$1 < IA \leq 1,25$
Contaminación Superficial	$1,25 < IA \leq 1,4$
Posible Contaminación Superficial	$1,4 < IA \leq 1,6$
No Existe Contaminación	$IA > 1,6$

Ensayo de pérdidas dieléctricas

Uno de los criterios predominantes en la valoración del estado del aislamiento es el análisis del comportamiento de las pérdidas dieléctricas en función de la tensión.

Este ensayo es del tipo fuera de línea y por lo general se efectúa con un puente de Schering y los niveles de la tensión de ensayo se eligen a partir de la tensión nominal de la máquina mediante el ensayo conocido como $\tan \delta$ Tip-Up, midiendo la $\tan \delta$ función de la tensión en el rango de valores comprendidos entre $0,2 U_N$ y U_N a intervalos de $0,2 U_N$.

La interpretación de la presencia de contaminantes se efectúa puramente comparativa. En la figura 2 se ejemplifica el empleo de la $\tan \delta$ vs. U en la detección de contaminación en el aislamiento de un generador de potencia.

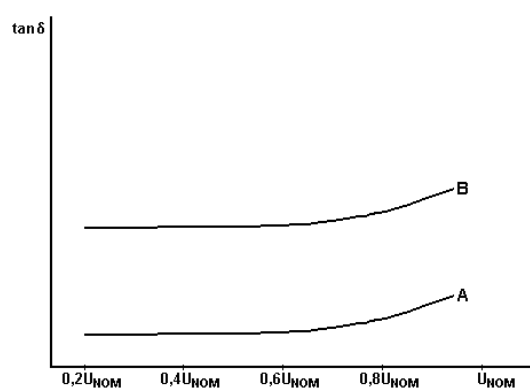


Fig. 2. Comportamiento de $\tan \delta$ vs. U de un turbogenerador de 60 MW. Curva A Aislamiento limpio; Curva B Aislamiento contaminado.

Conclusiones del capítulo

El empleo de IP , IA y la $\tan \delta$ vs. U ha sido empleado con resultados satisfactorios para la detección de contaminación en el devanado de los turbogeneradores de las Centrales Termoeléctricas de la Unión de la Electricidad de la República de Cuba (UNE) y en los hidrogeneradores de la Empresa CORPOELEC de la República Bolivariana de Venezuela.

El procedimiento general aplicado para la detección de contaminación consiste, para el caso de los ensayos de absorción en la realización de un ensayo de 10 minutos registrando las corrientes medidas cada 5 segundos. A partir de este ensayo se procesa la información y se obtienen IP e IA en la tabla 4 se ejemplifica el resultado de estos ensayos aplicados a un turbogenerador de 64 MW.

Tabla 4. Resultado de la evaluación de la contaminación del aislamiento de un turbogenerador de 64 MW a partir de los ensayos de absorción.

Indicador	Condición del aislamiento
$IP = 2,5$	Aceptablemente limpio y seco
$IA = 2,3$	No Existe Contaminación
Conclusión	No se requieren acciones de limpieza

El ensayo de pérdidas dieléctricas para la evaluación de la contaminación se realiza sólo como un subproducto del ensayo de la $\tan \delta$ *Tip-Up* para evaluar el monolitismo del sistema aislante.

DETECCIÓN DE DEFICIENCIAS EN LA PROTECCIÓN ANTICORONA Y LA PRESENCIA DE DESCARGAS PARCIALES INTERNAS

La detección de deficiencias en la protección anticorona y las descargas parciales internas se efectúa a partir del ensayo de DP, tanto con técnicas en línea con sensores Off-Line como con técnicas en línea con sensores On-Line, siendo complementados ambos con técnicas fuera de línea para localizar las fuentes de DP.

Técnica en línea con sensores Off-Line

Esta técnica, bajo la denominación DIACS-ECIE, es aplicada en Cuba desde hace más de 10 años con resultados satisfactorios, la misma se fundamenta en un método ruso [5-6] que puede ser aplicado también a los equipos de las subestaciones.

