

# tono

Revista Técnica de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A.

2008 Vol. 5 No. 1-2

Conmovidos por el llamado de la luz



# Normas para los colaboradores

Los textos deben abordar temáticas relacionadas con el entorno de las telecomunicaciones y la informática, principalmente.

Pueden presentarse, además, trabajos sobre la empresa moderna y la nueva economía en un sentido amplio y práctico, dentro del escenario actual de las comunicaciones.

*Los artículos deben entregarse teniendo en cuenta las pautas que a continuación se especifican:*

- ◆ escritos en computadora en Microsoft Word para Windows
- ◆ en la tipografía *Times New Roman*
- ◆ con tamaño de letra 11 con interlineado de 1,5
- ◆ de 28 a 30 líneas por páginas
- ◆ por una sola cara
- ◆ en hojas o cuartillas con una medida de 21,59 cm x 27,94 cm o de 8 ½ x 11 pulgadas tamaño de papel carta o *letter*
- ◆ con una extensión máxima de 10 cuartillas y una mínima de 8 y en formato electrónico

*Los autores deben entregar:*

- ◆ resumen del artículo en un párrafo de 5 líneas
- ◆ palabras claves
- ◆ abreviaturas o acrónimos utilizados con su significado en español o en inglés o en ambos idiomas
- ◆ bibliografía consultada
- ◆ imágenes, gráficos, tablas, fotos, dibujos, materiales de archivo o cualquier información gráfica de forma clara, legible y en cualquier formato compatible con plataforma PC
- ◆ en el caso específico de las fotos, enviarlas en el formato original —.tif, .jpg, etc.—

*Adjuntar los siguientes datos:*

- ◆ Nombre y Apellidos del autor
- ◆ Año y lugar de nacimiento
- ◆ Profesión u oficio
- ◆ *Curriculum vitae* resumido
- ◆ Entidad donde trabaja y dirección
- ◆ Teléfono de trabajo y particular / Fax
- ◆ Dirección electrónica

Los trabajos pueden ser dirigidos a Revista Técnica *Tono*.

Centro de Información Científico-Técnica de ETECSA.

Centro de Negocios Miramar, calle 3<sup>ra</sup>, e/ 76 y 78, Edificio Beijing, Piso 4, oficina 404.  
Playa, Ciudad de La Habana, Cuba. C.P.: 11300.

También a través de los correos electrónicos: [vilma.vidal@etecsa.cu](mailto:vilma.vidal@etecsa.cu), [anae.montes@etecsa.cu](mailto:anae.montes@etecsa.cu)  
[tono@etecsa.cu](mailto:tono@etecsa.cu)

**Tono Revista Técnica de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba, S.A.****No. 1 / 2008****Directora y Editora:** Vilma Vidal García**Redacción Corrección:** Ana Estela Montes Quintana**Diseño y Fotografía:** Rogelio García Rodríguez**Consultores Técnicos:****Ing. Maimir Mesa Ramos****Dr. Ing. Juan Boza Valerino****Dr. Orestes Hernández Areu****MsC. Carlota Fernández Falcón****Lic. Mayra Nodarse Nodarse****Lic. María Elena González Pérez de Morales****ISSN: 1813-5056****Impresión: Exclusivas Latinoamericanas ELA, SL.****S u m a r i o****4 Editorial**

- 6 El uso de la energía en la sociedad digital**  
Grupo de Medio Ambiente de Telefónica I + D

- 17 Distorsión de la forma de onda en los alternadores LETAG instalados en ETECSA**  
Onaldo Ramírez Matos y Leonardo Vázquez Fonte

- 21 Sistemas fotovoltaicos**  
Nicasio Echarte del Sol y Emilio R. Cabrera Fernández

- 27 Presencia de armónicos en las redes eléctricas de las instalaciones de comunicaciones**  
Iván R. Linares Mosquera y Gabriel Hernández Valdés

- 33 Sistemas de protección contra sobretensiones**  
Emilio R. Cabrera Fernández y Nicasio Echarte del Sol

- 37 Calidad de la energía eléctrica**  
Roberto L. Oquendo Oms

- 41 Grupos electrógenos y calidad de la energía**  
Marielys Francisco Fernández, Raúl Díaz Fuentes, Miguel Castro Fernández, Ángel Acosta Montiel

**Centro de Información  
CONTÁCTENOS EN:**

Centro de Información Científico-Técnica de ETECSA  
Centro de Negocios Miramar, calle 3<sup>ra</sup>, e/ 76 y 78,  
Edificio Beijing, 4<sup>to</sup> Piso, oficina 404.  
Playa, Ciudad de La Habana, Cuba. C.P.: 11300  
Teléfonos: (537) 266 8451, 266 8452.  
Correos electrónicos: vilma.vidal@etecsa.cu,  
anae.montes@etecsa.cu, tono@etecsa.cu

**Portada**

Foto de portada: Nelson Fernández Esperón

*Las opiniones de los autores expresadas en los artículos reflejan sus puntos de vista, pero no necesariamente coinciden con los criterios del Grupo Editorial.*

# Resúmenes Abstracts

## El uso de la energía en la sociedad digital Grupo de Medio Ambiente de Telefónica I + D

Es evidente que las telecomunicaciones van ligadas estrechamente a la energía y que un análisis de sus repercusiones ambientales pasa necesariamente por estudiar su efecto en la demanda energética. A lo largo de este artículo se va a analizar la influencia de las telecomunicaciones y las tecnologías de la información sobre el consumo energético, en particular sobre el consumo eléctrico, que es el más significativo a partir del aumento del equipamiento electrónico en el hogar, en las industrias, en los comercios, en las oficinas, etc. y del incremento de su intensidad de uso. También se aborda el aumento del consumo de energía asociado al incremento de la infraestructura necesaria para las comunicaciones; la importancia del empleo de energías renovables para contribuir a un consumo racional de la energía; el trabajo constante para mejorar la eficiencia energética de las redes y equipos de comunicaciones; la orientación hacia un mayor control y diversificación de la red eléctrica; y el importante papel de Internet como nuevo y dominante entorno social.

**Palabras clave:** Energía / Sociedad Digital

**Distorsión de la forma de onda en los alternadores LETAG instalados en ETECSA**  
**Autores:** Onaldo Ramírez Matos y Ramón L. Vázquez Fonte

El desarrollo alcanzado por la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba, S. A. (ETECSA) ha condicionado que se le preste un interés especial al aumento del contenido armónico en los sistemas eléctricos, principalmente, como consecuencia de la proliferación de la electrónica de potencia, en todos los niveles del sistema, desde los puntos de generación de energía eléctrica hasta los de consumo. La empresa suministradora de energía del país ha establecido normativas, su implantación requiere el desarrollo de sistemas de medida y control, de precisión y fiabilidad aceptables.

**Palabras clave:** Armónicos / Generadores Eléctricos / Conductores Eléctricos

## Sistemas Fotovoltaicos

**Autores:** Nicasio Echarte del Sol y Emilio R. Cabrera Fernández

Las buenas comunicaciones son esenciales para mejorar la calidad de vida en áreas alejadas. Sin embargo, el costo de energía eléctrica para hacer funcionar estos sistemas y el alto costo de mantenimiento de los sistemas convencionales han limitado su uso. La utilización de los Sistemas Fotovoltaicos (FV) ha permitido dar solución a una serie de problemas que se venían presentando en ETECSA en la expansión y modernización de la red de comunicaciones, fundamentalmente en la Red de Acceso Local Inalámbrica, en las Terminales de Red Inalámbrica y los Sistemas Móviles Celulares.

**Palabras clave:** Sistemas Fotovoltaicos / Red de Comunicaciones

## Presencia de armónicos en las redes eléctricas de las instalaciones de comunicaciones

**Autores:** Iván R. Linares Mosquera y Gabriel Hernández Valdés

Los procesos dependientes de la electrónica de potencia están cada día más presentes en la vida cotidiana, formando parte de computadoras, televisores, UPS, iluminación fluorescente con balasto electrónico, rectificadores conmutados, etc. Todos estos equipos constituyen cargas no lineales que generan armónicos que contaminan su entorno en determinada magnitud. Su identificación, detección y efectos son la esencia de este artículo.

**Palabras clave:** Armónicos / Redes Eléctricas / Electrónica de Potencia

## Sistemas de protección contra sobretensiones

**Autores:** Emilio R. Cabrera Fernández y Nicasio Echarte del Sol

El notable incremento de las descargas atmosféricas y sus efectos nocivos, en los últimos años, exigen tomar conciencia sobre el uso los sistemas de protección contra descargas atmosféricas. En este trabajo, se ofrece una síntesis de las distintas partes y elementos que forman un sistema de protección y, al mismo tiempo, se

presentan algunas consideraciones que deben tenerse en cuenta para seleccionar sus elementos.

**Palabras clave:** Sistemas de Protección / Descargas Atmosféricas

## Calidad de la energía eléctrica

**Autor:** Roberto L. Oquendo Oms

Es una realidad incuestionable el aumento del consumo de energía eléctrica a partir de la utilización, en la sociedad y la industria, de un gran número de equipos eléctricos y electrónicos encargados de controlar procesos, transmitir información, procesar datos hasta las actividades de entretenimiento y esparcimiento, etc. Este uso expansivo y masivo de la energía ha condicionado la necesidad del estudio de las redes eléctricas y su control a partir de las entidades normalizadoras. En este artículo, se brinda un conjunto de normas que deben cumplir las empresas suministradoras y los fabricantes de equipamiento eléctrico para evitar la contaminación de las redes eléctricas con perturbaciones que puedan incidir y degradar la calidad de la energía eléctrica para que, a su vez, se convierta en un objetivo estratégico en la búsqueda de la eficiencia y eficacia empresarial.

**Palabras clave:** Energía Eléctrica / Calidad

## Grupos electrógenos y calidad de la energía

**Autores:** Marielys Francisco Fernández, Raúl Díaz Fuentes, Miguel Castro Fernández y Ángel Acosta Montiel

Entre las tecnologías de mayor difusión que hoy día se utilizan dentro de la Generación Distribuida (GD) están los Grupos Electrógenos (GE). La presencia de los GE, en cualquiera de sus formas de explotación, exige un análisis de los problemas que puedan presentarse por su presencia; uno de estos problemas está relacionado con la Calidad de la Energía Eléctrica (CEL). El presente trabajo expone los primeros resultados de un estudio que va dirigido a buscar respuestas sobre este tema ante diferentes tipos de perturbaciones que pueden presentarse en la red: cortocircuito y variación de la tensión en los terminales del GE y la desconexión súbita de la carga —rechazo de carga—.

**Palabras clave:** Grupos Electrógenos / Generación Distribuida / Calidad de la Energía

# Resúmenes Abstracts

## Use of Energy in Digital Society

Author: Environment Group of Telefónica I + D

It is evident that telecommunications are closely linked to energy; so, an analysis of its environmental impact needs to study its effect on energy demand. This article examines telecommunications and information technologies impact on energy consumption, particularly electrical energy consumption, which is the most significant due to the increasing number and use of electrical equipment at home, industries, stores, offices, etc. Electrical energy consumption associated to the increase of the required infrastructure for communications; importance of renewable energy exploitation to contribute to a more rational energy use; systematic work to improve energy efficiency of communication networks and equipment; directions towards a better control and diversification of the electrical network and the role of Internet as a new and dominating social environment are some of the aspects covered in this article.

**Key Words:** Energy / Digital Society

## Waveform Distortion in Alternators LETAG Installed in ETECSA

Authors: Onaldo Ramírez Matos and Ramón L. Vázquez Fonte

The development reached by the Cuban Telecommunications Enterprise, Ltd. (ETECSA) has brought about a special focus of attention on harmonic content increase of electrical systems, mainly as a result of the proliferation of power electronics at all system levels, from electrical power generation points to consumption ones. The national power service provider has established new rules whose implementation requires the development of measure and control systems with appropriate accuracy and reliability.

**Key Words:** Harmonics / Power Generators / Power Conductors

## Photovoltaic Systems

Authors: Nicasio Echarte del Sol and Emilio R. Cabrera Fernández

Good communications are vital to improve life quality in distant areas. However, the cost of power used to operate these systems and the cost of traditional systems maintenance has limited their exploitation. The use of Photovoltaic (PV) systems has allowed solving different problems in spreading and modernizing ETECSA's communication network, particularly in wireless local access network, wireless network terminals and cellular mobile systems.

**Key Words:** Photovoltaic Systems / Communication Network

## Harmonics Presence at Power Line Networks in Telecommunications Facilities

Authors: Iván R. Linares Mosquera and Gabriel Hernández Valdés

Processes depending on power electronics are present in our life through computers, TV sets, UPS, fluorescent lights with electronic ballast, switched rectifiers, etc. All these equipment are nonlinear charges generating harmonics that pollute the environment somehow. Harmonic Identification, detection and effects are the main points discussed in this paper.

**Key Words:** Harmonic / Electrical Networks / Power Electronics

## Overcharged Protection Systems

Authors: Emilio R. Cabrera Fernández and Nicasio Echarte del Sol

Remarkable increase of atmospheric discharges and their effects during the last years demand to become aware on atmospheric discharges protection systems. This paper introduces a summary on the different

parts and elements that composed a protection system and offers some considerations to be taken into account when selecting some of its elements.

**Key Words:** Protection Systems / Atmospheric Discharges

## Quality of Electrical Energy

Author: Roberto L. Oquendo Oms

It is conclusive the fact of electrical energy consumption increase due to the use of a great number of electrical and electronic equipment in society and industry used to control processes, transmit information, process data, create entertainment activities, etc. This wide and mass use of power has raised the need to study electrical networks and their control by standard entities. This article proposes a set of standards to be fulfilled by electrical equipment providers and manufacturers in order to avoid electrical network pollution due to disruptions that might affect and diminish quality of electrical energy.

**Key Words:** Electrical Energy / Quality

## Generators and Quality of Energy

Authors: Marielys Francisco Fernández, Raúl Díaz Fuentes, Miguel Castro Fernández and Ángel Acosta Montiel

Today, generators are one of the most spread Distributed Generation (DG) technologies. Generators, under any exploitation form, demands an analysis of the problems arising due to their use such as those related to Quality of Electrical Energy. This paper shows the preliminary results of a study aiming to find solutions for different types of network conflicts like short circuit, tension variation at the generator terminals and sudden disconnection of the charge — charge rejection—.

**Key Words:** Generators / Distributed Generation / Quality of Electrical Energy

Traducción: MSc. Diria Machín Reyes

Por Vilma Vidal García  
Directora y Editora  
vilma.vidal@etecsa.cu

A lo largo de la historia de la ciencia y de la tecnología, la llegada de la electricidad, tanto como fenómeno físico así como en artefactos inventados para su uso práctico, dejaba a la humanidad presa de una conmoción por la luz que significaba vida, transformación de la realidad, prosperidad, modernidad, felicidad, éxito.

La electricidad evolucionó desde la simple percepción del fenómeno hasta su tratamiento científico. Sus primeras aportaciones se entendieron como aproximaciones sucesivas al fenómeno eléctrico. El telégrafo eléctrico se considera la primera aplicación en el campo de las telecomunicaciones. A finales del siglo XIX, la electricidad se convierte en una de las fuerzas motrices de la segunda revolución industrial, a partir de sus numerosas aplicaciones económicas, debido a que los sucesivos cambios de paradigmas permitieron estudiar la función de la electricidad con una nueva dimensión.

La electrificación no sólo se considera como un proceso técnico, sino como un verdadero cambio social de alcances extraordinarios y complejos —alumbrado, procesos industriales y de comunicaciones—. Para la sociedad de la información de la llamada tercera revolución industrial —transistor, televisión, computación, robótica, internet—, la energía eléctrica es esencial. La Edad de la Electricidad, denominada así por unos de los grandes teóricos contemporáneos, ha tenido un gran impacto cultural que radica en la altísima **velocidad** de propagación de la radiación electromagnética, percibida de forma casi instantánea. Las posibilidades que brinda este hecho son las que, incluso, pueden decirse que rozan con lo inimaginable para el hombre, por ejemplo, la simultaneidad y la división de cada proceso en una secuencia. Dentro del cambio cultural impuesto, esto se traduce por una atención al “campo total”, un “sentido de la estructura total”, una “idea integral de la estructura y la configuraciones”; concepciones que han incidido en los ámbitos científicos, tecnológicos, educativos, artísticos, etc.

Justamente, ante la complejidad y celeridad del mundo contemporáneo, se afirma que el uso de la energía se ha convertido en un sector estratégico, tanto en términos económicos como sociales, porque es uno de los factores determinantes de crecimiento. En ese sentido, la revista técnica *Tono* dedica un número doble al tema energético desde distintos puntos de vistas asociados a aplicaciones específicas dentro del sector de las comunicaciones, aproximaciones teóricas y tecnológicas más generales, etc.

Se seleccionaron un grupo de artículos, casi todos realizados por especialistas de la Empresa que trabajan vinculados al área energética y que cursaron la Maestría en Ingeniería Eléctrica, auspiciada por la Facultad Eléctrica de la CUJAE - Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”.

A nivel mundial existe una clara voluntad por mejorar la generación, distribución y consumo de electricidad para favorecer el progreso tecnológico e influir en el bienestar de las naciones tanto en los países con economías más avanzadas como los calificados en vías de desarrollo.

De ahí que se observan líneas fundamentales de investigación y desarrollo en el sector eléctrico orientadas, por un lado, a la búsqueda de una mayor eficiencia en las actividades de las empresas; y por otro, la intención de lograr la rentabilidad en nuevas actividades, por ejemplo, una de las más importantes es la explotación de energías renovables porque están enfocadas a acrecentar el bienestar económico y social a través de una reducción del impacto ambiental en las actividades humanas.

Los lectores de nuestra revista podrán encontrar en este número temas relevantes como el uso de la energía en la sociedad digital a partir de la influencia de las telecomunicaciones y las tecnologías de la información sobre el consumo energético, el aumento del consumo de energía asociado al incremento de la infraestructura necesaria para las comunicaciones, la importancia de las energías renovables, el trabajo orientado a mejorar la eficiencia energética de las redes y equipos de comunicaciones, y el dominante rol de Internet como la nueva sociedad red.

Los contenidos y la generación de armónicos se abordarán desde varias aristas: una relacionada con el interés por el aumento del contenido armónico en los sistemas eléctricos de la Empresa, como resultado de la expansión de la electrónica de potencia y teniendo en cuenta las normas establecidas por la empresa rectora de energía a nivel nacional; y otra, a partir de los procesos dependientes de este mismo fenómeno de

la electrónica de potencia, debido a su fuerte presencia tanto en la vida doméstica como laboral, por ejemplo, el uso de las computadoras, televisores, equipos de música y video, UPS, rectificadores conmutados, etc.

Otros asuntos son más específicos como la propuesta de la utilización de autómatas programables a partir de la valoración de sus nuevas funciones y controles con el propósito de ahorrar energía eléctrica en las instalaciones de telecomunicaciones; y una aproximación a la topología *flyback* y la tecnología *topswitch* con sus características técnicas, funcionamiento y beneficios, sobre todo, al asumir cómo el sector de las comunicaciones utiliza diferentes fuentes de alimentación cada vez más pequeñas y eficientes—computadoras, teléfonos móviles, cargadores de baterías, convertidores de uso solar, etc.—.

La influencia del consumo energético en los sectores de la industria y el comercio se muestra a partir del análisis del fenómeno de Resonancia Paralelo al intentar corregir el Factor de Potencia en presencia de armónicos a través de ejemplos y resultados concretos. Y, también, la importancia, en estos entornos, de los sistemas de alimentación DC, particularmente, en las telecomunicaciones para garantizar sus servicios según un estudio de diferentes fuentes conmutadas empleadas.

Con un enfoque más teórico, se abordan temas como el empleo de los Sistemas Fotovoltaicos para dar solución a problemas relacionados con la expansión y modernización de redes de comunicaciones; una pormenorización de los elementos de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas y sus efectos nocivos; una introducción al fenómeno de Compatibilidad Electromagnética ante el incremento de la convivencia del hombre y los equipos electrónicos y eléctricos en un mismo ambiente electromagnético; además de definiciones y características de energía renovable y no renovable, los nuevos métodos de aprovechamiento y las vías de obtención ante el agotamiento de las fuentes energéticas tradicionales y la propuesta de soluciones alternativas.

En el tránsito de la humanidad a través de la etapa industrial, la tecnológica y la más actual era de la información y el conocimiento, se ha ido perfilando una compulsión por la normalización de los procesos en aras de ofrecer productos y servicios de calidad. También se ha estudiado la calidad de la energía. Se proponen dos aproximaciones: una asociada al aumento del consumo eléctrico y el uso masivo de la energía, tanto en el ámbito profesional, doméstico como de entretenimiento, por lo que presenta un conjunto de normas para las empresas del sector energético en función de un objetivo estratégico de eficiencia y eficacia empresarial; y el otro, vinculado a la Generación Distribuida, específicamente, los Grupos Electrógenos, a través de un estudio orientado a brindar soluciones ante diferentes tipos de perturbaciones de la red eléctrica para garantizar la calidad del proceso de generación de energía eléctrica.

Finalmente, con una dimensión más humana que tecnológica, se publica un artículo que muestra una visión global de la energía y su correspondencia con el desarrollo humano mediante la relación entre los Objetivos de Desarrollo del Mileno y el uso de la energía. Este texto apareció en la revista *Cuadernos internacionales de tecnología para el desarrollo humano*, publicación del proyecto español Ingeniería sin Fronteras, orientada a ofrecer un espacio de intercambio de conocimientos y experiencias de desarrollo humano y sostenible que integran un factor tecnológico, y dedicó un número especial a la energía. Esta publicación periódica está incluida en el mayor Directorio de Revistas de Acceso Abierto —del inglés, *Directory Open Access Journals* (DOAJ)—, que aboga por un espacio abierto al conocimiento compartido.

A partir de este número, nuestra publicación pretende incluir colaboraciones provenientes del Movimiento de Acceso Abierto a la literatura científico-técnica en Internet y tributar, modestamente, a las nuevas formas de socialización del conocimiento científico a partir del uso de las nuevas tecnologías.

La presente edición de la revista *Tono* invita a sus lectores a compartir artículos que abordan, desde diferentes aristas, la gestión de la innovación en el sector de la energía eléctrica, su producción a partir de un amplio rango de opciones técnicas, sus aplicaciones, las exigencias para gestionar un conocimiento no sólo de la ingeniería eléctrica en sí misma sino otros de índole tecnológica, económico-financiera, jurídica, regulatoria, ambiental y socio-cultural. Y, por supuesto, aproximarnos también a sentir esa conmoción milenaria por el llamado de la luz —en este caso, luz que irradia conocimiento—.



# El uso de la energía en la sociedad digital

Grupo de Medio Ambiente de Telefónica I + D

Este artículo es una versión editada del original que fue publicado en *AHCIET Revista de Telecomunicaciones*, no. 109. (enero-marzo/2007). La Secretaría de Información de AHCIET cedió amablemente sus derechos.

## Consumo energético de las TIC. Presente y futuro

En las últimas décadas se está viviendo un continuo crecimiento de la demanda energética. En 2004 la demanda anual total en España fue un 3,7% mayor que la de 2003 (8). Además, empieza a ser habitual oír noticias sobre picos de consumo que pueden provocar problemas de suministro. Ya en 2005 se alcanzó un nuevo máximo de demanda de energía eléctrica.

Este aumento del consumo, ligado en general a la mejora de la calidad de vida, debe ser contenido si queremos preservar los recursos naturales y evitar la contaminación atmosférica, tan influenciada por la producción energética, que ya está provocando actualmente problemas en la salud de las personas y cambios en el equilibrio ecológico, con consecuencias claras, por ejemplo, en el clima.

En este contexto, en 1999 cundió la alarma con la publicación en la revista *Forbes* de un artículo (2) de Hurber y Mills en el que presentaban los resultados de un estudio sobre la demanda energética procedente del uso de Internet y de sus infraestructuras, concluyendo que era responsable de más de

un 8 % de la demanda energética de los Estados Unidos, y que después de una década sería previsible que llegara a consumir la mitad de lo producido por la red eléctrica.

Análisis posteriores concuerdan en que este estudio sobreestimó los consumos de algunos equipos electrónicos asociados con Internet, en algunos casos, en más de un orden de magnitud (3).

Estudios realizados en distintos países sobre la contribución de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) al consumo de electricidad, coinciden en que los equipos de oficina y de telecomunicación usados en el sector no residencial representan en torno a un 3 ó 4 % del consumo anual de electricidad (4).

♦ **En los EE.UU. los equipos de telecomunicación y de oficina representan el 3 % del consumo nacional de electricidad. Este porcentaje disminuye hasta el 1 % referido al total de energía primaria consumida —datos referidos al año 2000— (6).**

♦ **En Alemania, los equipos de oficina y los asociados con Internet en los sectores comercial y residencial supondrán en torno a un 4 % de la demanda nacional de electricidad (4).**

♦ **En Suiza, las tecnologías de la información suponen un 5 % de la demanda eléctrica.(7)**

Si es difícil conocer actualmente el consumo eléctrico asociado a las infraestructuras de comunicaciones e informática, por la complejidad de las redes y los límites que deben ser considerados, más aún lo es saber cuánto va a ser transcurridas una o dos décadas.

En el futuro, el uso de las telecomunicaciones y su incorporación al hogar y a los negocios va a aumentar el equipamiento electrónico existente en todos esos entornos; pero va a contribuir además a mejorar la eficiencia de nuestras actividades cotidianas. La optimización de los consumos energéticos de los equipos favorecerá también que el incremento de equipamiento no dispare el consumo.

<sup>1</sup> Estos datos dan idea del orden de magnitud que representan las infraestructuras de telecomunicación y los equipos electrónicos asociados, en el consumo eléctrico de distintos países. No son directamente comparables, dado que en los distintos estudios se tienen en cuenta equipamientos e infraestructuras diferentes para el cálculo del consumo energético.



**En lo que respecta a Europa, las previsiones para 2020 consideran a las TIC como responsables de un 3 % como máximo del consumo energético total de la Unión Europea de los 15. (17)**

De acuerdo con un estudio realizado por el Departamento de Energía de los EE.UU. acerca de la influencia de las TIC sobre la distribución, el suministro y la demanda energética, el uso de las tecnologías digitales sólo va a aumentar modestamente su consumo de electricidad. En este análisis se estudian tres tipos de influencia, la debida:

- ♦ Al consumo de electricidad de los equipos.
- ♦ Al efecto de las TIC en los sistemas de gestión de la energía.
- ♦ A las implicaciones en el consumo de electricidad derivadas del uso de servicios de telecomunicación, tales como el teletrabajo o el comercio electrónico.

Basándose en la definición de cuatro escenarios distintos de evolución de las TIC (desde 2001 a 2021), más ó menos optimistas, se concluye que en ninguno de ellos el porcentaje de electricidad usada en redes de comunicaciones, ordenadores y equipos de oficina va a superar el 5,5 % del total de consumo en el año 2021 (15).

### **Consumo eléctrico debido al equipamiento electrónico**

A la hora de evaluar el impacto medioambiental de los equipos de telecomunicaciones, un factor muy importante a considerar es el energético, teniendo en cuenta que todas las fases de su vida útil, desde que se fabrica hasta su disposición como residuo, requieren consumo significativo de energía. En particular, el proceso de fabricación supone una fase que requiere el consumo intensivo de recursos energéticos.

#### **Producción y uso de los equipos**

En las oficinas, la mayor parte del consumo eléctrico está asociado con los ordenadores, estaciones de trabajo y monitores (6).

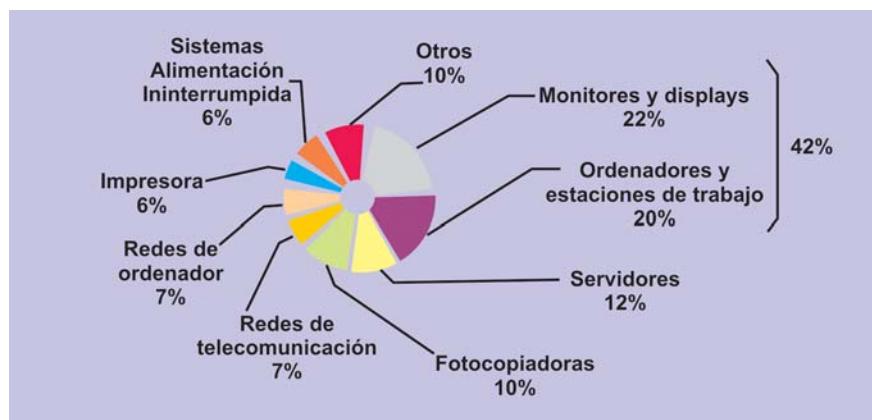


Figura 1 Consumo eléctrico de los equipos en las oficinas

Cuando hablamos del efecto de las TIC en el consumo eléctrico, estamos considerando únicamente la fase de utilización; sin embargo, es preciso tener en cuenta que la electricidad consumida en su fabricación no es despreciable.

De manera habitual, las industrias relacionadas con la electrónica y los semiconductores son percibidas como relativamente limpias y no especialmente dañinas para el medio ambiente, en comparación con



otros sectores industriales. Sin embargo, con el incremento en la producción y el consumo, la percepción está cambiando. La fabricación de circuitos integrados y placas de circuitos impresos son procesos muy consumidores de recursos naturales: de electricidad, de materias primas y de agua.

**La energía primaria demandada para la producción de un PC es del orden de 10 a 12 GJ, y sería suficiente para fabricar cuatro televisores en color. Un PC durante su utilización consume aproximadamente para un uso privado entre 2,9 y 4,4 GJ de energía primaria, y entre 11,6 y 100 GJ si el uso es profesional.**

**En consecuencia, dependiendo del uso que se dé a ese PC, la energía relacionada con su producción puede representar hasta un 90 % del consumo energético total de su ciclo de vida, aunque si la intensidad de uso o el periodo de utilización aumentan, la proporción del consumo atribuida a la fase de utilización puede aumentar, representando hasta un 80 %.**

**En la fase de uso, la mayor demanda energética está relacionada con el monitor (5).**

La innovación puede contribuir a reducir las cargas medioambientales de los procesos de fabricación, reduciendo el consumo energético asociado; no obstante el salto a nuevas tecnologías en los equipos electrónicos puede suponer un aumento en el consumo energético.

**Un análisis energético del ciclo de vida de los PCs —sin monitor ni otros periféricos—, realizado por la Universidad Técnica de Berlín, obtuvo, entre otras, la conclusión de que la fabricación de una CPU en 2003 requería un 10 % menos de energía primaria que en 1999 (19).**

**Un ejemplo de esto se puede encontrar en un estudio realizado sobre teléfonos móviles, en el que se compara el consumo energético debido a la fabricación de móviles de segunda y tercera generación.**

**Se concluye que:**

- ♦ Para una tecnología ya establecida, se observa una disminución firme con el tiempo del consumo de energía en el proceso de fabricación de los equipos.
- ♦ Pero la introducción de una nueva tecnología, como es el salto de los equipos de segunda a tercera generación, supone por el contrario un incremento significativo en el consumo energético (10).

#### **Consumos en stand-by**

Llegados a este punto, convencidos de que la demanda de electricidad causada por aplicaciones electrónicas en el hogar y en las empresas puede aumentar aunque sea moderadamente en los próximos años, se ha comenzado a trabajar para mejorar la eficiencia del equipamiento, en particular para reducir los consumos cuando el equipo no está realizando su función principal o está apagado, es decir, en stand-by. Esta fase de uso ofrece un potencial de reducción muy importante.

**Según un estudio realizado en domicilios de los EE.UU., el consumo de los equipos en stand-by supone entre un 5 y un 26 % del consumo anual de electricidad de los hogares. Los principales causantes de este consumo son los televisores, set-top boxes e impresoras.**

**La gran variación de las pérdidas en stand-by para un mismo servicio demuestra que los fabricantes son capaces de reducir este consumo sin pérdida de funcionalidad (11).**

Entre los países de la OCDE se observa un incremento de la proporción de energía relacionada con los consumos en stand-by de los equipos. Dentro de su estrategia medioambiental (12) se pone de manifiesto la necesidad de regular estos consumos, dado que está creciendo rápidamente dentro del consumo eléctrico doméstico y en oficinas, y existe un importante potencial de reducción.



Datos de 2000 para la OCDE hablan de un consumo asociado a *stand-by* de aproximadamente un 2 % del consumo eléctrico total de los países (13).

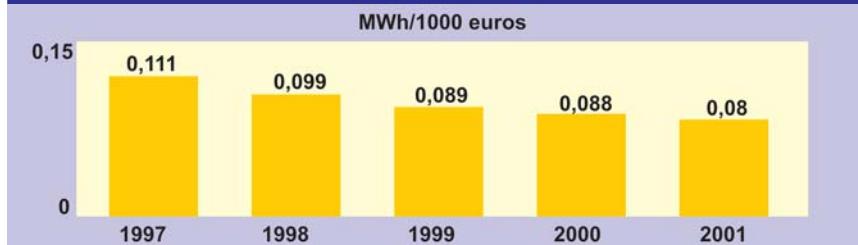
### Uso de energía en los operadores de red

Uno de los impactos ambientales más significativos de los operadores de telecomunicación es el consumo energético de sus redes, usado tanto para su alimentación, como para los equipos de frío necesarios para su climatización. Los operadores son, también, consumidores de combustible para calefacción y para su flota de vehículos.

#### Datos de ETNO<sup>2</sup> (14)

Entre los operadores de telecomunicación firmantes de la política medioambiental de ETNO (Environmental Charter), un 74 % de sus emisiones de CO<sub>2</sub> se deben a su consumo eléctrico, aunque no todo esté asociado con sus infraestructuras de comunicaciones.

Este consumo se está reduciendo como consecuencia de las medidas de eficiencia energética puestas en marcha, a pesar de la expansión de sus redes, observándose una disminución progresiva del consumo eléctrico por facturación promedio de los operadores.



En el caso de Telefónica de España (15), el consumo eléctrico supone casi un 90 % del consumo total de energía. Del consumo eléctrico total, el 75 % es achacable a la red y en 2003 fue de 712 GWh (16), lo que supone un 0,32 % de la demanda eléctrica peninsular (27).

En el caso de Telefónica Móviles el consumo de energía eléctrica debido a la red representó el 87,5 % de la electricidad consumida por la empresa en 2003, y ascendió en la parte dedicada a la red 324 GWh —un 0,14 % de la demanda peninsular española— (16).

Deutsche Telekom realizó en 2000 una primera aproximación a las implicaciones ambientales de su red de telefonía fija, analizando una red urbana y una red rural y extrapolando los resultados a la totalidad de su red instalada en Alemania. En comparación con las redes de carreteras y de tren alemanas, se estimó que estas suponen entre 30 y 35 veces más intensidad energética que la red de esta operadora (18).

### Posibilidades de mejora: eficiencia energética

Las empresas del sector de las TIC son conscientes de su efecto medioambiental, de los impactos que sus actividades causan en el entorno y de las oportunidades de su labor para el desarrollo humano.

Tanto para los operadores de telecomunicación, como para los fabricantes de equipos electrónicos, esta toma de conciencia ha derivado en la necesidad de conocer en mayor profundidad sus efectos, para poder potenciar su contribución positiva, minimizando la negativa.

<sup>2</sup> European Telecommunications Network Operators



Dentro del sector de las tecnologías de la información y comunicaciones, algunos suministradores y proveedores de servicios, se han unido dentro de la iniciativa GeSI<sup>3</sup> para promover productos y servicios que beneficien al desarrollo humano y la sostenibilidad medioambiental.

En esta iniciativa, que está soportada por el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP) y por la ITU<sup>4</sup>, participan Bell Canada, BT, Telefónica, ETNO, Ericsson... (31).

Son muchos los operadores que incluyen dentro de sus compromisos de mejora la eficiencia energética.

Ya se ha visto en el apartado anterior, que las medidas de eficiencia están dando sus frutos, por ejemplo, en el caso de ETNO, se observó una evolución descendente del consumo energético por facturación.

**BT ha logrado parar el incremento en el consumo de electricidad, a pesar del crecimiento de su red, mediante una mejor gestión energética. En 2004 se ha reducido el consumo en unos 32 GWh, 5 de ellos en red y 27 en oficinas (33).**

Los fabricantes de equipos electrónicos también están en el diseño de nuevos productos más eficientes.

Telefónica de España ha puesto en marcha planes de eficiencia energética desde hace años. En particular, dentro de sus objetivos medioambientales para 2003, se contemplaban medidas de reducción del consumo de energía eléctrica para situarlo en valores similares a los del año 2000, tanto para edificios de gestión como para centrales.

Canon, en su informe de sostenibilidad de 2004, describe las medidas puestas en marcha, para reducir la demanda energética de sus productos, mediante la introducción de tecnologías de eficiencia energética bajo demanda, entre ellas, las encaminadas a reducir el consumo en modo stand-by en fotocopiadoras e impresoras.

En nuevos modelos de impresoras láser se han conseguido ahorros en el consumo energético del 82 % frente a modelos anteriores y en impresoras de tinta de hasta el 70 % (34).

Philips está trabajando en el diseño de productos con el compromiso de conseguir niveles de consumo energético un 10 % más bajo que el de modelos similares de sus competidores. Por ejemplo, uno de los productos diseñados con este objetivo es la televisión plana 30PF9975 Flat TVTM, que usa un 33 % menos de energía que tres modelos similares de sus competidores más cercanos, gracias al control de la iluminación de salida del equipo dependiendo de la iluminación ambiente.

Por otra parte, en Japón, empresas como Fuji Xerox, Nec Corporation, Toshiba, Mitsubishi, NTT... están también trabajando, dentro de la iniciativa Japan SIS Project, sobre la contribución de las tecnologías de las comunicaciones y de la información al desarrollo sostenible (32).

También desde las administraciones públicas se han puesto en marcha distintas iniciativas para reducir los consumos energéticos de los equipos, por parte de la Agencia Internacional de la Energía de la Unión Europea y a nivel regional.

Desde 1997 la Unión Europea ha llegado a varios acuerdos con fabricantes y asociaciones comerciales para reducir los consumos de stand-by para televisores, videos y equipos de audio. Posteriormente se aprobaron dos códigos de conducta, entre ellos uno para servicios de TV digital. En esta iniciativa participan empresas como Motorola, Alcatel, IBM, HP, etc.

Actualmente está en fase de borrador otro código de conducta sobre eficiencia energética de equipos de comunicación de banda ancha.

## Efecto energético de los servicios de telecomunicación

Aunque de modo inmediato se perciba que va a existir un aumento del consumo energético asociado a los nuevos servicios de telecomunicaciones, es desde una perspectiva global y a largo plazo donde sí se puede apreciar un ahorro de recursos energéticos.

<sup>3</sup> Global e-Sustainability Initiative

<sup>4</sup> International Telecommunication Union



**Se estima que, en el mejor de los casos, un 50 % de la energía utilizada en los procesos de fabricación de productos en la Unión Europea (de los 15) se ahorraría en 2020, gracias a la posibilidad que ofrecen las TIC de permitir que el consumidor pague por un servicio y no tanto por la adquisición de un producto. Las estimaciones más negativas indican un ahorro de sólo un 5 % (17).**

El cambio promovido por las nuevas tecnologías de la información está originando una metamorfosis: para satisfacer sus necesidades, los usuarios no requieren “adquirir un producto”, sino “acceder a un servicio”. El video bajo demanda o la prensa digital son ejemplos de servicios de telecomunicaciones que, de forma clara, influyen en la denominada “desmaterialización”, posibilitando funcionalidades sin incrementar el consumo de recursos naturales.

**Un estudio liderado por Deutsche Telekom en 2000 evaluó el impacto ambiental de T-Net-Box, un “gestor virtual” de su red telefónica fija, invisible al usuario, que permite disponer de servicio de contestador y almacenamiento de llamadas, así como de recepción y almacenamiento de faxes. Para ello se comparó la provisión de estos servicios utilizando TNet-Box, un contestador automático y un fax tradicional.**

**En el análisis se tuvieron en cuenta los impactos ambientales de su fase de fabricación y de su uso (respecto al fax y al contestador automático, se consideró sólo su consumo en modo stand-by).**

**En lo que se refiere al consumo energético, se concluyó que T-Net-Box implicaba un impacto 27 veces inferior al del contestador automático y 28 veces inferior que el del fax (18).**

**Un servicio similar, el contestador en red, cuenta en Telefónica de España con 11.901.202 usuarios (dato diciembre de 2004), lo que multiplica los efectos beneficiosos de este tipo de servicios.**

**La operadora japonesa de telecomunicaciones NTT Group ha estimado el consumo energético asociado a sus “páginas amarillas” comparando distintos formatos: papel, CDROM o versión electrónica.**

**Para estos cálculos se estimó la consulta de un usuario durante una hora al año.**

**Las conclusiones obtenidas indican que en relación con el consumo energético empleado para la producción de esta guía en papel:**

- ♦ la guía en CDROM (teniendo en cuenta la energía empleada en su producción y uso) supone un ahorro de un 96 % de consumo de energía
- ♦ la versión electrónica supondría un ahorro de energía cercano al 100 % (25).

Otras de las funcionalidades que ofrecen las TIC en relación con el uso eficiente de energía son los sistemas de control remoto de alumbrado o acondicionamiento del aire en edificios, que permiten actuar de acuerdo con las necesidades reales y optimizar el consumo energético.

**Los supermercados requieren gran cantidad de energía debido, fundamentalmente, a sus necesidades de refrigeración y alumbrado durante largas horas, por lo que los sistemas digitales de control remoto de aire acondicionado, calefacción, etc. ofrecen en este sector grandes ventajas.**

**Una tienda que abre 24 horas puede beneficiarse de un ahorro anual en costes energéticos de más de un 11 %, gracias a este tipo de sistemas (28).**



**Las telecomunicaciones también pueden contribuir de manera positiva a la gestión de la demanda eléctrica a nivel local o regional. Este es el caso de una iniciativa en Long Island (EE.UU.), denominada LipaEdge.**

**Se trata de un sistema voluntario de control remoto de energía, que ofrece una compañía eléctrica a particulares y pequeñas empresas que dispongan de sistemas de aire acondicionado centralizados. Consiste en el uso de termostatos accesibles vía Internet, a los que esta compañía puede acceder no más de siete veces durante el verano, entre las 2 y 6 de la tarde, en días de máxima demanda, para reducir el suministro eléctrico a los equipos que participan en esta iniciativa.**

**Se estima que para 5000 usuarios podrían ahorrarse 5 MW, es decir, la electricidad necesaria para 5000 viviendas de tamaño medio de Long Island (26).**

Algunos estudios consideran que las innovaciones sistemáticas a través del uso de las tecnologías de la información, serán muy importantes permitiendo mayor control, mejorando la calidad de los productos, la logística y la conversión de la energía descentralizada a niveles de alta eficiencia (30 al 80 %) (7). Sin embargo, no en todos los casos se observan efectos positivos con la digitalización de procesos.

**Un estudio realizado por Telefónica I+D en 2004 analizó la influencia ambiental de una de las aplicaciones informáticas disponibles en su intranet, concretamente una relacionada con la gestión interna de proyectos. Esta aplicación sustituye un proceso que anteriormente se basaba en la tramitación de un formulario en papel.**

**En base a las estimaciones realizadas, se concluyó que a pesar de que el proceso actual (a través de la intranet) supone un importante ahorro de papel, este se ve anulado por el incremento en el consumo energético de los equipos que intervienen (ordenadores, servidores, routers, etc).**

**La principal contribución al consumo energético del proceso *on line* está asociada al envío de correos electrónicos dentro de la intranet de la empresa. Se estimó que cada uno de ellos (envío y lectura por el destinatario) supone un consumo de 55,8 Wh de energía eléctrica.**

Aunque a lo largo de este artículo se ha presentado la influencia de las TIC sobre el consumo eléctrico, es preciso comentar también las posibilidades que ofrecen las telecomunicaciones en la reducción del transporte de personas o mercancías, con consecuencias positivas en la reducción del consumo de combustibles y de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Entre las aplicaciones que ofrecen un alto potencial en la reducción del consumo energético asociado al transporte podemos citar la videoconferencia o el comercio electrónico.

**En términos energéticos, se estima que una videoconferencia de 4 horas entre dos usuarios supone un impacto ambiental (18):**

- ♦ 30 veces menor que si uno de ellos se desplazara en coche y la distancia fuera de 100 km
- ♦ 500 veces menor que si el desplazamiento se realizará en avión y la distancia fuera de 1000 km

En el análisis de la influencia en el transporte de este tipo de servicios no hay que perder de vista la posibilidad de que surjan los denominados “efectos rebote” que reduzcan los beneficios ambientales estimados inicialmente. Por ejemplo, la facilidad de iniciar y mantener relaciones comerciales con empresas situadas al otro lado del globo terráqueo “a golpe de clic”, puede traer consigo la necesidad de



desplazamientos adicionales, en muchos casos aéreos, siendo el avión un medio de transporte poco eficiente energéticamente.

### **Las TIC como medio de sensibilización**

La sensibilización puede jugar un papel decisivo en el ahorro energético, ayudando a un uso más racional de los recursos energéticos. Por su amplia difusión, Internet es uno de los medios más empleados para la divulgación de buenas prácticas encaminadas al uso racional de la energía: es utilizado por distintos organismos para este tipo de concienciación.

**El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, organismo público español, muestra cada día en su página web ([www.idae.es](http://www.idae.es)), un consejo distinto sobre ahorro energético, junto con una serie de buenas prácticas organizadas según distintos entornos (hogar, trabajo, transporte...).**

**Un ejemplo de la aplicación de las nuevas tecnologías a la divulgación de contenidos energéticos puede verse en una iniciativa educativa promovida por el grupo empresarial español Gas Natural, mediante la cual alrededor de 10.000 estudiantes de enseñanza secundaria de toda España podrán acceder a través de su portal en Internet ([www.gasnatural.com](http://www.gasnatural.com)) a una serie de actividades formativas orientadas al conocimiento y consumo responsable del gas natural.**

También es Internet el medio elegido por muchas empresas para divulgar sus compromisos y logros en el campo de la eficiencia energética.

El consumo de energía es un punto obligado para aquellos que quieran redactar su informe de sostenibilidad o responsabilidad corporativa de acuerdo con los criterios de GRI —*Global Reporting Initiative*—, que cada día se van convirtiendo más en un estándar para este tipo de informes.

### **Energías renovables y telecomunicaciones**

El uso de energías renovables, junto con medidas de eficiencia energética, puede reducir el impacto medioambiental del uso de la energía en las TIC. La energía renovable empleada con más frecuencia para el suministro de instalaciones de telecomunicaciones es la energía solar (fotovoltaica), a veces apoyada con la energía eólica.

**El Parque Nacional de Nahanni (Canadá), situado en el norte de Canadá, zona próxima a los territorios árticos: dispone de una estación de telecomunicaciones abastecida por un sistema híbrido fotovoltaico (20).**

**En España, Telefónica tiene 9 instalaciones de telefonía fija cuya fuente de energía es fotovoltaica, una de ellas complementada con energía eólica (21).**

**Las comunicaciones vía satélite también se ven beneficiadas de los avances tecnológicos en las energías alternativas. La empresa Sunwize Technologies ofrece un sistema de recarga de energía para teléfonos móviles por satélite Globalstar mediante el uso de una placa solar portátil. Este sistema también podría ser empleado en otros dispositivos electrónicos, como ordenadores portátiles, terminales móviles convencionales, PDAs... (22).**

**Asimismo, la compañía Promocell Export División ha presentado un pequeño cargador de energía solar para todo tipo de terminales móviles, útil también para otros dispositivos electrónicos, haciendo innecesario el consumo de energía eléctrica para la recarga de la batería (24).**



De igual modo que las energías renovables pueden potenciar el despliegue de las telecomunicaciones, estas también pueden contribuir a su implantación. La descentralización en la generación de electricidad puede ser posible gracias a sistemas de gestión y distribución basados en aplicaciones de TIC. De hecho, se estima que la influencia de las nuevas tecnologías de comunicaciones en las energías renovables se traducirá en 2020 en un incremento entre un 2 y un 7 % del total del suministro eléctrico en la UE de los 15 (17).