La aplicación de este procedimiento se sustenta en la aplicación de sensores magnéticos a las tapas de los turbogeneradores. Los puntos de medición se eligen atendiendo a lo mostrado en la figura 3. Este método posibilita la macrolocalización de las fuentes de DP, además posee un sistema de calificación del estado del aislamiento dividido en cinco niveles: Norma, Norma con desviaciones, Norma con desviaciones significativas, Grave y Ante avería.

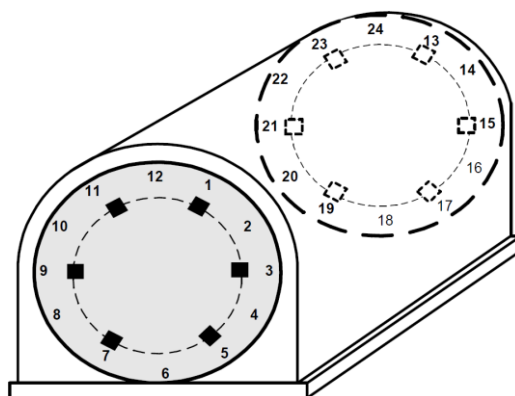


Fig. 3. Identificación de los puntos de medición en las tapas de los turbogeneradores.

Aunque la técnica DIACS-ECIE, al igual que otros métodos modernos de medición de DP cuenta con un software específico, la identificación de la fuente de DP requiere de la experticia del operador. En la figura 4 se ejemplifica la forma de los pulsos de DP en la que se sustenta técnica DIACS-ECIE para la identificación de defectos. En la figura 5 se muestran un grupo de barras con la protección anticorona dañada detectadas mediante al técnica DIACS-ECIE.

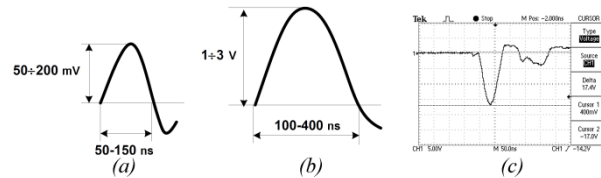


Fig. 4. Oscilogramas de la estructura de los pulsos de DP; (a) DP internas; (b) DP superficiales; (c) oscilograma de las DP.

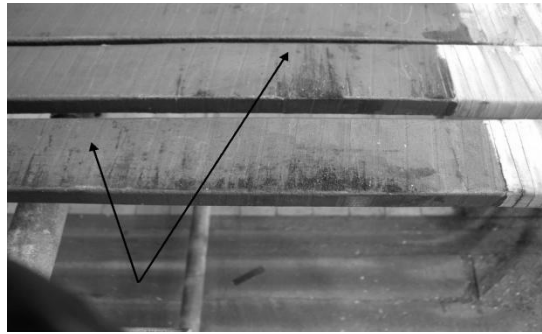


Fig. 5. Barras de un TG de 250 MW con la protección anticorona dañada.

Técnica en línea con sensores On-Line

Los detectores de DP modernos con sensores On-Line son del tipo fase resuelta [7-8] que clasifica los pulsos de DP adquiridos con respecto a su magnitud, posición de fase a la tensión de ocurrencia y tasa de repetición, cuya información es dispuesta en un patrón tridimensional (patrón φ, q, n).

Esta técnica es aplicada con resultados satisfactorios en CORPOELEC desde hace más de 10 años. Este método posibilita la identificación de las deficiencias en la protección anticorona y la presencia de descargas parciales internas a partir de la comparación los patrones de comparación de fase resuelta de descargas parciales de la base de datos del laboratorio del IREQ (Institut de Recherche Hydro-Quebec) para la identificación de defectos[8]. Al igual que en el caso anterior, la identificación de la fuente de DP requiere de la experticia del operador. En la figura 6 se muestra un patrón tridimensional donde es posible identificar de daños en la protección anticorona y DP internas.

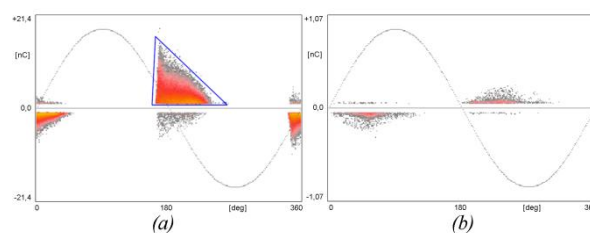


Fig. 6. Patrones de comparación para la identificación de daños en la protección (a) anticorona y descargas parciales internas (b)[9].