**El 80 % de los parques eólicos españoles son monitorizados o telemedidos en tiempo real por el operador del Sistema Eléctrico (Red Eléctrica Española) con el fin de controlar su producción y poder coordinarla con las de otras fuentes de energía(29).**

### Energía, desarrollo y telecomunicaciones

Hasta este punto se ha venido hablando del efecto de las TIC en la energía enfocado claramente a países con amplio grado de implantación de estas tecnologías, es decir, en países desarrollados.

Distinta es la situación y la problemática a tratar en países en desarrollo.

El atraso económico y social que sufren países de África, Latinoamérica y Asia está fuertemente ligado a la ausencia de infraestructuras, sobre todo en zonas rurales, que desde la perspectiva del mundo más desarrollado, son imprescindibles —abastecimiento de agua potable, carreteras, etc.—.

En un informe de WBCSD<sup>5</sup> sobre la demanda energética y el cambio climático, se considera a la energía como el combustible del crecimiento, requisito esencial para el desarrollo económico y social (30).

El abastecimiento eléctrico es otro claro ejemplo de una infraestructura fundamental para el desarrollo económico básico, escasa en zonas poco desarrolladas, y en lo que nos concierne, influye de manera decisiva en el despliegue y desarrollo de las telecomunicaciones en estos entornos.

Las energías renovables son una solución en lugares en los que no es viable por motivos económicos, la generación y distribución de energía eléctrica por medios “convencionales”. También pueden existir motivos geográficos —zonas de difícil orografía— o sociales —poblaciones escasas y viviendas dispersas— que dificultan la instalación de líneas de transporte de energía eléctrica. Además, el uso de fuentes renovables contribuye en gran medida a que el consumo energético sea cada vez más sostenible.

Las administraciones públicas empiezan a ser conscientes del papel dinamizador que pueden jugar las telecomunicaciones en zonas en desarrollo, y fomentan programas destinados a favorecer su implantación, incorporando el suministro necesario de electricidad mediante fuentes de energía alternativas.

**En diciembre de 2004, la compañía Telvent ha firmado un acuerdo con el Ministerio de Negocios Exteriores y Cooperación de Mozambique para el despliegue de un sistema de telecomunicaciones rurales en las provincias de Gaza e Inhambane. Este sistema, para aplicaciones de voz fija, dará servicio telefónico a mas de 2,5 millones de personas, utilizando sistemas de paneles solares para el suministro de energía.**

<sup>5</sup> World Business Council for Sustainable Development. Coalición de 170 empresas internacionales, de más de 35 países y 20 sectores industriales.



**En Honduras, a través del Consejo Hondureno de Ciencias y Tecnologías (COHCIT), se ha promovido el desarrollo de cuatro Aldeas Solares. Este proyecto consiste en el despliegue de paneles fotovoltaicos que facilitan diversos servicios sociales.**

**Como muestra de la repercusión de esta iniciativa en cuanto a las telecomunicaciones, la última Aldea Solar situada en Campamento Viejo, Olancho, inaugurada en marzo de 2003, ha permitido la instalación y funcionamiento de una cabina telefónica pública que da servicio a 45 comunidades aledañas (23).**

### **Consideraciones finales**

A lo largo de este artículo se han analizado las interrelaciones entre las TIC y la evolución del consumo de energía.

Una de las evidencias identificadas es que aunque la implantación de las telecomunicaciones tiene amplios beneficios en la eficiencia de otros sectores industriales, comerciales y domésticos, va a conllevar probablemente un aumento moderado del consumo energético debido al incremento del equipamiento.

Por lo tanto, es preciso el avance en la investigación de mejoras en la eficiencia energética de redes y equipos de comunicaciones, así como compatibilizar el desarrollo tecnológico con la utilización de fuentes de energía alternativas menos contaminantes. Fabricantes de equipos, operadores de telecomunicaciones, organismos oficiales, etc. comienzan a ser conscientes de la necesidad de su contribución en el uso sostenible de la energía y ya están haciendo realidad iniciativas encaminadas a este reto mundial.

Los análisis energéticos actuales de las TIC están todavía sometidos a criterios subjetivos y estimaciones, por lo que no se observan resultados concluyentes que permitan cuantificar con rotundidad el impacto de las nuevas tecnologías sobre los recursos energéticos. En cualquier caso, hay que tener en cuenta todos los efectos ambientales resultantes de la incorporación de las TIC, ya que las disminuciones en el consumo de otros recursos o la reducción de los desplazamientos pueden compensar los efectos negativos del aumento del consumo eléctrico.

En todo caso, aunque el efecto global pueda ser positivo, esto no nos debe hacer olvidar la necesidad de hacer un uso racional de la energía, y trabajar por la mayor eficiencia en su uso. ■

### **Bibliografía**

1. Electricity requirements for a digital society. Walter Baer, Scott Hassell, Ben Vollaard. (2002)
2. Dig more coal – PCs are coming (31/5/99). *Forbes Magazine*.
3. Ernest Orlando Laurence. Berkeley National Laboratory. Memorandum 9/12/1999.
4. Environmental implications of product servicing. The case of outsourced computing utilities. Doctoral Dissertation, September 2004. Andrius Plepys. Lund University.
5. Resource intensity and desmaterialization potencial of information society technologies. Hilty, Ruddy, Schulthess (2000). Solothurn University of Applied Sciences North-Western Switzerland.
6. Energy consumption by office and telecommunications equipment in commercial building. Roth, Goldstein, Kleinman (2002).
7. Steps toward a sustainable development. A white book for R&D of energy efficient technologies. Novatlantis. (March 2004).
8. Sistema eléctrico español. Avance del informe 2004. [http://www.ree.es/cap07/pdf/infosis/Avance\\_REE\\_2004.pdf](http://www.ree.es/cap07/pdf/infosis/Avance_REE_2004.pdf)



9. Energía y desarrollo sostenible. D. Corredor, P. Fernández. *Física y sociedad* nº 15. Noviembre 2004.
10. Is small green? Life Cycle aspects of technology trends in microelectronics and micro-electronics and Microsystems. K. Schischke, H. Gries.
11. Whole house measurement of standby power consumption. J.P Ross, University of California; A. Meier, Lawrence Berkeley National Laboratory.
12. Highlights OECD Environmental Strategy: 2004Review of progress.
13. Global implications of standby power use. B. Lebot, IEA France; A. Meier, Berkeley Lab.; A. Anglade, ADEME. (2000)
14. Sustainable ... together. The 2002 ETNO Environmental Report.
15. Informe de evaluación de la gestión medioambiental de Telefónica de España 2003. (julio 2004)
16. Informe anual de responsabilidad corporativa 2003. <http://www.telefonica.es>
17. The future impact of ICTs on environmental sustainability, Lorenz Erdmann, Lorenz Hilty, James Goodman, Peter Arnfalk, IPTS, agosto 2004,
18. The environmental impact of the new economy: Deutsche Telekom, telecommunications services and the sustainable future. Markus Reichling and Tim Otto. *The Ecology of the New Economy*, 2002
19. Life Cycle Energy Analysis of PCs – Environmental Consequences of Lifetime Extension Through Reuse, Karsten Schischke, Rolf Kohlmeyer, Hansjoerg Gries, Herbert Reicht. Environmental Assessment in the Information Society, 3-4 december 2003, Lausanne, Switzerland.
20. [http://www.canren.gc.ca/tech\\_appl/index.asp?CaID=5&PgID=267](http://www.canren.gc.ca/tech_appl/index.asp?CaID=5&PgID=267)
21. Memoria de sostenibilidad 2003 de Telefónica de España (<http://www.telefonica.es/publicaciones>)
22. <http://www.sunwize.com/products/images/PESglobalstar3.pdf>
23. [http://www.casapresidencial.hn/2003/03/03\\_2.php](http://www.casapresidencial.hn/2003/03/03_2.php)
24. <http://www.iran-daily.com/1383/2159/pdf/8-energy.pdf>
25. NTT Group Environmental Protection Activity Report 2001 <http://www.ntt.co.jp/kankyo/e/2001/report/>
26. [http://www.comfortchoice.carrier.com/details\\_printable/1,1228,CLII\\_DIV17\\_ETI902\\_LID,00.html?SMSESSION=NO](http://www.comfortchoice.carrier.com/details_printable/1,1228,CLII_DIV17_ETI902_LID,00.html?SMSESSION=NO)
27. Red Eléctrica Española. Informe 2003 "El sistema eléctrico español"
28. Retail chains realize savings with remote monitoring and control, Mark Duszynski, Johnson Controls Inc, Energy Manager, may 2000
29. [http://www.ree.es/apps/index\\_dinamico.asp?menu=/cap07/menu\\_sis.htm&principal=/apps\\_eolica/curvas2.asp](http://www.ree.es/apps/index_dinamico.asp?menu=/cap07/menu_sis.htm&principal=/apps_eolica/curvas2.asp)
30. Facts and trends to 2050. Energy and climate change. World Business Council for Sustainable Development
31. <http://www.gesi.org>
32. <http://www.japensis.jp>
33. <http://www.btplic.com/Societyandenvironment/Socialandenvironmentreport/Environment/Fuelenergyandwater/Energyconsumption.htm>
34. <http://www.canon.com/environment/eco2004e/p15.html10>

# Distorsión de la forma de onda en los alternadores LETAG instalados en ETECSA

Por Ing. Ing. Onaldo Ramírez Matos, Especialista C en Telemática, Dirección Territorial Sancti Spíritus, y Ramón Leonardo Vázquez Fonte, Especialista C en Telemática, Dirección Territorial Las Tunas, ETECSA  
onaldo.ramirez@eteca.cu, siesp@ltu.eteca.cu

## Introducción

Hoy en día, en las mayorías de nuestras instalaciones de telecomunicaciones existen serias dificultades con la calidad de la energía eléctrica, ya sea la distribuida por la Organización Básica Eléctrica (OBE) o por la generada por los propios grupos electrógenos instalados. Existen protecciones que se disparan inoportunamente, paneles o cuadros eléctricos que vibran y se calientan, calentamientos en cables conductores, niveles de tensión fuera de normas, todo esto indica la existencia de un posible problema en un sistema de distribución eléctrica. Resulta útil conocer que estos síntomas indican la existencia de algún problema en el sistema o instalación eléctrica. Pero, ¿dónde empieza la búsqueda para aislar la causa exacta de estos problemas de calidad de la electricidad?

El sistema eléctrico tiene un punto de conexión que es el cuadro general eléctrico de distribución o Pizarra General de Distribución (PGD), suele llamarse de esta forma por los técnicos de la especialidad en la Empresa, puesto que se trata de un punto común para la distribución de energía a circuitos derivados. La PGD es el lugar adecuado para conocer el estado del sistema eléctrico, incluso, para localizar problemas ubicados dentro de la red eléctrica de distribución interna, las medidas efectuadas desde la pizarra de distribución permiten identificar la cuantía del problema. Algunos problemas pueden descubrirse mediante una inspección visual rápida, mientras que otros requieren llevar a cabo medidas de cumplimiento a mediano o largo plazo.

## Búsqueda de la causa del problema

Para la búsqueda de las causas que originan los problemas de la calidad de energía eléctrica que necesitan los consumidores de las instalaciones se pueden utilizar instrumentos de mediciones que sean capaces de medir y almacenar los principales parámetros eléctricos que determinan que todos estos estén dentro de las normas estándar internacionales. Antes de comenzar la inspección, se tuvieron en cuenta seis categorías o elementos que pueden causar daños en la instalación [1]:

1. Nivel de tensión y su estabilidad en el suministro —caídas, huecos, cortes, subidas, *flicker*, etc—.

2. Equilibrio en las corrientes de fases.
3. Armónicos.
4. Conexión de los cables conductores a tierra.
5. Puntos calientes: conexiones o terminales sueltos.
6. Protecciones disparadas o dañadas.

Para este análisis se abordaban con más énfasis en los problemas.

El primer paso consiste en ver si los niveles y estabilidad de la tensión son los causantes del problema comprobando los niveles de tensión de los circuitos derivados, fase a neutro y en el lado de carga de los disyuntores y protecciones.

Nota: Al realizar las mediciones se tendrán presente las medidas de seguridad eléctrica.

Si los niveles de tensión son bajos en el disyuntor, en la carga serán aún menores.

Otras de las causas probables incluyen conexiones sueltas o en mal estado, grandes recorridos del cableado y transformadores sobre cargados, que crean una impedancia excesivamente alta —impedancia desde la carga a la fuente—.

Si se sospecha de la existencia de caídas intermitentes de tensión, se comienza a realizar, en el cuadro, sus medidas con

el objetivo de determinar si son caídas provocadas por cargas del propio circuito o están producidas por cargas de otras ubicaciones del sistema de distribución —incluidas caídas generadas por el suministro—. Las perturbaciones relativas a la generación suelen estar producidas por arranques de motores trifásicos de potencia, conectados a la misma fuente de energía o caídas originadas a nivel de suministro en la instalación. Si la caída es profunda y se aproxima a la discontinuidad de suministro la causa más probable será un fallo en la fuente energética. El suceso seguramente se reflejará en una posible avería y el consiguiente disparo del disyuntor, seguido por una reconexión automática del mismo.

### Equilibrio en las corrientes de fases

Se debe comprobar periódicamente el equilibrio del sistema y corriente de carga, debe medirse sobre cada una de las fases aguas arriba y la corriente en cada circuito derivado, receptor o carga. Al efectuar dichas medidas, es fundamental utilizar una pinza amperimétrica de verdadero valor eficaz o un multímetro digital de verdadero valor eficaz con una sonda de corriente. Una pinza amperimétrica de valor medio no proporcionará una medida precisa, cuando la forma de onda de la corriente esté distorsionada. Este tipo de instrumento interpreta la forma de onda como una sinusoida independientemente si está distorsionada o no, por lo que tenderá a leer a la baja, lo que puede llevarle a asumir que los circuitos tienen menos carga de la real. Esto es lo que se busca al efectuar esta medida:

- ♦ La carga entre las tres fases debe ser lo más equilibrada posible. La corriente no equilibrada resultante volverá por el neutro y este ya tiene bastante trabajo.
- ♦ Ni los transformadores, ni las protecciones ni los circuitos derivados y sus conductores deben sobrecargarse a regímenes cercanos a sus máximas especificaciones. Es conveniente trabajar por debajo (desclasificarlos) para “tolerar” la presencia de armónicos.

Como regla general, se puede aplicar una fórmula sencilla para calcular esta desclasificación o reducción de los valores nominales especificados en los transformadores para cargas monofásicas, que son asignados también a los conductores. Se trata de un concepto bastante claro: *Crest Factor* (CF).

El Factor de Cresta [2] es igual a la amplitud del pico de la forma de onda dividida por el valor de la Raíz Media Cuadrática (RMS) (Figura 1). El propósito del cálculo de este factor es dar al analista una rápida idea del impacto que está ocurriendo en la forma de onda.

En una perfecta onda sinusoidal, con una amplitud de “1”, el valor RMS es igual a 0,707, y el CF es entonces igual a 1,41. Una perfecta onda sinusoidal no contiene impactos y, por lo tanto, el CF con un valor superior a 1,41 implica que hay algún grado de impacto en la forma de onda del tiempo.

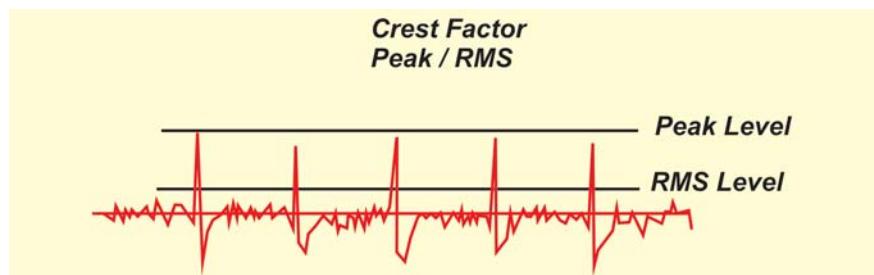


Figura 1 Relación del voltaje de pico entre el voltaje RMS y CF

### Armónicos

Una forma rápida de verificar la presencia y nivel de armónicos, es la de medir la corriente y frecuencia en el conductor de neutro. Si existen armónicos —en este caso armónicos “triples” o de orden 3 y sus múltiplos— la corriente oscilará entre un 80 y un 130 % de la corriente nominal de fase. Este curioso fenómeno se produce aunque el equilibrio del sistema sea perfecto y ocasiona la circulación de corrientes importantes por los conductores de neutro.

Las corrientes armónicas impares múltiples de 3 circulan por el conductor neutro. Los terceros armónicos de cada fase (A, B y C) vibran en fase. No se compensan vectorialmente como ocurre con las corrientes fundamentales, cuyo desfasaje ideal es de 120°. En muchas ocasiones, en las instalaciones, estas corrientes por el conductor de neutro superan bastante lo esperado, incluso, para corrientes no equilibradas. Aunque la mayoría de los especialistas conocen el hecho de que las corrientes del tercer armónico —denominadas también de secuencia cero—, generadas por cargas no lineales se añaden al neutro.

Básicamente, al mismo tiempo que existe un desfase de 120 grados entre las corrientes de cada una de las tres fases, las corrientes armónicas de orden 3 se caracterizan porque vibran en fase, sumándose y circulando por la única salida posible que es el conductor de neutro. Es decir, todos alcanzan sus picos y puntos de cruce por cero prácticamente al mismo tiempo —en realidad, existe un cambio de fase, pero es muy pequeño comparado con el de los armónicos de orden diferente—.

En estas circunstancias, el tamaño del conductor neutro se convierte en una preocupación. El neutro debe conducir no sólo corriente proveniente de desequilibrios del sistema, sino también de la suma de las

corrientes de todos los armónicos “triples”. En algunas instrucciones técnicas internacionales, se establece que “En instalaciones interiores, para tener en cuenta las corrientes armónicas debidas a cargas no lineales y posibles desequilibrios, salvo justificación por cálculo, la sección del neutro será como mínimo igual a la de las fases.” En efecto, se necesita que el conductor de neutro sea al menos igual al tamaño de los conductores de fase.

Pero, esto puede resultar insuficiente y, en algunos casos, es recomendable que la sección del conductor de neutro sea 1,3 veces de la sección de los conductores de fases. Es habitual la presencia de neutros compartidos, la presencia de armónicos triples en una parte de la instalación se reflejará en el resto de la misma e, incluso, se añadirán; la corriente que circula por ellos no puede controlarse. El riesgo de quemado e incendio es elevado. Después de todo, hay que pensar en que el neutro no lleva protecciones que eviten esta peligrosa sobrecarga. Una medida de tensión tierra-neutro también indicará si el neutro tiene demasiada carga o si la impedancia del transformador es demasiado alta.

La tensión tierra-neutro suele estar sobre los 0,25 V en el cuadro, mientras que el valor real depende de la distancia al transformador. Cualquier valor por encima de 0,5 V debe anotarse e investigarse.

¿Qué ocurre si, en condiciones normales, la tensión tierra-neutro es prácticamente cero? Posiblemente sea un problema real de conexiones y ante conexiones de tierra inseguras e ilegales.

### Conexión a tierra

Las conexiones tierra-neutro en cuadros secundarios suponen una violación de normativa técnica. Las conexiones tierra neutro deben realizarse en el transformador —aunque la normativa permite elaborar el cuadro principal—. En cualquier caso, nunca

deben realizarse aguas abajo de la PGD, en cuadros auxiliares de distribución, porque existe la probabilidad de retornos de corrientes por el cable de tierra. Cuando se efectúa una conexión tierra-neutro en un panel secundario o transferenciales de emergencia, la ruta de conexión a tierra se convierte en una ruta de retorno paralela para la corriente de carga normal, lo que proporciona cierta corriente en el conductor de protección conectado al sistema de tierra. ¿Cuál es una corriente a tierra normal y cuál no?

Para determinarlo, un método lógico es medir la corriente en el conductor de neutro y, después, la corriente del cable de conexión a tierra. Si la corriente de neutro es, 35 Amp, y la corriente de conexión a tierra es de 1 Amp, es más probable que la corriente de conexión a tierra sea una corriente de fuga. Si en el conductor de neutro se tiene 20 Amp y la corriente de conexión a tierra es de 10 Amp, es posible que existan conexiones tierra-neutro cableadas aguas debajo de la PGD.

Las conexiones tierra-neutro también pueden existir en receptores e, incluso, en la propia carga por lo que se utilizaría esta misma técnica para medir corrientes de tierra en circuitos derivados del cuadro eléctrico.

Según el manual LETAG, S.A. los fabricantes dan los límites de la distorsión de la forma de onda, donde se dice que “La distorsión de la forma de onda, tanto a circuito abierto (vacío), como bajo carga lineal trifásica equilibrada, la distorsión total es inferior al 3,5 %” [3]. Los devanados tienen un “paso acortado” de aproximación 2/3; y así, en la práctica, casi se eliminan las armónicas impares múltiplos de 3—tercera, novena, decimoquinta, etc—, cuando se opera en paralelo con la red eléctrica de distribución, este “paso acortado” de aproximación 2/3, elimina casi a cero la intensidad de corriente por la conexión del neutro del alternador y, además, permite el funcionamiento sin dificultades, con cargas eléctricas no lineales.

Para verificar la distorsión de la forma de onda a circuito abierto en los generadores, se utilizó el analizador de redes eléctrica trifásico marca CHAUVIN ARNOUX, modelo C.A 8334 (QUALISTAR).

Este instrumento está diseñado para realizar mediciones de verificación y de diagnóstico en las redes de baja tensión monofásicas, bifásicas o trifásicas. Para el cálculo de la Distorsión Total de Armónico —por su siglas en inglés, THD—, se utiliza la norma de la Comisión Electrónica Internacional —por su siglas en inglés, IEC— IEC 1000-4-7 y las fórmulas para los cálculos son las siguientes [4]:

- ♦ Cálculo de la tasa global de THD:

$$V_{THD}[i] = \sqrt[2]{\sum_{n=2}^{50} V_{\text{armónico}}[i][n]^2} / V_{\text{armónico}}[i][1] \quad 1$$

$V_{THD}$ : Distorsión Total Armónica de Tensión Simple

I: fase (0;1;2) n: rango (2...50)

- ♦ Cálculo del Factor de Distorsión (DF):

$$V_{DF}[i] = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{n=2}^{50} V_{\text{armónico}}[i][n]^2} / V_{rms}[i] \quad 2$$

$V_{DF}$ : Factor de Distorsión de Tensión

## Medición de la distorsión total armónica en los dos alternadores sin carga conectada (vacío)

A continuación se muestran las mediciones en los dos generadores LETAG , de la dos máquinas emergentes que se ubican en los centros principales de ETECSA.



Figura 2 Imagen de los parámetros RMS, DC, THD, CF, PST y DF para los dos alternadores

En la figura 2, generada por el instrumento de medición C.A 8334, CHAUVI ARNOUX, se puede apreciar que el THD está fuera de los parámetros que propuso el fabricante menor al 3,5 % en [3], el THD real varía desde 4,5 % hasta el 4,8 %, el CF es de 1,47 y se encuentra por encima del valor que se recomienda para una onda sinusoidal perfecta, el CF para esta es igual a 1,41.

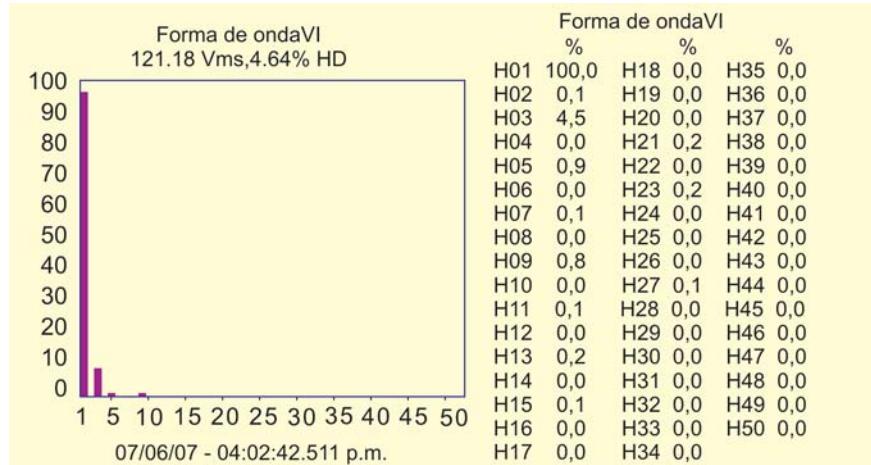


Figura 3 Forma de onda del voltaje y valores del voltaje RMS en la fase (V1) del alternador #1 en vacío

Como se observa en la figura 3, predominan las armónicas impares múltiplos de 3 —H03, H09, H15, H21, H27, H33, H49, etc—. Estas armónicas siempre van a circular por el conductor neutro del generador por lo que al transferirse para la carga se incrementa la corriente por el conductor neutro, las cargas no lineales generan armónicos de diferentes orden y puede que muchas de ellas generen armónicos impares múltiplos de 3 y aunque el circuito esté perfectamente balanceado en las tres fases donde la suma vectorial de las corrientes se cancelan para cargas lineales, en este caso en vez de cancelarse lo que hacen es sumarse y, por lo tanto,

aumenta la corriente por este conductor. El valor eficaz de la intensidad de esta corriente del conductor neutro es simplemente igual a la suma aritmética de las tres corrientes armónicas de orden y múltiplo de 3, esto es válido para todo circuito trifásico equilibrado.

## Conclusiones

La distorsión de la forma de onda de un generador eléctrico, THDv, CF, etc., produce efectos no deseados en la calidad de energía que requieren los equipos eléctricos por ejemplo, disparo de interruptores, desconexión de UPS, calentamiento en el conductor neutro, sobrecarga en dicho conductor, incremento del ruido en modo común —tensión neutro-tierra—.

Las cargas no lineales y sus correspondientes armónicos ponen en cuestionamiento el paradigma o la norma clásica de considerar el calibre del neutro con una capacidad igual o menor a la de las fases. El tercer armónico de corriente en el conductor neutro, incrementa la tensión neutro-tierra y disminuye la capacidad amperimétrica de dicho conductor.

## Referencias bibliográficas

[1] Fluke Ibérica, F.L. "Medidas de mantenimiento desde el cuadro eléctrico". Nota de aplicación. (Mayo 2002). Disponible en: [http://www.adler-instrumentos.es/imagenes\\_web/notas\\_aplicacion/Medidas%20de%20mantenimiento%20desde%20el%20cuadro%20el%C3%A9ctrico.pdf](http://www.adler-instrumentos.es/imagenes_web/notas_aplicacion/Medidas%20de%20mantenimiento%20desde%20el%20cuadro%20el%C3%A9ctrico.pdf) (Consulta: agosto/2008).

[2] Friedman, Alan "¿Qué es Factor Cresta y por qué se usa?". Disponible en: <http://www.dliengineering.com/downloads/FactorCresta-spanish.pdf>. (Consulta: agosto/2008).

[3] Manual de alternadores de excitación rotativa sin escobillas. Serie 10 EXR, octubre, 1995.

[4] Chauvin, Arnoux. Analizador de red eléctrica trifásico CA 8334. Manual de Instrucciones, ed. español.

# Sistemas Fotovoltaicos

Por Ing. Nicasio Echarte del Sol, Especialista C en Telemática, Energético CSGT Villa Clara, e Ing. Emilio Ramón Cabrera Fernández, Especialista C en Telemática, Energético CSGT Cienfuegos, ETECSA  
[nicasio.echarte@etecsa.cu](mailto:nicasio.echarte@etecsa.cu), [emilio@cfg.etecsa.cu](mailto:emilio@cfg.etecsa.cu)

## Introducción

El fenómeno fotovoltaico fue descubierto en 1839 y las primeras celdas solares de selenio fueron desarrolladas en 1880. Sin embargo, no fue sino hasta 1950 que se desarrollaron las celdas de silicio monocristalino que actualmente dominan la industria fotovoltaica. Las primeras celdas de este tipo tenían una eficiencia de conversión de sólo 1%; ya, para 1954, se había logrado incrementar la eficiencia al 6% en condiciones normales de operación, mientras, en el laboratorio, se lograron eficiencias cercanas al 15%. Las primeras aplicaciones prácticas se hicieron en satélites artificiales. En 1958 fueron utilizadas para energizar el transmisor de respaldo del Vanguard 1, con una potencia de cinco mili-watts. Desde entonces, las celdas fotovoltaicas han proporcionado energía prácticamente a todos los satélites artificiales, incluyendo el Skylab.

En la actualidad están siendo usadas comúnmente alrededor del mundo para aplicaciones agroindustriales como el bombeo de agua, refrigeración, preservación de productos perecederos, desalación de agua, repetidores de radio y televisión, viviendas, edificios, iluminación de avenidas, escuelas, consultorios médicos y otros.

En 1982 se construyó la primera planta fotovoltaica de potencia, con una capacidad de 1MW. Esta planta generaba suficiente electricidad para satisfacer las necesidades de 300 a 400 casas-habitación en su zona de servicio. Después, se instaló otra planta fotovoltaica de potencia con una capacidad de 6,5 MW, energía eléctrica suficiente para abas-

tecer las necesidades de más de 2,300 casas típicas en el área.

Las celdas solares fotovoltaicas son dispositivos que convierten la luz solar directamente en electricidad, sin necesidad de equipos mecánicos. Las celdas solares están hechas de delgadas capas de material semiconductor, usualmente silicio, están unidas a contactos de metal para completar el circuito eléctrico y encapsuladas en vidrio o plástico.

La forma más popular de arreglo fotovoltaico está hecha de paneles planos y puede responder a la luz difusa del cielo —puede producir electricidad aun en días nublados, aunque su rendimiento disminuye—. Los paneles fotovoltaicos planos pueden estar fijos en un soporte o moverse para seguir la trayectoria del sol [1].

En Cuba, se comenzó en 1986 con un programa de electrificación rural para médicos de la familia con sistemas fotovoltaicos independientes. Este programa tuvo un gran impacto social y permitió estudiar el comportamiento de los sistemas centralizados para uso comunitario, además de conocer el funcionamiento de estos sistemas en condiciones de clima tropical, el efecto de la alta temperatura —aspecto de especial interés para lograr la efectividad de futuras inversiones en el campo de la energía renovable y, en particular, la fotovoltaica [2].

Las buenas comunicaciones son esenciales para mejorar la calidad de vida en áreas alejadas. Sin embargo, el costo de energía eléctrica para hacer funcionar estos sistemas y el alto costo de mantenimiento de los sistemas convencionales han limitado su uso. La utilización de los Sistemas Fotovoltaicos (FV) —del inglés, *Photovoltaic Systems* (PV)—

ha permitido solucionar una serie de problemas presentados en la Empresa en la expansión y modernización de la red de telecomunicaciones, sobre todo, en la Red Inalámbrica de Área Local —del inglés, *Wireless Local Area Network (WLAN)*—, la Terminal de Red Inalámbrica —del inglés, *Wireless Network Terminal (WNT)*— y los Sistemas Móviles Celulares.

## Funcionamiento FV

La producción de la energía eléctrica a partir del sol está basada en el fenómeno físico denominado “efecto fotovoltaico”, que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de unos dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas. Estas células están elaboradas con silicio puro, uno de los elementos más abundantes, componente principal de la arena con adición de impurezas de ciertos elementos químicos —boro y fósforo—. Cada célula es capaz de generar una corriente de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,58 Voltios, utilizando como fuente la radiación luminosa. Las células se agrupan en serie de 10 a 36, formando los paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión (rebota); y la otra parte, debido a la transmisión —atraviesa la célula—.

Esta energía es recogida y conducida hasta un controlador o regulador de carga, el cual tiene la función de enviar toda o parte de esta energía hacia el banco de baterías que es el lugar donde es almacenada, y donde se tiene el cuidado de no excederse en los límites de sobrecarga; en algunos diseños, parte de esta energía es enviada directamente a las cargas.

La energía almacenada es utilizada para abastecer las cargas durante la noche o en días de baja insolación, o cuando el arreglo fotovoltaico es incapaz de satisfacer la demanda por sí solo. Si las cargas a alimentar son de corriente directa, esto puede hacerse directamente desde el arreglo fotovoltaico o desde la batería; en cambio, si las cargas son de corriente alterna, la energía proveniente del arreglo y de las baterías —limitada por el controlador— es enviada a un inversor de corriente, el cual la convierte a corriente alterna.

Cada célula fotovoltaica está compuesta por dos láminas de silicio delgadas —u obleas—, *P* y *N*, separadas por un semiconductor. Los fotones procedentes de la fuente luminosa inciden sobre la superficie de la capa *N* y, al interactuar con el material, liberan electrones de los átomos de silicio, los cuales, en movimiento, atraviesan la capa de semiconductor, pero no pueden volver. La capa *N* adquiere una diferencia de potencial respecto a la *P*. Si se conectan unos conductores eléctricos a ambas capas y estos, a su vez, se unen a un dispositivo o elemento eléctrico consumidor de energía, se iniciará una corriente eléctrica continua —los electrones se mueven siempre en el mismo sentido y de los potenciales más bajos a los más altos—. Este conjunto de células está envuelto por unos elementos que le confieren protección frente a los agentes externos y rigidez para acoplarse a las estructuras que los soportan. En la figura 1, se muestra el efecto fotovoltaico en una célula [3].

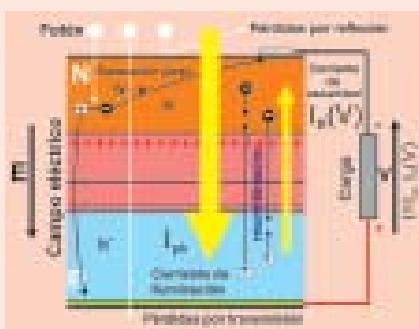


Figura 1 Efecto fotovoltaico en una célula solar [4]

Un panel fotovoltaico está formado por un conjunto de células solares conectadas eléctricamente entre sí, en serie y paralelo, hasta conseguir el voltaje y la corriente adecuados para su utilización. En la figura 2, puede observarse un corte transversal de un panel fotovoltaico; y en la figura 3; una vista frontal del mismo.



Figura 2 Corte transversal de un panel fotovoltaico [4]

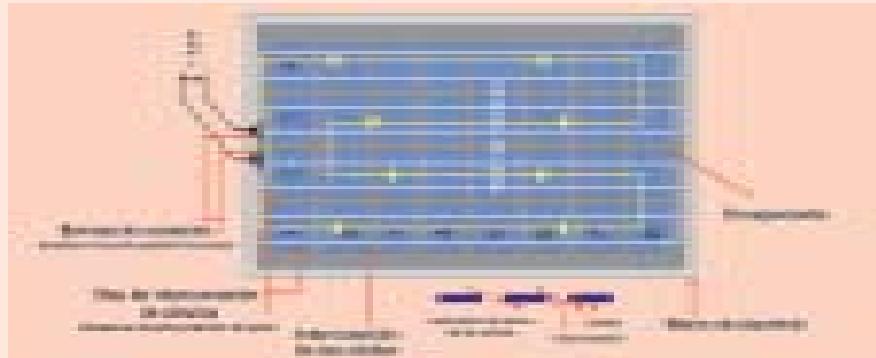


Figura 3 Vista frontal de un panel fotovoltaico [4]

Los paneles fotovoltaicos están compuestos por células fotovoltaicas de silicio **monocristalino, policristalino o amorfas**. La diferencia entre ellas radica en el procedimiento de fabricación. Las células de silicio monocristalino se obtienen a partir de silicio muy puro, que se refunde en un crisol junto con una pequeña proporción de boro. Una vez que el material se encuentra en estado líquido se le introduce una varilla con un **cristal germen** de silicio, que vuelve a crecer con nuevos átomos procedentes del líquido, y quedan ordenados siguiendo la estructura del cristal. De esta forma se obtiene una monocristal dopado, que luego se corta en obleas de aproximadamente 3 décimas de milímetro de grosor.

Estas obleas se introducen después en hornos especiales, dentro de los cuales se difunden átomos de fósforo que se depositan sobre una cara y alcanzan una cierta profundidad en su superficie. Posteriormente, y antes de realizar la serigrafía para las interconexiones superficiales, se recubren con un tratamiento antirreflexivo de óxido de titanio o zirconio.

En las células policristalinas, en lugar de partir de un monocristal, se deja solidificar lentamente sobre un molde la pasta de silicio, con lo cual se obtiene un sólido formado por muchos pequeños cristales de silicio, que pueden cortarse luego en finas obleas policristalinas.

Las células amorfas —*a=sin, morfo=forma*—, como su nombre lo indica, no poseen una estructura cristalina. Precisamente esa simplificación en la estructura conduce a un abaratamiento drástico de las mismas. La eficiencia de un panel es mayor cuanto mayor son los cristales; pero, también, su peso, grosor y costo. La tabla 1 refleja la eficiencia de cada panel FV según el tipo de célula con que está confeccionado.

| Tipo Panel      | Rendimiento laboratorio | Rendimiento directo | Características  | Fabricación  |
|-----------------|-------------------------|---------------------|--|--|
| Monocristaliano | 24 %                    | 15-18 %             | Es típico los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralsky) | Se obtiene de silicio puro fundido y se dopa con boro  |
| Policristalino  | 19 - 20 %               | 12-14 %             | La superficie está estucurada en cristales y contiene distintos tonos de azules                  | Igual que el del monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización              |
| Amorfas         | 16 %                    | <10 %               | Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible en células                    | Tiene la ventaja de depositarse en forma de láminas delgadas y sobre sustrato como vidrio o plástico |

Tabla 1 Eficiencia de cada tipo de panel FV según los tipos de células [4]

La producción de electricidad varía linealmente a la luz que incide sobre el panel; un día enteramente nublado equivale aproximadamente a un 10 % de la intensidad total del sol, y el rendimiento del panel disminuye en proporción a este valor.

El rendimiento de un panel fotovoltaico depende de la intensidad de la radiación luminosa y de la temperatura de las células solares [3].

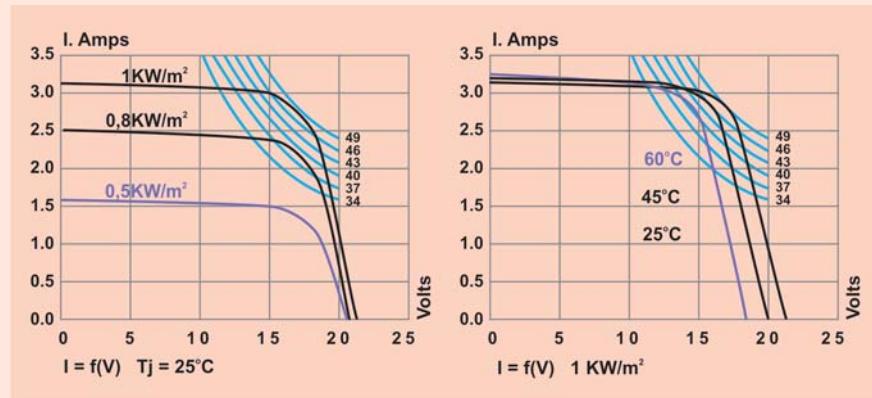


Figura 4 Variación de intensidad y tensión con la radiación y la temperatura según potencia nominal [1]

En la figura 4 se puede observar cómo la intensidad de corriente que genera el panel aumenta con la radiación, y el voltaje permanece aproximadamente constante. En este sentido, tiene mucha importancia la colocación de los paneles —su orientación e inclinación respecto a la horizontal—, porque los valores de la radiación varían a lo largo del día en función de la inclinación del sol respecto al horizonte.

El aumento de temperatura en las células supone un incremento en la corriente; pero, al mismo tiempo, una disminución mucho mayor, en proporción, de la tensión. El efecto global es que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura de trabajo del mismo. Una radiación de 1,000 W/m<sup>2</sup> es capaz de calentar un panel unos 30 grados por encima de la temperatura del aire circundante, lo que reduce la tensión en  $2 \text{ mV}/(\text{célula}^*\text{grado}) * 36 \text{ células} * 30 \text{ grados} = 2,16 \text{ Voltios}$  y, por lo tanto, la potencia en un 15 %. Por ello, es importante colocar los paneles en un lugar en el que estén bien ventilados. En condiciones ideales el rendimiento del sistema puede mejorar hasta un 40 %, no obstante

el mayor costo que supone no compensa el aumento que se consigue. Su aplicación se limita a aquellos casos en que el mayor rendimiento coincide con la mayor demanda —es el caso de sistemas de bombeo para el ganado en regiones muy secas—.

La intensidad de la luz solar que alcanza nuestro planeta varía según el momento del día y del año, el lugar y las condiciones climáticas. La energía total registrada sobre una base diaria o anual se denomina ‘radiación’ e indica la intensidad de dicha luz. La radiación se expresa en Wh/m<sup>2</sup> por día o, también, en kWh/m<sup>2</sup> por día.

Con el fin de simplificar los cálculos realizados en base a la información sobre radiación, la energía solar se expresa en equivalentes a horas de luz solar plena. La luz solar plena registra una potencia de unos 1,000 W/m<sup>2</sup>; por lo tanto, una hora de luz solar plena equivale a 1 kWh/m<sup>2</sup> de energía.

Esta es, aproximadamente, la cantidad de energía solar registrada durante un día soleado de verano, con cielo despejado, en una superficie de un metro cuadrado, colocada en perpendicular al sol.

La radiación varía según el momento del día. Sin embargo, también puede variar considerablemente de un lugar a otro, especialmente en regiones montañosas. La radiación fluctúa entre un promedio de 1,000 kWh/m<sup>2</sup> al año, en los países del norte de Europa —tales como Alemania—, y 2,000 a 2,500 kWh/m<sup>2</sup> al año, en las zonas desérticas. Estas variaciones se deben a las condiciones climáticas y a la diferencia con respecto a la posición relativa del sol en el cielo elevación solar, la cual depende de la latitud de cada lugar —orientación y ángulo de inclinación— [4].

Para establecer las dimensiones de los sistemas FV, es necesario conocer la insolación diaria promedio, preferiblemente para cada mes del año. La insolación diaria promedio comúnmente se expresa en Horas Solares Pico —del inglés, *Peak Sun Hour* (HSP)—. Una hora solar pico es

la energía recibida durante una hora, a una irradiancia promedio de  $1 \text{ kW/m}^2$ . Es decir,  $1 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$  es igual a 1 HSP. En la figura 5, puede observarse más fácilmente este concepto. No se debe confundir las HSP con las “horas luz”, que corresponden a la duración del día. Las HSP son relevantes para el diseño de sistemas FV. La insolución diaria promedio varía entre 3 y 7 HSP dependiendo del lugar.

La potencia pico de un panel es la potencia de salida, en Watts, que produce un panel fotovoltaico en condiciones de máxima iluminación solar, con una radiación de aproximadamente  $1 \text{ kW/m}^2$  —que se produce en un día soleado al mediodía solar— [5].

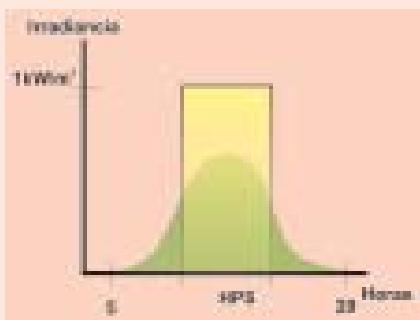


Figura 5 Definición de HSP [6]

## Orientación de los paneles FV

La luz solar viaja en línea recta desde el Sol hasta la Tierra. Al penetrar a la atmósfera terrestre, una parte se dispersa y otra cae sobre la superficie en línea recta. Finalmente, una última parte es absorbida por la atmósfera. La luz solar dispersa se denomina radiación difusa o luz difusa. La luz del sol que cae sobre la superficie sin dispersarse ni ser absorbida es, por supuesto, radiación directa. Debido a los baños de sol y al trabajo al aire libre, la radiación directa es la más intensa.

Un panel solar genera electricidad, incluso, en ausencia de luz solar directa. Sin embargo, las condiciones óptimas de operación implican: la

presencia de luz solar plena y un panel orientado lo mejor posible hacia el Sol, con el fin de aprovechar al máximo la luz solar directa. En el Hemisferio Norte, el panel deberá orientarse hacia el Sur y en el Hemisferio Sur, hacia el Norte; en nuestro caso para el Sur.

## Ángulo de inclinación e incidencia

El ángulo de inclinación ( $\alpha$ ) es el formado entre la superficie colectora y la horizontal del lugar (Figura 6). Para un valor dado del ángulo de inclinación, dependiendo de la posición del sol sobre el horizonte, existirá un valor para el ángulo de incidencia ( $\beta$ ) que forma la perpendicular a la superficie de colección con los rayos incidentes.

Es preferible dar al ángulo de inclinación ( $\alpha$ ) un valor igual al de la latitud del lugar más  $10$  ó  $15^\circ$  —posición favorable para el invierno—, y aceptar una pequeña pérdida energética durante el verano [5], [7].

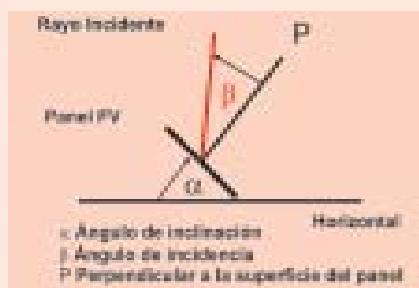


Figura 6 Ángulo de inclinación y de incidencia [5]

## Elementos de un Sistema FV

Un sistema fotovoltaico consta principalmente de los siguientes elementos:

- **Un generador solar:** compuesto por un conjunto de paneles fotovoltaicos, que captan la radiación luminosa procedente del Sol y la transforman en corriente continua a baja tensión ( $12$ ,  $24$  ó  $48 \text{ V}$ ) [8].

- **Un acumulador:** los acumuladores o baterías tienen una doble función, deben proveer de potencia a la carga cuando no haya luz solar disponible, y amortiguar las varia-

ciones de energía; la función de los paneles solares es recargar diariamente estas baterías o acumuladores. El tipo de acumuladores utilizados en los arreglos fotovoltaicos son los llamados de ciclo profundo, pueden ser como los tradicionales de plomo ácido o las baterías selladas libres de mantenimiento. No deben emplearse acumuladores automotrices porque no están diseñados para este propósito. Los acumuladores de ciclo profundo para los sistemas fotovoltaicos están diseñados para ser descargados lentamente durante muchas horas, sin ser recargados completamente por varios días o semanas, sin que por ello sufran daños y se reduzca su vida útil [9]-[12].

- **Un regulador de carga:** su misión es evitar sobrecargas o descargas excesivas al acumulador, que le produciría daños irreversibles, y asegurar que el sistema trabaje siempre en el punto de máxima eficiencia [13]-[16].