Conclusiones del capítulo

Ambas técnicas empleadas por los autores han demostrado ser efectivas en la detección de los defectos señalados. La técnica en línea con sensores Off-Line (DIACS-ECIE), aunque requiere más experticia para la identificación de los defectos, además caracteriza el estado del aislamiento a través de cuatro niveles que coadyuvan a la toma de decisiones relativas al mantenimiento. La técnica en línea con sensores On-Line sin embargo, requiere menos experticia pero no califica el estado del aislamiento.

La selección del empleo cualquiera de estas técnicas, para la detección de las deficiencias en la protección anticorona y la presencia de descargas parciales internas, depende solo de su disponibilidad en la Central donde se encuentre el generador evaluado.

EVALUACIÓN DEL ENVEJECIMIENTO

El envejecimiento del aislamiento principal de los generadores de potencia es una de las causas raíces de fallo de mayor consideración de estas máquinas[10].

Tradicionalmente se ha afirmado que las DP son sensibles al envejecimiento pero no había sido publicado ningún método capaz de evaluarlo. Sin embargo, recientemente fue desarrollada la impedancia a las DP (Z_{DP})[11- 13]. Este indicador de envejecimiento del aislamiento tiene un comportamiento que es inversamente proporcional al deterioro del aislamiento y es el empleado por los autores para la evaluación del envejecimiento del aislamiento principal.

Z_{DP} relaciona la energía requerida por cada pulso de DP, la frecuencia y el peso de las DP, en cuanto a la distribución estadística de sus principales características en función del ángulo de fase de la tensión de ocurrencia, es decir:

$$Z_{DP} = \frac{\sum_{i=1}^{2\pi} \sum_{j=1}^{256} u_i \cdot q_j}{\sum_{i=1}^{256} H_{qs_i}^{U\pm} \cdot NQS} \quad (4)$$

La impedancia a las DP ha sido empleada con éxito en la evaluación del envejecimiento del aislamiento principal de los HG de la empresa CORPOELEC y se encuentra en proceso de implementación para la evaluación del envejecimiento de los TG de la UNE.

Un ejemplo de los resultados obtenidos de la aplicación de Z_{DP} para la valoración del envejecimiento del aislamiento principal de un HG de 185 MW se muestra en la figura 7.

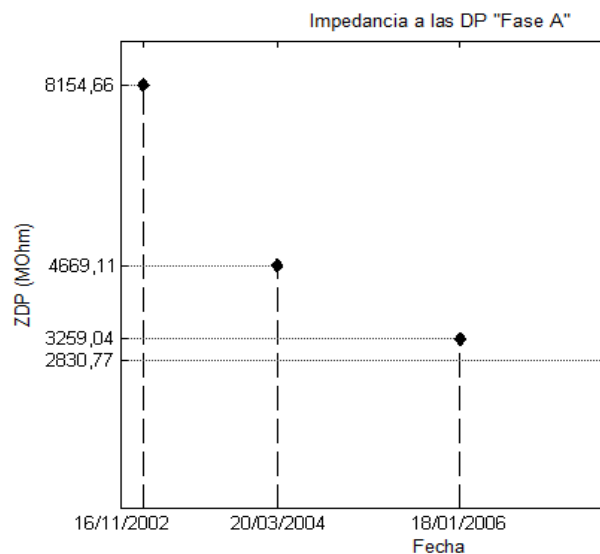


Fig.7. Comportamiento de la Z_{DP} para un HG de 185 MW con aislamiento epoxi.

En la fase actual Z_{DP} posibilita la detección de cambios bruscos en el proceso de envejecimiento del aislamiento de los HGP y la comparación del grado de envejecimiento entre máquinas de tecnologías idénticas sometidas a condiciones de explotación similares (ubicadas en una misma central)

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Como ha sido expresado previamente los resultados obtenidos de la aplicación de los ensayos descritos han sido satisfactorios. Es importante destacar, por su novedad, el empleo de Z_{DP} para la valuación del envejecimiento del aislamiento principal de los generadores de potencia.