- **Un inversor (opcional):** los inversores transforman la corriente continua en corriente alterna. La corriente continua produce un flujo de corriente en una sola dirección, mientras que la corriente alterna cambia rápidamente la dirección del flujo de corriente de una parte a otra. Cada ciclo incluye el movimiento de la corriente primero en una dirección y luego en otra. En la figura 7 se muestran las tres formas de onda que puede entregar un inversor [17, 18].

La corriente alterna suministrada por una compañía eléctrica o por un gene-

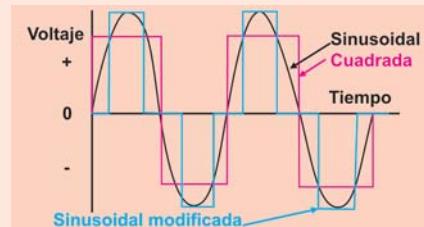


Figura 7 Diferentes formas de onda en corriente alterna [1]

rador diesel o gasolina es —o debería ser— como la que se muestra en la figura 7 en color negro. Los cambios en la magnitud de la tensión siguen una

ley sinusoidal, de forma que la corriente también es una onda senoidal.

La conversión de corriente continua en alterna puede realizarse de diversas formas. La mejor manera depende de cuánto ha de parecerse a la onda sinusoidal ideal para realizar un funcionamiento adecuado de la carga de corriente alterna:

♦ **Inversores de onda cuadrada:** la mayoría de los inversores funcionan haciendo pasar la corriente continua a través de un transformador, primero en una dirección y luego en otra. El dispositivo de conmutación que cambia la dirección de la corriente debe actuar con rapidez. A medida que la corriente pasa a través de la cara primaria del transformador, la polaridad cambia. Como consecuencia, la corriente que sale del secundario del transformador va alterándose en una frecuencia de ciclos completos por segundo. La dirección del flujo de corriente mediante la cara primaria del transformador se cambia muy bruscamente, de manera que la forma de onda del secundario es “cuadrada”, representada en la figura 7 mediante color magenta.

♦ **Inversores de onda sinusoidal modificada:** son más sofisticados y caros, y utilizan técnicas de ondulación de ancho de impulso. El ancho de la onda es modificada para acercarla lo más posible a una onda senoidal. La salida no es todavía una auténtica onda senoidal, pero está bastante próxima. El contenido de armónicos es menor que en la onda cuadrada. En la figura 7 se representa en color azul. Son los que mejor relación calidad/precio ofrecen para la conexión de iluminación, televisión o variadores de frecuencia.

Una vez almacenada la energía eléctrica en el acumulador hay dos opciones: sacar una línea directamente de este para la instalación y utilizar lámparas y elementos de consumo de 12, 24 ó 48 Vcc (Figura 7) o bien

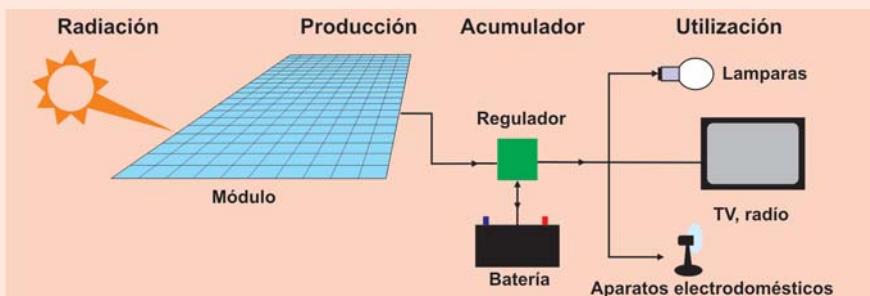


Figura 8 Una instalación solar fotovoltaica sin inversor, utilización a 12Vcc [1]

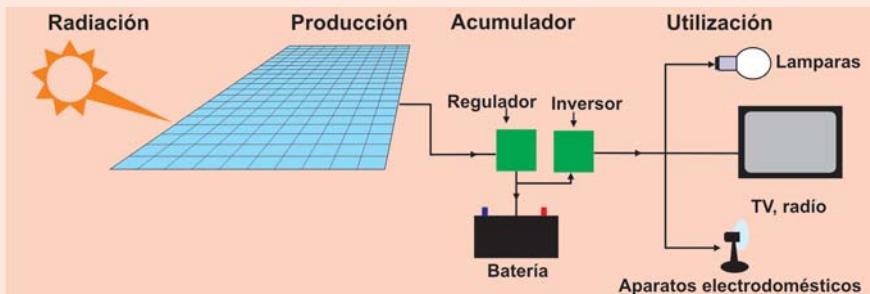


Figura 9 Una instalación solar fotovoltaica con inversor, utilización a 120/230Vca [1]

transformar la corriente continua en alterna de 120/230 V a través de un inversor (Figura 8) [4].

Prácticamente cualquier aplicación que necesite electricidad para funcionar se puede alimentar con un sistema fotovoltaico adecuadamente dimensionado. La única limitación es el costo del equipo y, en algunas ocasiones, el tamaño del campo de paneles. No obstante, en lugares remotos alejados de la red de distribución eléctrica, lo más rentable suele ser instalar energía solar fotovoltaica antes que realizar el enganche a la red.

Teniendo en cuenta que el panel carece de partes móviles y que las células y los contactos van encapsulados en una robusta resina sintética, se consigue una muy buena fiabilidad junto con una larga vida útil, del orden de 30 años o más. Además si una de las células falla, esto no afecta al funcionamiento de las demás, y la intensidad y voltaje producidos pueden ser fácilmente ajustados añadiendo o suprimiendo células.

## Conclusiones

El agotamiento de los combustible fósiles y el calentamiento global a causa de la emisión de gases que contribuyen el efecto invernadero están obligando a desarrollar alternativas energéticas y comenzar estudios y trabajos sobre este tema, teniendo en cuenta la crisis mundial y las necesidades propias. En este trabajo se ha abordado, de manera resumida, aproximaciones a investigaciones y aplicaciones encaminadas a desarrollar formas de aprovechamiento de la energía solar, a partir de un conocimiento general de la estructura de un Sistema Fotovoltaico, el funcionamiento y las características fundamentales de cada una de las parte que lo componen.

La energía solar fotovoltaica, al igual que otras energías renovables, constituye, frente a los combustibles fósiles, una fuente inagotable, contri-

buye al autoabastecimiento energético nacional y es menos perjudicial para el medio ambiente, porque evita los efectos de su uso directo —contaminación atmosférica, residuos, etc.— y los derivados de su generación —excavaciones, minas, canteras, etc.—.

## Referencias bibliográficas

- [1] Introducción a los Sistemas Fotovoltaicos. (2005). Disponible en: <http://saecaenergiasolar.com/fotovoltaico/introduccion/>. (Consulta: 15/11/2007).
- [2] Electrificación de la comunidad de Santa María de Loreto. (4/05/2006). Disponible en: <http://www.citrouv.org/reunion/acrobat/E2PDF5.pdf>. (Consulta: 18/09/2008).
- [3] La célula fotovoltaica. (2005). Disponible en: <http://www.epsea.org/esp/pdf2/Capit03.pdf>. (Consulta: 15/06/2007).
- [4] Ujaen, U. I + D en energía solar y automática. (2004). Disponible en: <http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/index.htm>. (Consulta: 1/04/2008).
- [5] La radiación solar. (2005). Disponible en: [www.epsea.org/esp/pdf2/Capit01a.pdf](http://www.epsea.org/esp/pdf2/Capit01a.pdf). (Consulta: 18/09/2008).
- [6] Arresti, D.O. Diseño de una instalación solar fotovoltaica. (2006). Disponible en: [http://www.torres-refrigeracion.com/pdf/art\\_fot\\_014.pdf](http://www.torres-refrigeracion.com/pdf/art_fot_014.pdf). (Consulta: 11/02/08).
- [7] Panel fotovoltaico. (2007). Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Panel\\_fotovoltaico](http://es.wikipedia.org/wiki/Panel_fotovoltaico). (Consulta: 15/06/2007).
- [8] Paneles solares fotovoltaicos ISOFOTON. (2003). Disponible en: <http://www.codeso.com/EqPanellsofoton02.html>. (Consulta: 15/08/07).
- [9] Baterías solares. (2007). Disponible en: <http://www.epsea.org/esp/pdf2/Capit06.pdf>. (Consulta: 16/10/2007).
- [10] Manual de Baterías de AGM-VRLA. (2005). Disponible en: [http://www.norwatt.es/manuales/pb/AGM\\_Manual\\_Rev.0,Enero05.pdf](http://www.norwatt.es/manuales/pb/AGM_Manual_Rev.0,Enero05.pdf). (Consulta: 17/10/2007).
- [11] Baterías solares Sonnenschein. (2007). Disponible en: <http://www.enervolt.net/pdf/pdfsolar/cat%E1logo%202007%20para%20web/gel.pdf>. (Consulta: 17/10/2007).
- [12] Baterías Deep Cycle. (2004). Disponible en: <http://www.enalmex.com/paginas/baterias.htm>. (Consulta: 16/11/2007).
- [13] Reguladores Isoler 10/20/30 (2005). Disponible en: <http://codeso.com/EqReguladorIsol Sofoton02.html>. (Consulta: 15/06/2007).
- [14] Regulador Isoler - 30D. (2005). Disponible en: <http://www.tiendaelektron.com/pdf/268631info.pdf>. (Consulta: 15/06/2007).
- [15] Características Regulador Profesional Isotel 30. (2001). Disponible en: <http://www.asif.org/files/Regulador%20Isotel.PDF>. (Consulta: 15/08/08).
- [16] Regulador Profesional Isotel 30. (2000). Disponible en: <http://www.solener.com/soletel.html>. (Consulta: 15/06/2007).
- [17] Dominicana, T. Inversor TRACE. (2005). Disponible en: [http://www.traceinternational.com/catalogo/index.php?scr\\_name= combos](http://www.traceinternational.com/catalogo/index.php?scr_name= combos). (Consulta: 15/01/08).
- [18] Inversores/Cargadores DR. (2005). Disponible en: <http://www.europrospect.com/pdf/DR.pdf>. (Consulta: 23/03/2007).

# Presencia de armónicos en las redes eléctricas de las instalaciones de comunicaciones

Por Ing. Iván René Linares Mosquera, Especialista de Energética y Climatización, Vicepresidencia de Desarrollo y Tecnología, e Ing. Gabriel Hernández Valdés, Especialista de Energética, Vicepresidencia de Operaciones de la Red, ETECSA  
ivan.linares@etecsa.cu, gabriel.hernandez@etecsa.cu

## Introducción

El uso racional de la energía, implica tener el máximo control de la energía consumida y de las instalaciones necesarias para su generación, transporte y utilización, garantizando un funcionamiento, sin interferencias para todos los aparatos, equipos y máquinas conectadas a la red eléctrica.

En todos los sectores, se incrementa la utilización de procesos dependientes de la electrónica de potencia para su funcionamiento, incluso en las fuentes generadoras. Por este motivo, el contenido armónico de la red eléctrica está aumentando y con frecuencia se presentan efectos perjudiciales, como el mal funcionamiento de sistemas esenciales de control y protección, o las sobrecargas de los equipos eléctricos.

Para optimizar el suministro, hacer realmente un uso racional de la energía y controlar la calidad en el servicio, se requiere conocer el estado real de las redes, su topología y los valores de sus parámetros eléctricos más importantes, de manera que se puedan identificar las principales fuentes generadoras de armónicos y su efecto en la contaminación del entorno.

Con este artículo, se pretende proponer una herramienta para determinar cuán contaminada pueda estar una red eléctrica, además de brindar

un conjunto de conocimientos elementales sobre un fenómeno con el que debe convivir y saber controlar.

## Conceptos generales

Las redes de distribución y los equipos eléctricos de potencia se diseñan, tradicionalmente, bajo la hipótesis de carga lineal. En este tipo de carga, las formas de onda de las tensiones y las corrientes son sinusoidales, es decir, alternan su amplitud en el tiempo, al regirse por la siguiente ecuación (Figura 1):

$V(t) = A \operatorname{sen}(wt + \phi)$  la que depende fundamentalmente de tres magnitudes:

- Amplitud ( $A$ ) o Valor pico ( $V_p$ )
- Período ( $T$ )
- Fase ( $\phi$ )

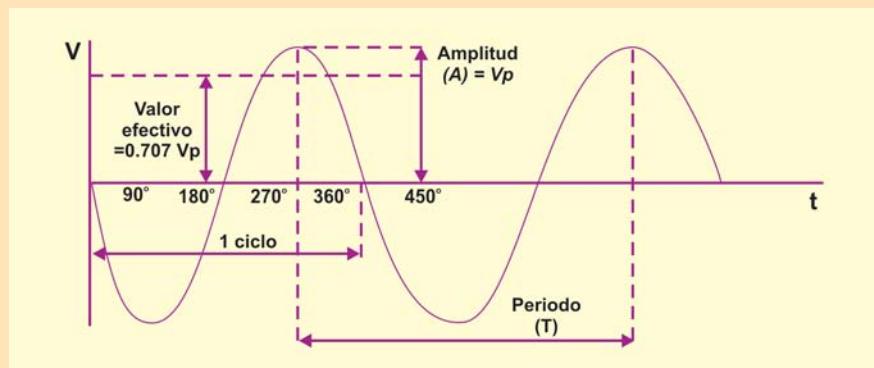


Figura 1 Forma de onda sinusoidal de una carga lineal

La amplitud representa el valor máximo o pico de la onda ( $A = V_p$ ); el período ( $T$ ) es el tiempo comprendido entre los picos de la amplitud, medido en segundos. El inverso de ( $T$ ) da, por lo tanto, el número de picos por segundo; esto es la frecuencia ( $f$ ) de la corriente expresada en Hertz o ciclos/seg. La fase de la onda sinusoidal ( $\phi$ ) marca la posición de la onda en un instante de tiempo determinado y es el parámetro que permite identificarla de otra onda cuando sus magnitudes —Período y Amplitud— son iguales.

Las fuentes de alimentación de los equipos informáticos, los rectificadores conmutados y el alumbrado fluorescente con balastro electrónico, se caracterizan por absorber la corriente en cortos impulsos de tiempo en vez de hacerlo suavemente en forma sinusoidal. Estos impulsos originan armónicos de corriente, es decir, corrientes sinusoidales con frecuencias que son múltiplos de la principal —60 Hz nominales de la red—. Y, por lo tanto, la forma de onda resultante será **no sinusoidal** y el análisis se deberá efectuar mediante su descomposición según el teorema de Fourier en:

- ♦ Un término sinusoidal a la frecuencia fundamental.
- ♦ Términos sinusoidales (armónicos) cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia fundamental.
- ♦ Una componente de CC. en algunos casos.

En la Figura 2, se muestra la onda deformada por la presencia de armónicos.

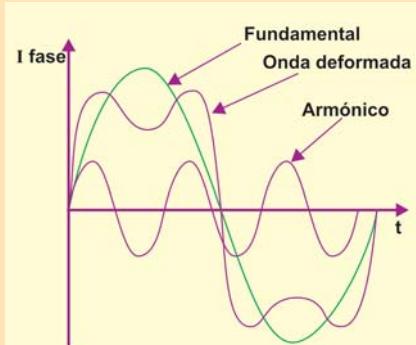


Figura 2 Onda deformada por la presencia de armónicos

Entonces su expresión queda de la forma:

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} y_n / 2 \operatorname{sen}(n\omega t - \phi_n)$$

Donde  $y_0$  = valor del componente en corriente continua (generalmente cero).

$y_n$  = valor efectivo del armónico de rango  $n$  —en este caso **no** será  $0.707V_p$  porque la magnitud no es sinusoidal—.

$\omega$  = frecuencia angular de la frecuencia fundamental.

$\phi_n$  = desplazamiento de la componente armónica de orden  $n$ .

Un ejemplo de lo expresado anteriormente se observa en las computadoras personales. La figura 3 presenta su esquema básico compuesto por un puente rectificador con un condensador en cabeza que sirve de reserva de energía para alimentar la carga entre dos crestas consecutivas de tensión rectificada.

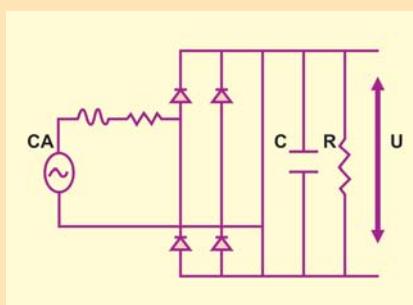


Figura 3 Esquema básico de una PC

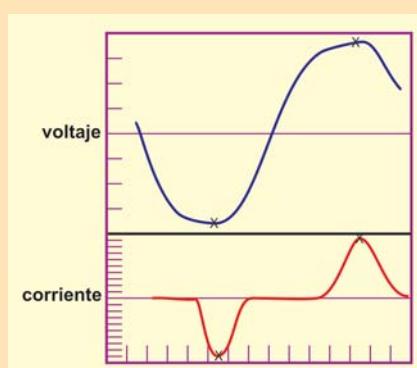


Figura 4 Formas de onda en una PC

La corriente se establece cuando la tensión CA supera a la tensión continua  $U$  y circula durante un tiempo relativamente breve para cargar el condensador a su valor pico  $V_p$ . En la Figura 4, se indica la onda de corriente distorsionada por este efecto [12].

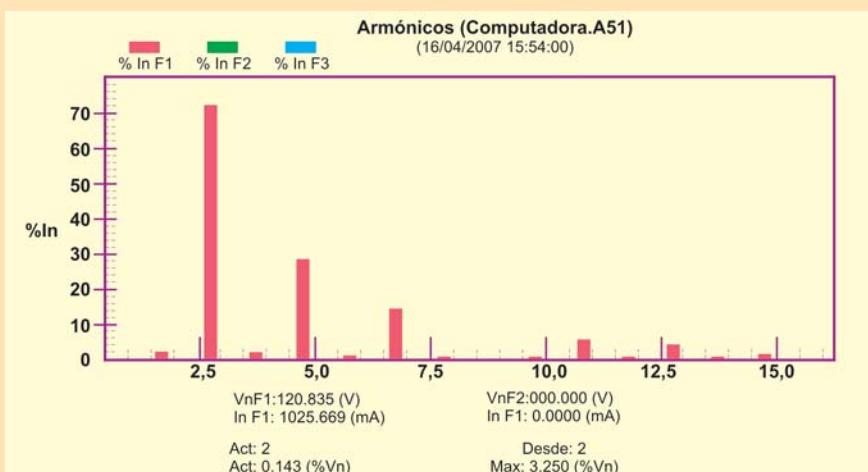


Figura 5 Armónicos de corriente en una PC

Esta carga monofásica genera corrientes armónicas de rango impar sobre una banda ancha del armónico 3 al 15 (H3 a H15) (Figura 5).

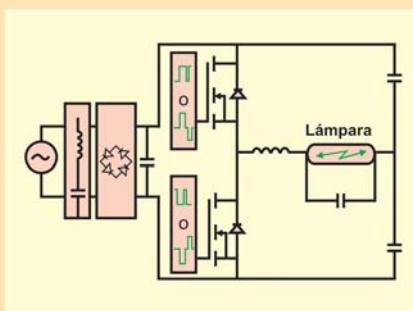


Figura 6 Esquema básico de un balastro electrónico

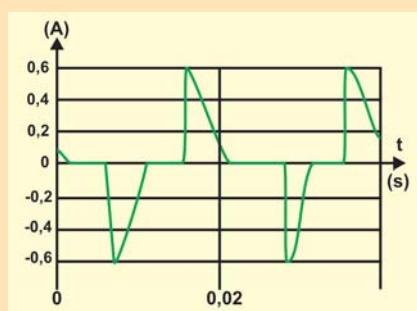


Figura 7 Forma de onda de corriente

Las luminarias fluorescentes con balastro electrónico y las lámparas ahorradoras son también cargas no lineales. En las figuras 6 y 7, se muestran el esquema eléctrico de un balastro electrónico y su forma de onda de corriente [14].

En crecimiento proporcional a las PC están los UPS —*Uninterrupted Power Supply*— con atributos propios que provocan confusión pues su topología difiere y el más utilizado y conocido como *stand-by* cuyo diagrama básico se muestra en la figura 8, puede considerarse como un caso particular de carga no lineal.

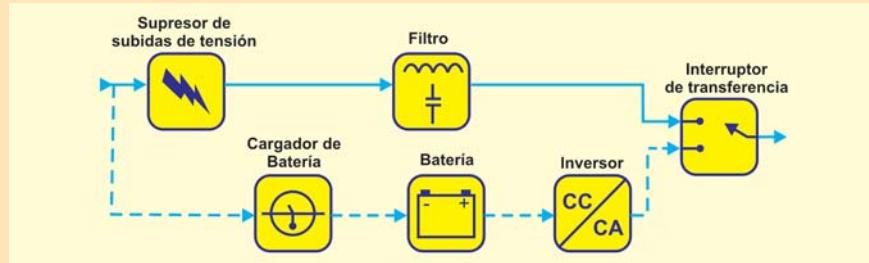


Figura 8 Esquema básico de un UPS *stand-by*

El análisis de este equipo debe efectuarse bajo condiciones estables de funcionamiento, pasando la corriente por la línea continua (Figura 8) directamente de la red a través del interruptor de transferencia y considerando su pequeño consumo interno que es sólo para mantener la flotación de la batería.

La Figura 9 revela el análisis de un UPS *stand-by* con la PC apagada, se observa que la corriente nominal es de sólo 0,238 A

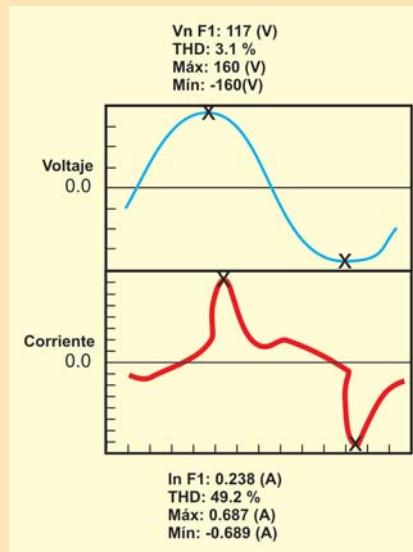


Figura 9 Formas de onda de voltaje y corriente de un UPS *stand-by* con la PC apagada

Las figuras anteriores, también exponen el comportamiento de numerosos UPS ubicados en un local de operadoras y oficinas del Centro Telefónico Monte en Ciudad de La Habana.

En los centros de comunicaciones son los rectificadores conmutados por alta frecuencia los principales generadores de armónicos y su efecto sobre el resto de la red dependerá fundamentalmente de:

- ♦ Su diseño, capacidad y estado de carga

Aunque el principio de funcionamiento sea similar no todos los fabricantes tienen el mismo esquema ni sus módulos las mismas capacidades.

- ♦ Punto de conexión en la red

Si sus alimentadores tienen una corrida a través de varios paneles de subdistribución dentro de una misma instalación más probabilidad tienen de contaminar las cargas conectadas en dichos paneles.

- Existencia o no de transformador de aislamiento

Cuando se utiliza un transformador elevador 208/400v para equipos trifásicos sin neutro, este se comporta como una barrera para los armónicos de orden 3.

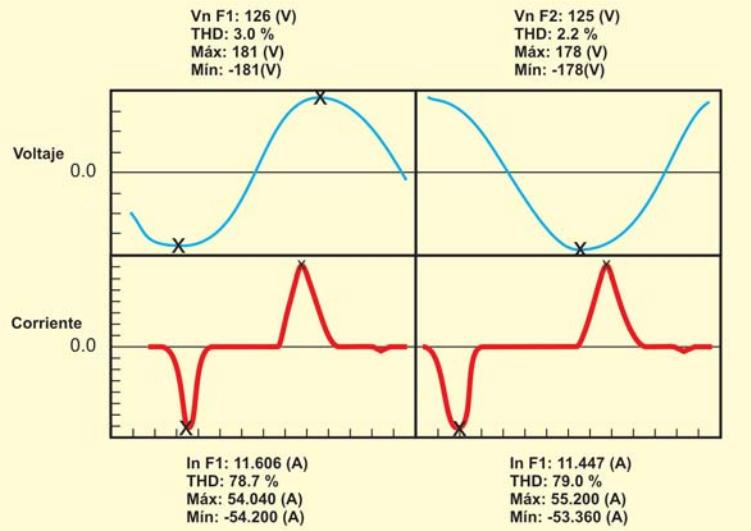


Figura 10 Formas de onda de voltaje y corriente de un rectificador Huawei

La figura 10 presenta el análisis de un rectificador Huawei monofásico conmutado de 100 A de CC. con módulos de 25 A, donde se observa una severa distorsión de la onda de corriente.

En el análisis de su efecto distorsionante en los alimentadores de un panel de subdistribución trifásico

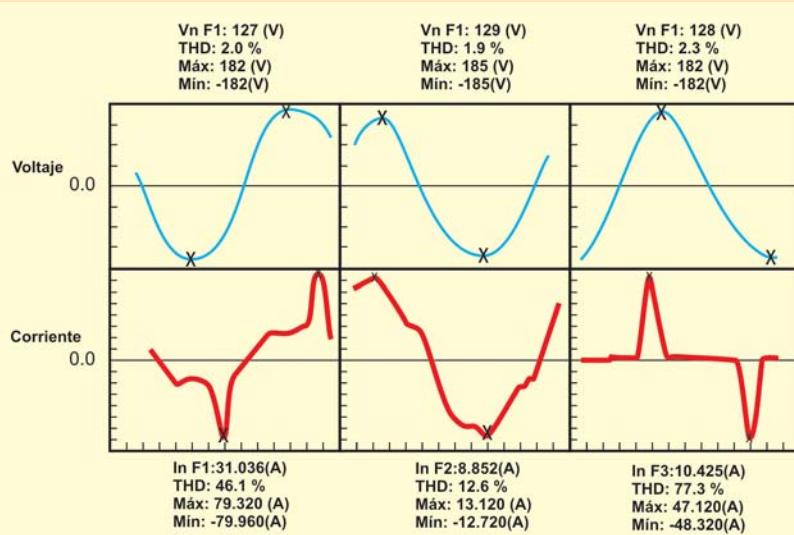


Figura 11 Formas de onda de voltaje y corriente de un panel de subdistribución con un rectificador Huawei

En la figura 11 puede verse que las corrientes de las fases 1 y 3, donde está conectado el equipo monofásico, tienen el mismo comportamiento a pesar de coexistir con otras cargas.

Debe señalarse que sólo cuando los armónicos de corriente provocan la distorsión de la tensión a través de la impedancia de la red eléctrica de distribución, se produce la contaminación del resto de la instalación por lo que es importante determinar esta influencia mediante el conocimiento de la red por parte de los especialistas, considerando que es un consumo en crecimiento.

En todos los sitios este fenómeno no se manifiesta de igual forma, incluso donde existen las mismas cargas no lineales, pues su efecto depende esencialmente de la capacidad que tenga el bus principal para asimilar los impulsos de corriente y de la existencia de grandes cargas lineales como los motores de inducción, por lo que las soluciones deberán ser puntuales y siempre partiendo desde las simples y económicas como el cambio del calibre de los conductores a las más costosas o complicadas, como los transformadores de aislamiento y los compensadores activos.

Existe un comportamiento de armónicos similar en diferentes centros telefónicos donde se encuentra el mismo equipamiento instalado. Un ejemplo es el Edificio de Buenavista en el cual se efectuaron varios estudios para proponer una solución integral y, así, disminuir la presencia de armónicos en sus instalaciones.

## Principales efectos de los armónicos

### Intensidad de cresta más elevada

Si el valor de cresta resultante es más elevado que lo habitual, ciertos aparatos de medida pueden ser perturbados y dar falsas lecturas.

### Vibraciones, ruido

Según los esfuerzos electrodinámicos, proporcionales a las corrientes instantáneas que aparezcan, las corrientes armónicas generarán vibraciones y ruidos acústicos, sobre

todo, en los aparatos electromagnéticos —transformadores, inductancias—.

#### Perturbaciones inducidas sobre las líneas de pequeñas corrientes —teléfono, telemundo—

Las perturbaciones se producen cuando una línea de señal está situada paralelamente a una canalización de distribución eléctrica con corrientes y tensiones deformadas. Se han de tener en cuenta parámetros tales como: longitud del paralelo, distancia entre los dos circuitos, frecuencia de los armónicos —el acoplamiento aumenta con la frecuencia—.

#### Calentamiento de los condensadores

Las pérdidas, causadas por los calentamientos, se deben a dos fenómenos: conducción e histéresis en el dieléctrico. Los condensadores son sensibles a las sobrecargas, bien sean debidas a una tensión fundamental demasiado elevada o a la presencia de tensiones armónicas; estos calentamientos pueden llegar a producir la perforación del dieléctrico.

#### Calentamiento de los cables y de los equipos

Las pérdidas de los cables atravesados por las corrientes armónicas son superiores, por lo que se produce un aumento de la temperatura. Entre las causas de pérdidas suplementarias se pueden citar:

- ♦ Aumento del valor eficaz de la corriente para una misma potencia activa consumida.

- ♦ Aumento de la resistencia aparente del alma del cable con la frecuencia, fenómeno debido al efecto corona.

- ♦ Aumento de las pérdidas dieléctricas en el aislante con la frecuencia, si el cable es sometido a una distorsión de tensión no despreciable.

#### Aparición de fenómenos de resonancia

Para ciertas frecuencias hay resonancia entre la batería de condensadores y la reactancia de la red vista desde los bornes de la batería, esto provoca una amplificación más o

menos amortiguada de las magnitudes armónicas —corrientes y tensiones— si la resonancia se produce a la misma frecuencia que la de las corrientes inyectadas por la fuente perturbadora.

#### Generación de sobretensiones o sobreintensidades peligrosas

En un sistema trifásico equilibrado, la corriente en el neutro es nula. En el caso que existan armónicos, esto no resulta así. Para los armónicos múltiplos de tres —3, 6, 9...— las corrientes no se compensan. Estos son los llamados armónicos homopolares. Estas corrientes se suman en el neutro y obligan a sobredimensionar el conductor en cuestión. En el peor de los casos, la corriente puede llegar a ser 3 veces la de cada una de las fases.

La normativa fija que en los sistemas de alumbrado con potencia superior a 25 W, el porcentaje de armónico 3 debe ser inferior al 30 % de la corriente fundamental.

#### Reducción de la vida de los equipos

Cuando la distorsión de tensión de alimentación es de aproximadamente el 10 %, el tiempo de vida de los equipos se reduce significativamente dependiendo del tipo de aparato.

#### Algunos parámetros para evaluar el estado de las redes

##### Factor de Cresta

El Factor de Cresta ( $K$ ) es igual a la Amplitud del pico de la forma de onda ( $V_p$ ) dividida por el valor RMS —Raíz Media Cuadrática—. El propósito del cálculo del Factor de Cresta es dar una rápida idea de cuán distorsionada está la forma de onda medida con respecto de una onda sinusoidal pura.

En una perfecta onda sinusoidal, con una amplitud de “1”, el valor RMS es igual a 0,707, y el Factor de Cresta es entonces igual a 1,41. Una perfecta onda sinusoidal no contiene distorsiones y, por lo tanto, el Factor de Cresta, con un valor diferente a 1,41, implica que hay algún grado de distorsión.

La ecuación del Factor de Cresta es la siguiente:

$$K = \frac{I_{max}}{I_{rms}} \quad \text{o} \quad K = \frac{U_{max}}{U_{rms}}$$

Efectos del Factor de Cresta:

- ♦ Si el Factor de Cresta es superior a 1,41 hay peligro de disparo intempestivo de las protecciones.
- ♦ Si el Factor de Cresta es inferior a 1,41 hay riesgo de sobrecalentamiento debido a que estas mismas protecciones no consiguen disparar.

#### Tasa de Distorsión Armónica (THD)

Para una señal la Tasa de Distorsión Armónica está definida por la ecuación:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1}$$

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n U_h^2}}{U_1}$$

Donde:  $h$  - Orden del Armónico

$I_h$  - Armónico de corriente de orden  $h$

$U_h$  - Armónico de voltaje de orden  $h$

$I_1$  - Armónico fundamental de corriente

$U_1$  - Armónico fundamental de voltaje

Esta ecuación proporciona un valor que indica la distorsión de tensión o intensidad que se tiene en un punto de la red.

La Tasa de Distorsión Armónica generalmente se expresa en %.

- ♦ Un valor de  $THD_i$  inferior al 10 % se considera normal. Prácticamente no existe riesgo de funcionamiento anómalo en los equipos.

- ♦ Un valor de  $THD_i$  comprendido entre el 10 y el 50 % revela una distorsión armónica significativa. Existe el riesgo de que aumente la temperatura, lo que implica el sobredimensionado de los cables y las fuentes.

- ♦ Un valor de  $THD_i$  superior al 50 % revela una distorsión armónica importante. El funcionamiento anóma-

lo de los equipos es probable. Un análisis profundo y un sistema de atenuación son necesarios.

♦ Un valor de  $THD_u$  inferior al 5 % se considera normal. Prácticamente no existe riesgo de mal funcionamiento en los equipos.

♦ Un valor de  $THD_u$  comprendido entre el 5 y el 8 % indica una distorsión armónica significativa. Se pueden dar funcionamientos anómalos en los equipos.

♦ Un valor de  $THD_u$  superior al 8 % revela una distorsión armónica importante. Los funcionamientos anómalos en los equipos son probables. Un análisis profundo y un sistema de atenuación son necesarios [10].

## Conclusiones

A pesar de las dificultades para efectuar estudios en centros de comunicaciones en servicio y lo poco representativo que pueda ser el lugar y el momento seleccionados para efectuar mediciones, puede señalarse que la electrónica de potencia está cada vez más presente en el equipamiento moderno, contaminando los circuitos con armónicos de diferente orden, por lo que es necesario conocer el estado real de las redes, la topología y los valores de sus parámetros eléctricos más importantes, de manera que puedan identificarse las principales fuentes generadoras y su efecto sobre el entorno, para controlar este inevitable fenómeno. ■

## Referencias bibliográficas

- [1] Bettega, E., Fiorina, J. N. "Armónicos: rectificadores y compensadores activos". *Cuaderno Técnico*, no. 183 (enero/2000): págs. 5; 30-35.
- [2] Cobas, Manuel F. "Calidad de la Energía Eléctrica". Trabajo presentado en la VI Jornada Comité Electrotécnico Cubano, 2003.
- [3] Collombet, C., Lupin, J. M., Schonek, J. "Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento". *Cuaderno Técnico*, no. 152 (septiembre/1999): 6-8.
- [4] Collombet, Michel; Lacroix, Bernard. "Los interruptores automáticos BT frente a las corrientes armónicas, transitorias y cíclicas". *Cuaderno Técnico*, no. 182 (noviembre/1996): 12-14.
- [5] Delaballe, Jacques. "Perturbaciones en los sistemas electrónicos y esquemas de conexión a tierra". *Cuaderno Técnico*, no. 77 (noviembre/2000): 8-10.
- [6] Eguíluz Morán, Luis I. "Circuitos en régimen no-sinusoidal". España: Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2008.
- [7] Fiorina, Jean Noël. "Onduladores y armónicos (caso de cargas no lineales)". *Cuaderno Técnico*, no. 159 (junio/1992): 6; 7; 14-15; 20.
- [8] Normas IEEE. 1159, 1995.
- [9] "Compatibilidad Electromagnética". Schneider Electric, Manual Didáctico, 2000, págs. 1-10.
- [10] "Detección y Filtrado de Armónicos". Schneider Electric, 2001, págs. 5-6; 9; 12-15.
- [11] Gerín, Merlin. "Soluciones a perturbaciones de armónicos generadas por el alumbrado". Schneider Electric, Sección Industria-Edificios, págs. 4-6.
- [12] "Manual de Calidad de la Energía". Schneider Electric, Manual Didáctico, 2000, págs. 8; 14; 16; 35; 37-38; 46.
- [13] Schonek, Jacques. "Las peculiaridades del 3<sup>er</sup> armónico". *Cuaderno Técnico*, no. 202 (julio/2000): 5-8.
- [14] Schonek, Jacques; Vernay, Marc. "Alimentación de circuitos de alumbrado". *Cuaderno Técnico*, no 205 (abril/2002): 15-16.
- [15] Vidal, Daniel. "Eliminación de armónicos en el aeropuerto de Valencia". España, 2003, págs. 13-14; 16; 18.

# Sistemas de protección contra sobretensiones

Por Ing. Emilio Ramón Cabrera Fernández, Técnico C en Telemática, Energético CSGT Cienfuegos, e Ing. Nicasio Echarte del Sol, Técnico C en Telemática, Energético CSGT Villa Clara, ETECSA  
nicasio.echarte@etecsa.cu, emilio@cfg.etecsa.cu

## Introducción

**L**a información estadística conocida recoge que, permanentemente, se forman alrededor de 5,000 tormentas en la tierra, con el consiguiente peligro para las personas y los bienes. La intensidad media mundial de la descarga de un rayo se estima en 20,000 A; pero se llegan a contabilizar rayos de hasta 200,000 A [1].

Cada año caen cerca de 2 millones de rayos. Sus efectos pueden ser ocasionados por impactos directos ó causas indirectas. El impacto directo puede tener consecuencias catastróficas para estructuras, personas o animales. Los daños por causas indirectas —caída de rayos en las inmediaciones o sobre tendidos aéreos o inducciones en estos conductores— suelen ser más numerosos con cuantiosas pérdidas económicas [5].

En Cuba, los efectos provocados por este fenómeno han causado innumerables pérdidas. Esto ha condicionado el desarrollo de mecanismos encaminados a reducir sus efectos. Como fuente de protección y aseguramiento de las instalaciones de telecomunicaciones —en términos de Sistema de Protección Integral (SPI)— y teniendo en cuenta la dinámica de la instalaciones tecnológicas —más sensibles a los fenómenos atmosféricos y con exigencias para su operación—, es necesario dar seguimiento, revisar y controlar estos sistemas.

## Desarrollo

El incremento de las descargas atmosféricas, en los últimos años, ha condicionado la implementación de Sistemas de Protección Contra Descargas Atmosféricas (SPCR), que no sólo incluyan el captador sino que constituyan una cadena de protección donde cada eslabón se complementa y cumpla su función esencial: proteger las descargas atmosféricas que, inevitablemente, caen en personas, estructuras y bienes materiales.

Este sistema incluye distintos subsistemas con características específicas que, a veces, se obvian o se dejan al azar. Sin embargo, deben realizarse con el compromiso de la ejecución de proyectos técnicamente válidos y eficientes.

La forma más segura de protección contra el impacto directo del rayo, consiste en su captación, derivación y dispersión a tierra. Para que una instalación posea un sistema de protección adecuado, debe ser capaz de [2]:

- ◆ Captar el rayo.
- ◆ Conducir la corriente del rayo a tierra sin que se produzcan daños.
- ◆ Dispersarla en la tierra de forma rápida y segura.
- ◆ Evitar los efectos secundarios del rayo (sobretensiones).

Una correcta protección debe dotar a la estructura de dos sistemas de protección:

- ◆ Protección externa contra impactos directos de rayos —pararrayos, tendido o jaula de Faraday—.
- ◆ Protección interna contra sobretensiones provocadas por la caída del rayo —limitadores de tensión—.

### Sistema de Protección contra Rayos

Está formado por tres elementos [3]:

- 1- Elemento captador o pararrayo
- 2- Bajantes
- 3- Tomas de tierra

**1-Elemento captador o pararrayo:** es el más importante en la protección contra el rayo, de él depende la utilidad del resto de la instalación, debe estar adecuadamente ensayado y certificado.

Desde la invención del pararrayos, diferentes tecnologías han aparecido, con más o menos exitosas. El principio ha sido excitar la formación del rayo ionizando el aire para atraer la descarga en la punta del pararrayos.

Los diferentes tipos de pararrayos son:

**Puntas Franklin:** basado en el diseño original de Benjamin Franklin de 1752 usando el efecto de puntas. Su zona de cobertura es muy limitada y está condicionado directamente a su altura y por el nivel de protección necesario.

**Mallas captadoras:** conocidas como Jaula de Faraday. Se basa en que el interior de una caja cerrada por paredes metálicas y con perfecta continuidad, no se ve afectada por ninguna variación del campo eléctrico externo. Sólo son posibles aproximaciones poco estéticas, costosas y no totalmente efectivas.

**Pararrayos radiactivos:** intento de mejorar la Punta Franklin. Se creó en 1914, cuando L. Szillard demostró que una punta metálica provista de sales radiactivas, inmersa en un campo eléctrico, proporciona una corriente mucho mayor que sin el material radiactivo. Actualmente, su uso está prohibido en muchas lugares.

**Pararrayos dieléctrico-condensadores o electro-atmosféricos:** formado por dos electrodos metálicos aislados entre sí y conectados, uno a potencial atmosférico y otro a tierra. Intenta producir la ionización ambiental y el trazador a partir de la diferencia de potencial producida entre ellos. En teoría, para que esto se produzca es necesario un fenómeno de carga-descarga como absoluta garantía de aislamiento y campo eléctrico at-

mosférico suficiente. Su actividad es deficiente debido a sus tiempos muertos.

**Pararrayos electro pulsante:** son los Pararrayos con Dispositivo de Cebado que incorporan un dispositivo interno capaz de emitir impulsos de alta tensión. Se caracteriza por responder al acercamiento del rayo, adelantándose en su captura a otros elementos de su zona de acción, para conducirlo a tierra de forma segura. El líder ascendente puede formarse en lugares elevados donde haya una acumulación de cargas suficiente. Su efectividad está determinada por la velocidad y el momento exacto en que se produzca.

**2-Bajantes:** cada pararrayos ha de ir unido a tierra, al menos, por un bajante. Los bajantes se deberán diseñar por el camino más corto y recto posible y deberán ser como mínimo de cobre desnudo de 50 mm<sup>2</sup> —por su comportamiento eléctrico frente a la corriente tipo rayo, es preferible la pletina—.

También hay que considerar la ubicación del pararrayos y la de la toma de tierra para realizar este diseño. El bajante siempre deberá ir por el exterior de la estructura a proteger. Si esto es imposible, la norma permite ejecutarlo por el interior bajo tubo o funda aislante no inflamable. Debe reiterarse la reducción de la eficacia del SPCR, la complicación en la verificación y mantenimiento, y el aumento de los riesgos de penetración de sobretensiones en el interior del edificio.

**3-Tomas de tierra:** los sistemas de protección externos e internos estarán apoyados por un buen sistema de toma de tierra, para la evacuación de las corrientes del rayo así como una adecuada equipotencialidad entre todos los sistemas de tierra —tanto de los sistemas de protección como de los circuitos eléctricos y telefónicos del espacio a proteger—. Existen diferentes tipos de tomas de tierra [6], por ejemplo:

**Electrodos de acero cobrizado:** se utilizan en cualquier tipo de terreno, fáciles de instalar —martillo neumático o maza—. Con el modelo de picas enchufables, se llega a la medida que permita el terreno. En tierra normal, jardines o campos, se necesita una media de 3 picas de 1,5 m de longitud mínima, enterradas verticalmente, formando un triángulo equilátero, que se unirán mediante cables desnudos o cinta de cobre, enterrados en una zanja de 50 a 80 cm de profundidad, y se conectarán a la red de tierras por medio de puentes de comprobación. La distancia de separación entre las diferentes picas será igual al doble de la longitud de estas D = 2xL —longitud de las picas—.

**Placas:** indicado para zonas de composición muy pedregosa. Al ser todas de cobre, tienen menos problemas de corrosión. Para su instalación, se necesita realizar un pozo por cada placa de unas dimensiones de 2x2x2 m aproximadamente, separados entre sí 3 m y unidos mediante zanja de 50 cm de profundidad que deberán ser llenados, seguidamente, con tierra vegetal.

**Electrodo dinámico:** consiste, principalmente, en un tubo hueco de cobre lleno con una mezcla de compuestos iónicos. El producto absorbe la humedad ambiental y se disemina en el terreno que rodea al electrodo, aportando iones libres y reduciendo gradualmente la resistividad del terreno. Para su colocación es necesaria la utilización de un compresor y el terreno debe ser muy rocoso porque en terrenos arcilloso-arenosos, la barrena de perforación padece de enganchones y hace muy difícil su utilización. Se recomienda la utilización de 3 electrodos en configuración de triángulo.

**Electrodo de grafito:** el grafito, por su alta conductividad eléctrica y térmica y por ser inerte frente a los agentes químicos, es el elemento ideal para construir un electrodo de toma de tierra. Los materiales usados como relleno de la perforación —polvo de grafito y polvo gredoso— aseguran el contacto entre el electrodo y el terreno gracias a su capacidad de penetrar, incluso, en fisuras rocosas.

Un electrodo está formado por una varilla de grafito sólido rodeada de un envoltorio de polvo de grafito y sales que, al evitar daños mecánicos durante su

transporte e instalación, mejora la conductividad del electrodo. Este conjunto se introduce en el pozo o perforación.

#### Equipotencialidad de las tomas de tierra [2]

Cuando el edificio a proteger dispone de una toma de tierra en el fondo de la excavación para las masas de las instalaciones eléctricas, las tomas de las instalaciones de pararrayos se unirán entre ellas. Esta conexión se realiza a nivel del suelo, al pie de la toma de tierra. Si la realización de esta conexión no es posible, la interconexión se hará sobre la placa de tierra. La trayectoria del conductor de unión debe realizarse de forma que evite una eventual inducción sobre los cables y materiales ubicados en las inmediaciones.

La interconexión debe hacerse por un dispositivo que permita su desconexión para posteriores controles de su resistividad.

#### Sistema de Protección contra Sobretensiones

Esta parte del sistema es la encargada de eliminar o reducir las sobretensiones transitorias que no son más que un aumento de voltaje, de muy corta duración, medido entre 2 ó más conductores.

Las sobretensiones transitorias son la perturbación más importante contra la que debe protegerse, si se disponen de equipos electrónicos. Estas tienen diferentes causas:

- ♦ Descargas eléctricas atmosféricas: de cualquier tipo —nube-tierra y nube-nube—.
- ♦ Comutaciones de maquinaria de gran potencia: el arranque y parada de motores.
- ♦ Fallos causados por la compañía eléctrica: cortocircuitos, interrupciones bruscas del suministro, etc.
- ♦ Aumentos bruscos del potencial en las tomas de tierra

#### Consecuencias de las sobretensiones [4]

♦ Mal funcionamiento: aunque no hay daño físico, los niveles lógicos o analógicos del sistema son alterados y causan pérdida de datos, datos y software corruptos, caídas de las redes inexplicables, bloqueos, etc.

♦ Degradación: una exposición a sobretensiones transitorias degradará, sin que el usuario lo note, los componentes electrónicos y circuitos, lo que reduce la vida efectiva de los equipos y aumenta las posibilidades de fallos.

♦ Daños: las sobretensiones transitorias de gran magnitud pueden dañar componentes, placas de circuitos, incluso, llegar a quemarlas y a destruir el equipo y la instalación eléctrica, y conectarse en el posible foco de un incendio. Afectan, sobre todo, a los equipos electrónicos, informáticos y de telecomunicaciones.

#### Dispositivos de protección contra sobretensiones

Un protector contra sobretensiones debe permanecer inactivo mientras la señal es normal, y activarse al detectarse la sobretensión; ser capaz de soportar la corriente asociada a la sobretensión; derivar la corriente a tierra; reducir la sobretensión a un nivel soportable por los equipos y volver al estado inactivo cuando haya desaparecido una vez la perturbación.