REFERENCIAS

- [1] MONTANARI, G.C. "Envisaging Links between Fundamental Research in Electrical Insulation and Electrical Asset Management". *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2008, Vol. 24, núm. 6, p. 6-12.
- [2] КОТЕЛЕНЕЦ, Н.Ф. y КУЗНЕЦОВ, Н.Л. *Испытания и Надёжность Электрических Машин*. Москва, СССР, Высшая Школа, 1988. 232 p.
- [3] STONE, GREG C., et al. *Electrical Insulation for Rotating Machines : Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. 1 a ed. United States of America, Wiley-IEEE Press, 2004. 392 p. *IEEE Press Series on Power Engineering*. ISSN: 0-471-44506-1.
- [4] Electric Machinery Committee of the IEEE Power Engineering Society, USA. *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. IEEE Std 43-2000. New York (NY), United States of America: Electric Machinery Committee of the IEEE Power Engineering Society, USA, 2000.
- [5] АКЦЁНОВ, Ю.П. *Методические Рекомендации по Диагностике, Объёмам и Нормам Испытаний Изоляции Статорных Обмоток Вращающихся Машин классов Напряжения 3-24 кВ*. Москва, Россия, 1999. 158 p.
- [6] MOLÉ ILLAS, J.I.; MOLÉ MENÉNDEZ, J.A. y BOURZAC SUÁREZ, V. *Diagnóstico del Aislamiento de Generadores de Potencia Mediante el Registro de Descargas Parciales*. Santiago de Cuba, Cuba, Universidad de Oriente, Departamento Electroenergética, Facultad de Ingeniería Eléctrica, 2008.4.
- [7] STONE, G.C., et al. "Impact of Slot Discharges and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators". *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2008, Vol. 24, núm. 5, p. 14- 21.
- [8] HUDON, C. y BÉLEC, M. "Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2005, Vol. 12, núm. 2, p. 297-319.
- [9] BÉLEC, M.; HUDON, C. y GUDDEMI, C. *Laboratory Study of Slot Discharge Characteristic PRPD Patterns*. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Coil Winding Conference (EIC/EMCW), (Cincinnati, Ohio (OH), United States of America, 2001. 4 p. 0-941783-21-9
- [10] WEIERS, T. "Symptoms of Winding Insulation Aging after 37 Years of Service Life in a Hydrogenerator". *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2010, Vol. 25, núm. 1, p. 20-24.
- [11] TORRES MEDINA, W.J. DORRBERCKER DRAKE, S.A. y BENÍTEZ GONZÁLEZ, I.O. *Consideraciones sobre los Indicadores Empleados para caracterizar la Intensidad de las Descargas Parciales*. Congreso Internacional en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico ALTAE 2009, (Medellín, Dpto. de Antioquia, Colombia 23 al 27 de noviembre), 2009. 6 p. 978-958-714-326-3
- [12] TORRES, W.J.; DORRBERCKER, S.A. y BENÍTEZ, I.O. "Variable para la Supervisión del Envejecimiento del Aislamiento Principal de Grandes Hidrogeneradores Mediante Descargas Parciales". *Universidad, Ciencia y Tecnología*. 2010, Vol. 14, núm. 56, p. 165-173.
- [13] TORRES MEDINA, W.J. "Evaluación del Envejecimiento del Aislamiento Principal de los Hidrogeneradores de Gran Potencia mediante Descargas Parciales". Tutor: DORRBERCKER DRAKE, S. A. [Tesis en opción al Grado de Doctor en Ciencias Técnicas]. CIPEL, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), 2011.

AUTORES

Santiago Alfredo Dorrbercker Drake

Ingeniero electricista, Doctor en Ciencias Investigador Auxiliar. Técnicas, Instituto Superior Politécnico “José A. Echeverría” (CUJAE), La Habana.

e-mail: dorr@electrica.cujae.edu.cu

William José Torres Medina

Ingeniero Electricista, UNEXPO, Venezuela. Doctor en Ciencias Técnicas, 2011, labora en la empresa estatal CORPOELEC. Venezuela. Es miembro de la IEEE.

Julio Alberto Molé Menéndez

Ingeniero electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Labora en la empresa de Construcciones para la Industria Eléctrica de Cuba,