#### Parámetros de los protectores contra sobretensiones [3]

a-Características de la línea a proteger:

Tensión nominal ( $U_n$ ): es la tensión nominal del sistema que se protege. Para el caso de corriente alterna, se indica el valor eficaz (rms) y la frecuencia de funcionamiento.

Tensión máxima de funcionamiento ( $U_c$ ): valor eficaz ó d.c de la tensión máxima en la línea que soporta el protector sin entrar en funcionamiento.

b-Corriente soportada por el protector:

Corriente nominal de descarga ( $I_n$ ): corriente de pico con onda 8/20 ms que soporta el protector repetidas veces.

Corriente máxima ( $I_{max}$ ): es la máxima corriente de pico con onda 8/20ms que se ha aplicado al protector, y la deriva a tierra de forma segura.

Corriente impulso ( $I_{imp}$ ): es la máxima corriente de pico, con onda 10/350 ms y una carga y energía determinadas, que se ha aplicado al protector y, a su vez, lo deriva a tierra de modo seguro.

c-Reducción de la sobretensión:

Nivel de protección ( $U_p$ ): parámetro que caracteriza la capacidad del protector de limitar la tensión entre sus terminales. Su valor, en voltios, no debe superarse durante ninguno de los ensayos que se realizan, que incluyen los impulsos de corriente y la respuesta a la onda de tensión de 1,2/50 ms.

Tiempo de respuesta ( $t_r$ ): parámetro que caracteriza la rapidez de activación de los protectores, aunque puede variar según la pendiente de la onda aplicada. Se considera que el tiempo de respuesta de los varistores es de 25 ns y en las vías de chispas de 100 ns.

d-Otros parámetros a considerar:

Situación del protector: exterior / interior, según pueda o no soportar la intemperie.

Método de montaje: fijo ó portátil.

Tipo de conexión: un puerto / dos puertos, según esté en paralelo o en serie con el equipo a proteger.

Temperatura de trabajo: intervalo de temperaturas a usarse en el protector.

Protección de la carcasa contra interacciones mecánicas

Protección de la carcasa contra el fuego: tipo de material.

Impedancia serie: cuando el protector se instala en serie con la línea, debe especificarse la inductancia o resistencia que introduce.

#### Selección de los protectores [2]

1-Investigar las características de la línea para saber la tensión y la corriente máximas de funcionamiento en continua ó en alterna entre cada uno de los conductores.

$U_c >$  Tensión máxima de funcionamiento de la línea

$I_n >$  Corriente máxima de funcionamiento de la línea

2-Seleccionar el tipo de protector y su corriente máxima según los efectos que deba soportar.

**Corriente directa del rayo. Clase I:** protector con capacidad de descarga de rayo. Protección alta 10/350 ms. Estos protectores deberán montarse a la entrada, porque su nivel de protección sólo es compatible con la conexión de entrada instalada ó con la de los equipos de dicha instalación.

**Efectos secundarios del rayo. Clase II:** protectores con capacidad de descarga alta. Protección media 8/20 ms. Son los más empleados porque ofrecen un nivel de protección compatible con la mayoría de los equipos que se conectan a la red de alimentación. Su uso es adecuado como protección media cuando existen protectores instalados de Tipo 1 ó como primer escalón en zonas urbanas. Siempre deben colocarse aguas debajo de los protectores Tipo 1 en las instalaciones con protección externa, en el cuadro de baja tensión. Su montaje en cabecera será suficiente cuando no exista protección externa.

**Sobretensiones ya amortiguadas. Clase III:** protectores con capacidad de descarga media. Protección baja 8/20 ms. Deben instalarse para la protección de equipos sensibles tanto en el caso de particulares como en industrias.

3-Seleccionar la tensión residual del protector según los equipos a proteger. Para líneas de suministro eléctrico se recomienda:

Equipos muy robustos —grandes motores, aire acondicionado—. Tensión residual  $U_p = 4 \text{ kv}$

Equipos poco sensibles ó que cumplen las normas en su fabricación e instalación.  $I U_p = 1,5 \text{ kv}$

Equipos muy sensibles y sin ninguna protección contra perturbaciones electromagnéticas  $U_p < 1 \text{ kV}$

#### Coordinación de los Sistemas de Protección Integrales

Para una correcta protección contra sobretensiones, se requiere una seguridad escalonada y coordinada, con varias etapas que actúen en secuencia y,

por una parte sean capaces de soportar la corriente del rayo y, por otra, dejar una tensión residual no perjudicial para los equipos. Conseguir un alto poder de descarga y un bajo residual en un mismo protector es difícil, por lo que el empleo de un único protector no asegura la protección de una instalación donde existen equipos eléctricos muy sensibles. Deben colocarse 2 ó más protectores coordinados. El primero (*P1*) debe estar en la cabecera; los segundos (*P2, P3*), dependiendo del *Up* requerido, estarán en las distribuciones de las líneas más sensibles y lo más cerca posibles de los equipos a proteger.

*P1* debe seleccionarse por *Imax*; y los protectores secundarios deben elegirse para conseguir el menor *Up* posible. Para obtener la actuación coordinada correcta de los protectores, debe respetarse una distancia mínima entre protectores de 10 m, debido a que el comportamiento inductivo que presenta el cable eléctrico frente a las sobretensiones, provoca un retraso de la intensidad para lograr que *P1* se active primero y derive la mayor parte de la energía, y los protectores secundarios realicen, posteriormente, la función de disminuir el residual dejado por el primer protector.

#### Tecnologías para la confección de protectores [6]

**a-Vías de chispas y descargadores de gas:** alta capacidad de descarga —hasta 100 kA— 10/350 ms—. Su tensión residual es elevada, pero soportan corrientes muy altas. Cuando la señal es normal, permanecen abiertos, sin circulación de corriente. Cuando se sobrepasa su tensión de ruptura, el elemento entra en cortocircuito y se lleva la corriente a tierra.

**b-Varistores:** su tensión residual es menor que la de las vías de chispas, y soportan corrientes menores; pero, aún elevadas. Tienen una impedancia muy alta cuando la señal es normal, y disminuye rápido al llegar la sobretensión.

**c-Diodos supresores de transitorios:** son muy rápidos y capaces de dejar tensiones residuales muy bajas; no obstante, no soportan corrientes mayores de unos amperios.

#### Mantenimiento de los Sistemas de Protección Integrales

El mantenimiento preventivo constituye el punto de partida para el análisis del estado técnico de las instalaciones. Las acciones que deben ejecutarse, relacionadas en los modelos de Orden de Mantenimiento, registran los problemas para su inmediata intervención. Ejemplos de los principales trabajos a realizar:

**Instalación exterior:** revisión del estado técnico del sistema de pararrayos y del de tierra —conexiones, soldaduras, equipotencialidad—; mediciones de los parámetros de la instalación —continuidad, resistencias de tierra—; acciones de intervención de menor envergadura para la solución de los problemas detectados.

**Instalación interior:** revisión del estado técnico interior del sistema —equipotencialidad, distribución de barras de tierra, conectividad, corridas de cables—; revisión de la instalación de descargadores de rayos de AC, DC y RF, conexiones y drenaje; revisión de los calibres de cables de conexión de equipotencialidad; medición de los parámetros de la instalación —continuidad de la equipotencialidad de los elementos de la instalación puestos a tierra—; limpieza de barras de tierras, sustitución de terminales y conexiones sulfatadas; acciones de intervención de menor envergadura para la solución de los problemas localizados.

Del análisis realizado, para la ejecución de mantenimientos preventivos de los SPI en la Empresa en el 2008, se apuntó que deben efectuarse de la siguiente manera:

| Dirección Territorial | Cantidad de instalaciones | Dirección Territorial | Cantidad de instalaciones |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Pinar del Río         | 115                       | Camaguey              | 68                        |
| Habana                | 66                        | Granma                | 63                        |
| Ciudad de La Habana   | 178                       | Holguín               | 75                        |
| Matanzas              | 128                       | Santiago de Cuba      | 86                        |
| Villa Clara           | 93                        | Guantánamo            | 120                       |
| Cienfuegos            | 58                        | Isla de la Juventud   | 64                        |
| Sancti Spíritus       | 82                        |                       |                           |
| Ciego de Ávila        | 76                        | <b>Total</b>          | <b>1272</b>               |

#### Conclusiones

Se ha presentado una síntesis de las partes y elementos de los sistemas de protección y se han ofrecido consideraciones para seleccionar, adecuadamente, sus componentes esenciales.

También, se ha mostrado cómo con el cumplimiento estricto de las tareas del mantenimiento de los SPI, se garantiza la seguridad de las instalaciones ante los eventos naturales que provocan grandes pérdidas tanto a la Empresa y como al país.

#### Referencias bibliográficas

[1] "Pararrayos, tecnologías de protección externa del rayo". Disponible en: <http://www.sispoint.com/rayo.htm>. (Consulta: noviembre/2007).

[2] "SPCR Sistema de Protección contra Descargas Atmosféricas". Disponible en: [http://www.efn.uncor.edu/departamentos/electrotecnia/lat\\_archivos/spcr/spcr.htm](http://www.efn.uncor.edu/departamentos/electrotecnia/lat_archivos/spcr/spcr.htm). (Consulta: noviembre/2007).

[3] NC-IEC 62305. Protección contra Rayo – Parte 4. Protección de equipos eléctricos y electrónicos contra Lemp, 2006.

[4] Hermoso Alameda, Blas. *Riesgos y medidas de Protección contra Rayo*. España: Universidad Pública de Navarra, 2003.

[5] "Sistemas de Protección contra Descargas Atmosféricas". Cuaderno técnico, no. 168. Biblioteca Técnica de Schneider Electric, agosto 2008.

[6] "Aplicaciones Tecnológicas 2006. Protecciones externas. Disponible en: <http://www.cirprotec.com/productos/externa/pararrayos/index.htm>. (Consulta: noviembre/2007).

[7] "Protecciones contra rayo y sobre tensiones". DEHN-SOHNE Productos. Disponible en [http://www.dehn.de/www\\_DE/PAGES\\_ES\\_INT/productos/prod.html](http://www.dehn.de/www_DE/PAGES_ES_INT/productos/prod.html). (Consulta: noviembre/2007).

# Calidad de la energía eléctrica

Por Ing. Roberto Luis Oquendo Oms, Especialista de Diagnóstico de Energética y Climatización,  
CSGT Camagüey, ETECSA  
roberto@cmg.etecsa.cu

## Introducción

En la sociedad y la industria modernas, se utilizan un gran número de equipos eléctricos y electrónicos encargados de controlar procesos, transmitir información, procesar datos, hacer más entretenida la vida en los hogares etc., todo esto conlleva a un consumo elevado de energía eléctrica, la cual debe cumplir con ciertas exigencias. Este uso masivo de la energía ha traído como resultado la necesidad del estudio de las redes eléctricas y el control por parte de instituciones de las normas que deben cumplir las empresas suministradoras y los fabricantes de equipamiento eléctrico para que estos no contaminen las redes eléctricas con perturbaciones que degraden la calidad de la energía, y lograr de esta forma una importante coordinación entre la empresa suministradora, los fabricantes de equipos y los consumidores.

Por calidad de la energía eléctrica se entiende cuando esta es suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita su funcionamiento sin que se afecten y provoquen fallas a sus componentes [3].

Existen diferentes parámetros que pueden servir como referencia para clasificar las perturbaciones de acuerdo a su impacto en la calidad de la energía.

Las distorsiones e interrupciones siempre han existido en los sistemas eléctricos, sólo que actualmente estas condiciones se ven agravadas por la aparición de nuevas tecnologías que exhiben características altamente no lineales que incrementan considerablemente el deterioro de las señales eléctricas.

Según las consideraciones de la empresa suministradora de energía, la calidad se mide en el punto de servicio al usuario, en tanto el usuario mide la calidad en el punto de utilización; la percepción de calidad de la energía puede variar para un usuario debido a perturbaciones ocasionadas por sus propios equipos o por la influencia de cargas de otros usuarios conectados al mismo punto de distribución de electricidad.

De lo anterior expuesto, se deduce que la calidad de la energía eléctrica no es un aspecto unilateral, está íntimamente ligado con el tipo de equipos, el usuario y la forma de operarlos. Dos usuarios conectados a la misma red eléctrica pueden tener una opinión muy diferente de la calidad del servicio que se les presta, igualmente la percepción de la calidad para un usuario puede cambiar con el tiempo debido a la adquisición de equipos cada vez más sensibles a las perturbaciones eléctricas [10].

Hasta hace algunos años —como prácticamente ocurría en el resto del mundo—, en Cuba se entendía por calidad de la energía mantener la continuidad del servicio eléctrico, sin tomarse en consideración otros parámetros importantes. Debido a las nuevas y recientes inversiones que se realizan, como parte de la revolución energética, este asunto cobra cada día mayor relevancia al exigir por parte de especialistas y técnicos mayor conocimiento del tema.

## Conceptos relacionados con la calidad de la energía eléctrica

Las características ideales de amplitud, forma, frecuencia, simetría, etc. de la onda de tensión producida

por las centrales generadoras pueden verse afectadas por diversas causas. Estas desviaciones de algunos de los parámetros de la onda sinusoidal ideal se conocen como perturbaciones y su influencia incide directamente en la degradación de calidad de la energía eléctrica.

### Parámetros características de la onda sinusoidal

Se denomina corriente alterna a la corriente eléctrica en la que su magnitud y dirección varían cíclicamente. La forma de onda de la corriente alterna más comúnmente utilizada es la de una onda sinusoidal. Para entender los fenómenos eléctricos que se presentan, en la labor de especialistas y técnicos, es necesario conocer las características de la onda sinusoidal porque, en la electrotecnia, se trabaja con corriente alterna cuyas magnitudes varían por una ley que sigue este comportamiento. En la práctica diaria es difícil utilizar las ecuaciones y gráficas que rigen este comportamiento. Algunas de las características de esta onda se relacionan a continuación [1]:

1. Ecuación de la onda:

$$a(t) = A_o \operatorname{sen}(2\pi ft + \theta)$$

donde:

$A_o$ : amplitud en voltios o amperios, llamado valor máximo o de pico.

$f$ : frecuencia Hz.

$t$ : tiempo en segundos.

$\theta$ : ángulo de fase inicial en radianes.

2. Valor instantáneo: es el valor que toma la ordenada en un instante ( $t$ ) determinado, el valor de la tensión se determina por la ecuación:

$$V = V_{\max} \operatorname{sen}(2\pi ft + \theta)$$

2. Valor pico a pico ( $A_{p-p}$ ): diferencia entre un pico o máximo positivo y un pico negativo. Dado que el valor máximo de  $\operatorname{sen}(x)$  es +1 y el valor mínimo

es -1, una señal sinusoidal que oscila entre  $+A_o$  y  $-A_o$ . El valor de pico a pico, escrito como  $A_{p.p}$ , es por lo tanto  $(+A_o) - (-A_o) = 2 \times A_o$ .

3. Valor medio ( $A_{med}$ ): es el promedio de los valores instantáneos de tensión o de corriente en un semicírculo. El área del semicírculo se considera positiva si está por encima del eje de las abscisas y negativa si está por debajo. Como en una señal sinusoidal el semicírculo positivo es idéntico al negativo, su valor medio es nulo. Por eso el valor medio de una onda sinusoidal se refiere a un semicírculo. Mediante el cálculo integral se demuestra que su expresión es la siguiente:

$$A_{med} = \frac{2A_o}{\pi}$$

5. Valor eficaz: este valor es el que produce el mismo efecto calorífico que su equivalente en corriente continua. Matemáticamente, el valor eficaz de una magnitud variable con el tiempo, se define como la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores instantáneos alcanzados durante un período:

$$A = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_a^T a^2 dt}$$

En la técnica, el valor eficaz es de gran importancia porque casi todas las operaciones con magnitudes energéticas se hacen con dicho valor. De ahí que por rapidez y claridad se represente con la letra mayúscula de la magnitud que se trate ( $I$ ,  $V$ ,  $P$ , etc.).

Matemáticamente se demuestra que, para una corriente alterna sinusoidal, el valor eficaz viene dado por la expresión:

$$A = \frac{A_o}{\sqrt{2}}$$

6. Período: es el intervalo de tiempo mínimo, al final del cual los valores instantáneos de la Fuerza Electromotriz (f.e.m) periódica se repiten.

7. Frecuencia ( $f$ ): es una magnitud inversa al período:

$$f = \frac{1}{T}$$

Es igual al número de períodos de la fuerza electromotriz variables por segundo.

Período ( $T$ ): es el intervalo de tiempo al final del cual los valores instantáneos de la f.e.m. periódica se repiten.

Lo que equivale a decir que la frecuencia es igual al número de períodos de la f.e.m. variables por segundo.

8. Frecuencia angular ( $W$ ): es la velocidad de variación del ángulo de fase. En un período  $T$ , el ángulo de fase varía uniformemente en  $2\pi$ .

$$W = \frac{2\pi}{T} \quad W = 2\pi f$$

9. Factor de Cresta: es igual a la amplitud del pico de la forma de onda dividida por el valor eficaz. El propósito del cálculo de este factor es dar una idea rápida sobre cuán distorsionada está la forma de onda medida con respecto de una onda sinusoidal pura [2].

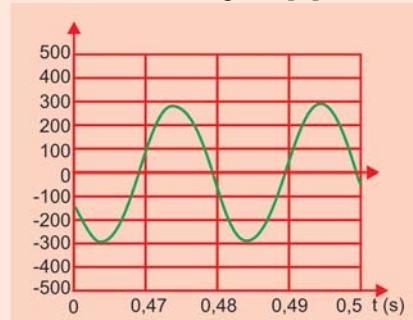


Figura 1 Onda sinusoidal

#### Parámetros característicos de las perturbaciones eléctricas

1. Variaciones de frecuencia: consisten en la desviación de la frecuencia fundamental del sistema de potencia respecto a su valor nominal. Esto se debe a desequilibrios bruscos entre la generación y la carga. Su aparición es más sensible en sistemas aislados.

2. Huecos de tensión: es una súbita reducción de la tensión, entre un 90 % y un 10 % de la tensión nominal ( $Un$ ), seguida de una recuperación luego de un período corto de tiempo. Convencionalmente la duración de un hueco de tensión es entre 10 ms y 1 minuto. Este fenómeno es asociado a cortocircuitos en las líneas, a la energización de grandes cargas o al arranque de grandes motores [3].

3. Cortes de tensión: son un caso particular de los huecos de tensión, de profundidad superior al 90 %, se caracterizan por un único parámetro: la duración. Los cortes breves tienen una duración inferior a tres minutos que aparecen periódicamente en la forma de onda de la tensión [2].

4. Desviación de tensión: diferencia entre el valor real de tensión y su valor nominal para el circuito. Esta desviación no debe ser inferior al 10 % de la tensión nominal. Las desviaciones de tensión son una sucesión de variaciones de tensión cíclica o aleatoria de la onda de tensión cuyas características son la frecuencia de la variación y su amplitud. Si la tensión de desviación se expresa en porcientos de la tensión nominal, y la tensión real y la nominal en volt, entonces [3]:

$$V_d = \frac{V - V_N}{V_N} \cdot 100 \%$$

donde:

$V_d$  ⇒ tensión de desviación

$V$  ⇒ tensión real

$V_N$  ⇒ tensión nominal

5. Desequilibrios: en los sistemas trifásicos el desequilibrio ocurre cuando las tres tensiones no son iguales en amplitud o no están desfasadas unas respecto a otras  $120^\circ$ . Se presenta mayormente al existir cargas monofásicas conectadas al sistema sin ser adecuadamente balanceadas. En la práctica para tener una idea del problema se utiliza la fórmula [3]:

$$\Delta V = \frac{V_f - V_{med}}{V_{med}}$$

donde:

$\Delta V$  ⇒ desviación de la tensión

$V_f$  ⇒ tensión de fase

$$V_{med} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

$V_1, V_2, V_3$ , ⇒ tensión de cada una de las fases

6. Ruido de alta frecuencia: son señales no deseadas con un espectro armónico disperso cuya frecuencia fundamental es inferior a 200 kHz. Estas señales se encuentran superpuestas a las formas de onda de tensión o corriente y pueden ser originadas por sistemas que funcionan con electrónica de potencia.

7. Sobretensores transitorios: son variaciones de las tensiones o corrientes del sistema que se transmiten a través de las redes de distribución, son de muy corta duración pero de valor eficaz muy elevado lo que provoca, en muchos casos, el deterioro y destrucción de los receptores [4].

Las sobretensores transitorios tienen sus orígenes bien diferenciados:

- ♦ Descargas atmosféricas: las tormentas y las descargas de rayos sobre cualquier cable provocan sobretensores transitorios en los conductores que se caracterizan por su corta duración y valores de cresta muy elevados, hasta varias centenas de kV.
- ♦ Maniobras en la red: las comutaciones en las subestaciones de la empresa suministradora de energía eléctrica, las comutaciones de maquinaria de gran potencia, el accionamiento de motores, son causantes de este fenómeno.

8. Fluctuaciones de tensión: son variaciones asimétricas de la envolvente de tensión las cuales pueden ser continuas o aleatorias. Las cargas que provocan variaciones continuas y rápidas generan el efecto llamado *flicker* de tensión. Este fenómeno conocido como parpadeo hace variar la intensidad luminosa que afecta la visión humana, principalmente, en el rango de frecuencias hasta 25 Hz. Este fenómeno depende de los niveles de percepción de las personas. Se ha comprobado estadísticamente que la visión humana responde a una curva de respuesta de frecuencia cuya sensibilidad máxima está en 8,8 Hz, en que variaciones del 0,25 % de la tensión producen fluctuaciones luminosas en lámparas que son perceptibles como "parpadeo". Este tema se agudiza con las perturbaciones armónicas, el problema global es reducido al lograr niveles admisibles de distorsión armónica [5].

9. Armónicos de tensión: es una tensión sinusoidal de frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental (60 Hz) de la tensión de suministro. Las tensiones armónicas pueden ser evaluadas:

- ♦ Individualmente, por su amplitud relativa ( $U_h$ ) relacionada a la tensión de la componente fundamental  $U_1$ , donde ( $h$ ) es el orden del armónico.
- ♦ Globalmente, mediante el cálculo de la distorsión armónica total, utilizando la siguiente expresión:

$$THD_t = \sqrt{\sum_{h=1}^{40} U_h^2} / U_1$$

donde:

$THD_t \Rightarrow$  tasa de distorsión armónica de tensión [2]

10. Armónicos de corriente: es una corriente sinusoidal de frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental (60 Hz). Los armónicos de corriente que fluyen a través de la impedancia del sistema dan lugar a armónicos de tensión.

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=1}^{40} I_h^2} / I_1$$

donde:

$THD_i \Rightarrow$  tasa de distorsión armónica de corriente [2]

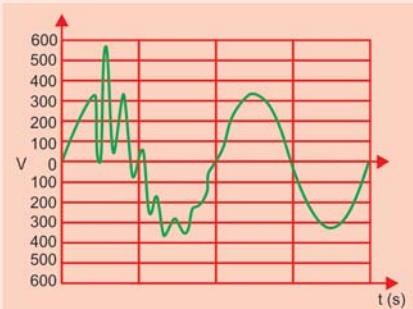


Figura 3 Onda de tensión deformada por efecto de la perturbación armónica

#### Efectos perjudiciales de las perturbaciones armónicas

Las perturbaciones armónicas son motivo de preocupación por los efectos perjudiciales que provocan en las redes eléctricas, algunos de estos efectos son [3]:

- ♦ Envejecimiento prematuro del aislamiento de los conductores eléctricos.
- ♦ Disparos intempestivos de interruptores termomagnéticos.
- ♦ Calentamiento excesivo de los transformadores con cargas inferiores a las nominales.
- ♦ Interferencia en equipos de comunicaciones.
- ♦ Destrucción por sobrecarga térmica de condensadores.

#### La calidad de la energía eléctrica y las telecomunicaciones

En la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba, S.A., debido a la importancia del uso de la energía eléctrica para el correcto funcionamiento del equipamiento en las instalaciones de telecomunicaciones, se presta especial atención al estudio de las redes eléctricas para garantizar, desde la etapa de proyecto, la observación de normas internacionales de referencia. En consecuencia, se toman en cuenta recomendaciones y criterios de fabricantes de equipos para su instalación, se capacita al personal técnico en el empleo de nuevos métodos de diagnóstico de calidad de la energía y se trazan planes de ahorro de energía. Todas estas acciones influyen en que la electricidad sea utilizada, de forma óptima, con el propósito de lograr que el usuario del servicio telefónico no se vea afectado por interrupciones que pueden evitarse con la intervención preventiva del personal técnico.

#### Conclusiones

Las perturbaciones eléctricas pueden originarse en la red de distribución, en la instalación del usuario afectado o en la de un usuario próximo. Según la afectación económica y el campo de aplicación, estas perturbaciones tienen diversas consecuencias que afectan, desde la incomodidad hasta el deterioro de los equipos e, incluso, el riesgo para las personas. La búsqueda de una mejor eficiencia de las empresas hace que la calidad de la energía eléctrica sea un objetivo estratégico.

téxico. Las perturbaciones eléctricas no deben ser sufridas como una fatalidad, pues existen soluciones. Su aplicación, teniendo en cuenta las normas técnicas por parte especialistas y técnicos, permite alcanzar una calidad de energía eléctrica personalizada, adaptada a las necesidades de cada consumidor.

#### Referencias bibliográficas

- [1] Evdokimov, F. *Fundamentos teóricos de la electrotecnia*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, Cuba, 1998.
- [2] Félice, E. *Perturbaciones armónicas*. España: Editorial Paraninfo, 2001.
- [3] Ferracc, P. "La calidad de la energía eléctrica". Cuaderno técnico Schneider, no. 199 (2004): 40-55.
- [4] Calvas, Roland. "Perturbaciones en los sistemas electrónicos y esquemas de conexión a tierra". Cuaderno técnico Schneider, no. 177 (2000): 33-47.
- [5] Wierda, René. "Flicker o parpadeo de las fuentes luminosas". Cuaderno técnico Schneider, no. 176 (2001): 25-38.
- [6] Vaillant, F. "La compatibilidad electromagnética". Cuaderno técnico Schneider, v. 7, no. 149 (2000): 57-70.
- [7] Collombet, C. "Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento". Cuaderno técnico Schneider, v. 7, no. 152, (2000): 15-27.
- [8] "Detección y filtrado de armónicos" (2003). Disponible en: [http://www.spse.com.ar/sitios\\_internos/mantenimiento\\_distrito/electrica/catalogos/schneider/03\\_Compensacion\\_y\\_filtrado\\_de\\_armonicos/](http://www.spse.com.ar/sitios_internos/mantenimiento_distrito/electrica/catalogos/schneider/03_Compensacion_y_filtrado_de_armonicos/). (Consulta: noviembre/2008).
- [9] Acevedo F. "Componentes armónicas en redes de distribución eléctrica" (2007). Disponible en: <http://www.revistamarina.cl/revistas/2001/5/Acevedo.pdf>. (Consulta: febrero/2008).
- [10] Daehler, P.; Eichier, M.; Gaupp, O.; hofer, G. "Dispositivos de calidad de la energía eléctrica: más estabilidad para los procesos de fabricación" (2001). Disponible en: <http://www.Library.abb.com>. (Consulta: febrero/2008).
- [11] Ferracci, P. "La calidad de la energía eléctrica" (2004). Disponible en: <http://www.schneiderelectric.es>. (Consulta: enero/2008).
- [12] Procobre. "Calidad de la energía" (2005). Disponible en: <http://www.procobrevenezuela.org>. (Consulta: enero/2008).
- [13] Rivera, B. "Calidad de suministro eléctrico" (2007). Disponible en: <http://www.peandes.unex.es/formacion.pdf>. (Consulta: febrero 2008).
- [14] Tejadas A.; Llamas A. "Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos" (2005) Disponible en: <http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores.pdf>. (Consulta: febrero/2008).

# Grupos electrógenos y calidad de la energía

Por Marielys Francisco Fernández, Raúl Díaz Fuentes, Miguel Castro Fernández y Ángel Costa Montiel

Este artículo apareció publicado originalmente en la revista electrónica *Energética*, vol. XXVIII, no. 2 (2007): 35-44. Su equipo editorial cedió amablemente los derechos de publicación en nuestra revista.

## Introducción

Puede plantearse que hoy día aún no existe una definición rigurosa del concepto de Generación Distribuida (GD), el cual, de manera general, se refiere a la generación de energía eléctrica mediante instalaciones mucho más pequeñas que las grandes centrales convencionales, y situadas cerca de las instalaciones que consumen esta energía eléctrica. Según la definición del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos—*Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE)—, la cual es una de las más conocidas, la Generación Distribuida “(...) es la generación de electricidad mediante instalaciones que son suficientemente pequeñas en relación con las grandes centrales de generación, de forma que se puedan conectar casi en cualquier punto de un sistema eléctrico” [1].

Teniendo en cuenta el concepto de diversos autores se podría traducir como:

- ♦ Generación en pequeña escala instalada cerca del lugar de consumo.
- ♦ Producción de electricidad con instalaciones que son suficientemente pequeñas en relación con las grandes centrales de generación, de forma que se puedan conectar casi en cualquier punto de un sistema eléctrico.
- ♦ Generación conectada directamente en las redes de distribución.
- ♦ Generación de energía eléctrica mediante instalaciones mucho más pequeñas que las centrales convencionales y situadas en las proximidades de las cargas.
- ♦ Sistemas de generación eléctrica o de almacenamiento, que están situados dentro o cerca de los centros de carga.
- ♦ Producción de electricidad por generadores colgados, o bien en el sistema eléctrico de la empresa, en el sitio del cliente, o en lugares aislados fuera del alcance de la red de distribución.
- ♦ Generación de energía eléctrica a pequeña escala cercana a la carga, mediante el empleo de tecnologías eficientes, destacando a la cogeneración, con la cual se maximiza el uso de los combustibles utilizados.

Puede decirse entonces que la GD es un sistema que comprende la generación de energía eléctrica localizada, cercana al centro de carga con almacenamiento y administración de la misma, que puede trabajar de forma

aislada o integrada a la red eléctrica, para proporcionar múltiples beneficios en ambos lados del medidor.

El auge de los sistemas de GD se debe a los beneficios inherentes a la aplicación de esta tecnología, tanto para el usuario como para la red eléctrica. A continuación se mencionan algunos de los beneficios.

### Beneficios para el usuario

- ♦ Incremento en la confiabilidad.
- ♦ Aumento en la calidad de la energía.
- ♦ Reducción del número de interrupciones.
- ♦ Uso eficiente de la energía.
- ♦ Menor costo de la energía.
- ♦ Uso de energías renovables.
- ♦ Facilidad de adaptación a las condiciones del sitio.
- ♦ Disminución de emisiones contaminantes.

### Beneficios para el suministrador

- ♦ Reducción de pérdidas en transmisión y distribución.
- ♦ Abasto en zonas remotas.
- ♦ Libera capacidad del sistema.
- ♦ Proporciona mayor control de energía reactiva.
- ♦ Mayor regulación de tensión.
- ♦ Disminución de inversión.
- ♦ Menor saturación.
- ♦ Reducción del índice de fallas.

Entre las tecnologías que se han ido introduciendo en los sistemas eléctricos con la concepción de la Generación Distribuida, están los Grupos Electrógenos (GE) que han mostrado una mayor posibilidad de uso por su facilidad de operación, simplicidad y seguridad (Figura 1).



Figura 1 Grupos Electrógenos

## Grupos electrógenos y calidad de la energía

En la red eléctrica, los GE han sido utilizados, por lo general, para compensar las interrupciones de energía de las redes de distribución, donde la falta de esta puede causar daños importantes o donde la red eléctrica no está disponible, es insuficiente o no es rentable —lugares muy apartados o de difícil acceso donde llevar la electricidad de forma tradicional no es económico por las grandes distancias, ejemplo: islas o pequeños asentamientos en parajes intrincados—.

De igual manera, el grupo electrógeno se ha constituido en un elemento de extrema necesidad y seguridad en grandes tiendas, negocios y todo lugar donde exista una movilidad de personas.

Los GE pueden prestar servicios generando:

- ♦ **De forma continua** durante 24 horas e ininterrumpidamente como generación base.

- ♦ **De forma intermitente** para servicios donde es necesario equilibrar los consumos, cubrir picos de consumo.

- ♦ **Como servicio de emergencia** en hospitales, sanatorios, etcétera.

Aún cuando la red de alimentación de energía eléctrica en un sistema cualquiera se mantenga en general sin problemas en el servicio, es recomendable la colocación de grupos electrógenos en todos los edificios donde existan posibilidades de riesgos personales —policlínicos, hospitalarios—, así como también en edificios de más de tres pisos de altura, teatros, clubes y estadios deportivos; lugares donde por su importancia económica o social sea necesario el servicio continuo de electricidad.

Según la norma ISO 8528 [2] los GE poseen dos regímenes de funcionamiento:

- ♦ Grupos de generación o producción.
- ♦ Grupos de emergencia.

Los GE presentan los siguientes modos de operación:

- ♦ **Operación continua a carga constante**: operación del grupo sin tiempo límite tomando en consideración los períodos de mantenimiento.

Ejemplo: operando como carga base en ciclo combinado.

- ♦ **Operación continua a carga variable**: operación del grupo sin tiempo límite tomando en consideración los períodos de mantenimiento.

Ejemplo: cuando el grupo opera en una localización donde no existe otra instalación o donde la alimentación de la instalación existente no es confiable.

- ♦ **Operación limitada a carga constante**: se define como la operación del grupo limitada en tiempo a carga constante.

Ejemplo: cuando el grupo opera en paralelo con alguna instalación o con el sistema durante los períodos de carga pico.

- ♦ **Operación limitada en tiempo a carga variable**: se define como la operación del grupo limitada en tiempo a carga variable.

Ejemplo: cuando el grupo realiza función de soporte básico a una instalación dada —grupo de emergencia— ante la falta de la alimentación a la instalación.

Cuando los GE están conectados a una red eléctrica puede caracterizarse por su conexión de forma aislada o varias unidades en paralelo (baterías); esta forma de GD trae nuevas consecuencias técnicas en la red, como son:

- ♦ Las redes dejan de ser radiales para convertirse en anillos con varias unidades generadoras, por lo que se obtienen flujos de potencia y de cortocircuito en varias direcciones.

- ♦ Se tienen más altas constantes de tiempo y se deben tener más cortos tiempos de limpieza por problemas de estabilidad.

- ♦ Se requiere un cambio en el sistema de protecciones que garantice una calidad del suministro eléctrico a los consumidores durante las condiciones de operación normal y de emergencia, lo cual constituye un reto para los ingenieros en protección.

Otra de las direcciones en la que hay que trabajar y definir los problemas es la Calidad de la Energía (CEL). Como se conoce, la CEL es un concepto que hoy forma parte intrínseca de la gestión de una empresa eléctrica pues no sólo pasa por cuestiones relacionadas con el comportamiento de indicadores técnicos como pueden ser la Duración Equivalente de las Interrupciones del Servicio (DES), la Frecuencia Equivalente de las Interrupciones del Servicio (FES) o la Distorsión Individual o Total de Armónicas (DTA), sino que tiene en cuenta también aspectos relacionados con la atención al cliente.

Por lo general se plantea que existen cuatro variables que definen la CEL:

- ♦ Amplitud de la señal.
- ♦ Frecuencia de la señal.
- ♦ Forma de la señal.
- ♦ Continuidad del servicio.

La entrega de potencia que los GE deben hacer al sistema necesita cumplir con estos requerimientos; pero, también, debe tenerse en cuenta las influencias que el sistema pueda tener sobre el comportamiento de estos grupos. Desde este punto de vista, es conveniente considerar los diferentes tipos de perturbaciones que pueden afectar el funcionamiento de los GE, vistos como un todo y agrupados en siete categorías:

- ♦ Transitorios electromagnéticos.
- ♦ Variación de tensión de corta duración.
- ♦ Variación de tensión de larga duración.
- ♦ Desbalance de tensión.

- ♦ Distorsión de la forma de la señal.
- ♦ Fluctuaciones de tensión.
- ♦ Variaciones de la frecuencia industrial.

Entre las perturbaciones más conocidas, que forman parte de estos grupos, están los armónicos, cuyos efectos nocivos provocan en generadores y motores un incremento en el calentamiento de los mismos, debido a las pérdidas de hierro y cobre a las frecuencias de las armónicas; la eficiencia de estos equipos resulta afectada al ser necesario limitar la carga para mantener dentro de límites determinados, para que no afecte sus características, el aislamiento de los enrollados. Otro aspecto es la posible presencia de oscilaciones mecánicas en grupos turbo-generador y/o carga – motor a consecuencia de pares de armónicas particulares como la 5<sup>ta</sup>. y 7<sup>ma</sup>. armónicas, lo que puede llevar al envejecimiento acelerado del eje y las partes mecánicas conectadas al mismo, lo que conlleva al fallo por fatiga.

Otra de las perturbaciones más conocidas son las fluctuaciones de tensión en la red, que muchos especialistas identifican con las titilaciones (*flicker*) que se producen en los sistemas de iluminación. Al respecto es bueno aclarar que las titilaciones son una consecuencia de las fluctuaciones de tensión, que son una sucesión de variaciones de tensión o de variaciones cíclicas o aleatorias de la envolvente de tensión cuyas características son la frecuencia de la variación y su amplitud; este fenómeno puede producirse debido a cargas con variaciones continuas y rápidas en la magnitud de la corriente de carga que pueden causar variaciones de tensión. En resumen, puede decirse que la fluctuación de tensión es en realidad un fenómeno electromagnético, mientras que la titilación o *flicker* es un resultado indeseable de la fluctuación de tensión en algunas cargas.

Durante varias ocasiones, a finales de la década de 1990, especialistas cubanos realizaron mediciones de fluctuación de tensión en las industrias siderúrgicas. Más recientemente, tras la realización de una medición puntual en la barra de 220 kV de una de las subestaciones fundamentales del SEN —Sistema Electroenergético Nacional—, se detectaron valores muy altos para el Factor de Distorsión de Armónicas —THD, según sus siglas en inglés—, tanto para la corriente como para la tensión; posteriormente, se ejecutó un grupo de mediciones simultaneando lecturas de ambos parámetros por diferentes alimentadores de dicha subestación y de otras a niveles de 110, 34,5 y 13 kV, pertenecientes a una red regional, observándose valores de THD de tensión del orden de 1,5 % y THD de corriente del orden del 40 %, en la barras de la subestación de 220 kV, superiores a los que se debían esperar, mientras que estos valores no eran superiores a lo permisible, según las regulaciones internacionales, en el resto de los nodos donde se efectuó

la medición. De aquí se extrajo la conclusión de que era muy posible que la empresa que se alimentaba de la barra monitoreada, una empresa de muy alta carga, podría estar introduciendo señales de armónicas que navegarían a través de la red de 220 kV, no siendo así en el caso de la red de 110 kV y/o distribución.

De forma resumida, la situación en Cuba con relación a la CEL, es la siguiente:

- ♦ No hay regulaciones sobre el tema ni dentro del propio sector eléctrico ni hacia productores o comercializadores de equipos e, incluso, ni hacia los clientes o usuarios de los equipos.
- ♦ Se han realizado estudios muy limitados, tanto en lo referente al alcance como a los resultados, dirigidos fundamentalmente a evaluar de modo puntual el problema del *flicker* o de las variaciones de tensión y de los armónicos.
- ♦ No hay una cultura sobre el tema, ni en las propias empresas eléctricas del país ni en los usuarios.

La introducción de los GE en forma masiva en el sistema eléctrico cubano impone la necesidad de analizar este tema más a profundidad, si se considera la función que desempeñan en dicho sistema estos GE.

### Grupos Electrógenos en Cuba

La máxima dirección del gobierno cubano ha decidido para los próximos años utilizar, de forma intensiva, los GE considerando las ventajas que hoy plantea este tipo de generación distribuida.

Los GE diesel que se han instalado en el país trabajan en régimen de emergencia, sin sincronización a la red, y en régimen de producción, aislado o en baterías.

En régimen de emergencia los GE, con capacidades que van desde 7 kVA hasta de 500 kVA en su mayoría, alimentan pequeñas cargas de importancia social o económica como panaderías, policlínicos y empresas, y la idea es que sean utilizados para aliviar al sistema en horarios picos al asumir su carga cuando esta se desconecte de la red.

Cuando funcionan en régimen de producción conformando baterías, las mismas pueden trabajar en régimen normal o en emergencia; en ambas condiciones se encuentran sincronizadas en paralelo con la red de distribución.

Las baterías están constituidas por grupos de motores múltiples de cinco u ocho, en dependencia del GE —por ejemplo, una batería son cinco u ocho motores, dos baterías son 10 ó 16 motores y así sucesivamente—. Cuando están en funcionamiento normal, disponiendo de tensión en el lado de baja del transformador, el motogenerador arranca por programación horaria o manualmente por una orden del operador. El sistema de sincronización

verifica el sincronismo a ambos lados del interruptor de conexión y automáticamente cierra cuando se verifique la condición de sincronismo entre ambos lados. Las mismas baterías se dice que están en funcionamiento de emergencia cuando los grupos motogeneradores arrancan sólo a falta de la red y sin tensión en la barra de baja tensión de los transformadores elevadores, siendo esta operación manual. Debido a una caída del SEN, las baterías de GE pueden trabajar como islas, pero debe tenerse en cuenta que quedarán aislados de cualquier otra generación, encargándose de la vigilancia de tensión y frecuencia. En situación de isla las cargas se introducirán de forma progresiva para que estos grupos tengan tiempo de poder absorberlas y reparárselas.

Cuando los GE son de mayor potencia que los de emergencia y en conformación solitaria o de grupos de dos o tres GE, trabajan sincronizados a la red y pueden, en caso de que la red quede sin energía, alimentar una parte del sistema eléctrico, estando desconectado eléctricamente del resto del sistema, se dice que están trabajando en régimen de producción aislado. En esta situación los GE pueden trabajar en horarios picos para aliviar la demanda y así ayudar al SEN.

Los grupos electrógenos de fueloil que ya se están instalando formarán parte del régimen base, sincronizados a la red, con un modo de entrega de potencia continua, entendiéndose como entrega de potencia continua la máxima potencia que el GE es capaz de entregar continuamente a una carga eléctrica constante cuando opera un número ilimitado de horas bajo las condiciones de operación que el productor ha establecido, que incluye sus intervalos de mantenimiento y los procedimientos de operación, según se presenta en la figura 2.

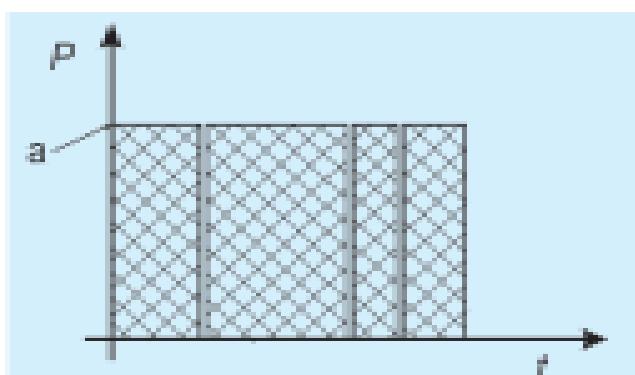


Figura 2 Entrega de potencia en forma continua

Desde el punto de vista de la CEL, los GE deben cumplimentar requerimientos técnicos para la tensión, la frecuencia y las potencias de entrega. Estos requerimientos, establecidos en la ISO 8528,2 están acordes con las clases de comportamiento de los GE, los cuales, a su vez, están en concordancia con las cargas que alimentan dichos GE, y que son:

- **Clase G1:** aplica para los grupos donde están conectadas cargas que solo requieren los parámetros básicos de tensión y frecuencia.

Ejemplo: aplicaciones de propósito general —cargas eléctricas sencillas y de iluminación—.

- **Clase G2:** aplica para grupos donde las características de tensión sean muy similares a las del sistema eléctrico público comercial con el cual opera. En estos casos, se permiten desviaciones temporales de tensión y frecuencia cuando ocurren cambios en la carga.

Ejemplo: sistemas de iluminación, bombas, ventiladores y grúas.

- **Clase G3:** aplica cuando los equipos conectados demandan, de los grupos, determinadas características de estabilidad y niveles de frecuencia, tensión y forma de ondas.

Ejemplo: cargas de telecomunicaciones o controladas por tiristores.

- **Clase G4:** aplica cuando los requerimientos de estabilidad y niveles de frecuencia, tensión y forma de onda son excepcionalmente severas.

Ejemplo: equipamiento que procesa información o sistemas de cómputos.

Para un óptimo funcionamiento del GE hay que conocer a qué clase pertenece —G1, G2, G3 o G4— y, según esta, hacer un análisis de sus límites de variación de tensión, sus requerimientos de frecuencia y de potencia activa y/o reactiva.

Como dato de interés, los GE instalados en Cuba, se consideran con clase de comportamiento dentro del grupo G3.

## Resultados y discusión

Para iniciar los estudios sobre el comportamiento desde el punto de vista de la CEL, se decidió realizar una simulación, utilizando como programa base el MatLab, de dos tipos de GE, y comparar su comportamiento con otros generadores, a través de su respuesta ante tres tipos de perturbaciones diferentes:

- Cortocircuito sincrónico trifásico a la salida de los terminales de la máquina.

- Desconexión súbita total de la carga.

- Desconexión parcial de la carga.

Para ello se modelaron seis tipos de generadores: dos hidrogeneradores, dos generadores de combustión interna convencionales de plantas termoeléctricas y dos

| Parámetros   |      | MTU   | MAN    | H4     | H9     | F1     | F7    |
|--|------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Tensión  | Volt | 480   | 13 800 | 13 800 | 13 800 | 13 800 | 15 00 |
| Potencia   | MVA  | 2,360 | 4,875  | 35     | 86     | 25     | 147   |
| Reactancia sincrónica de eje directo                         | Xd   | 3,050 | 1,721  | 1,000  | 1,050  | 1,250  | 1,537 |
| Reactancia sincrónica de eje en cuadratura                   | Xq   | 1,750 | 0,924  | 0,620  | 0,670  | 1,220  | 1,520 |
| Reactancia transitoria en eje directo                        | X'd  | 0,299 | 0,309  | 0,260  | 0,320  | 0,332  | 0,299 |
| Reactancia subtransitoria en eje directo                     | X"'  | 0,160 | 0,187  | 0,235  | 0,258  | 0,120  | 0,216 |
| Reactancia subtransitoria                                    | X"q  | 0,168 | 0,208  | 0,264  | 0,306  | 0,120  | 0,216 |
| Reactancia de secuencia negativa                             | X2   | 0,158 |        | 0,270  | 0,312  |        |       |
| Cte de tiempo transitoria de circuito abierto en eje directo | T'do | 3,600 | 4,393  | 7,100  | 4,000  | 4,750  | 4,300 |
| Cte de tiempo transitoria de cortocircuito en eje directo    | T'd  | 0,350 | 0,869  | 2,300  | 2,020  | 0,882  | 0,836 |
| Cte de tiempo subtransitoria en eje directo                  | T"'  | 0,018 | 0,012  | 0,035  | 0,051  | 0,035  | 0,035 |
| Cte de tiempo de cortocircuito de armadura                   | Ta   | 0,043 | 0,089  | 0,018  | 0,286  | 0,177  | 0,470 |

Tabla 1 Parámetros de las diferentes turbinas simuladas

de GE, uno diesel (MTU) y otro de fueloil (MAN), cuyos parámetros se encuentran en la tabla 1.

A partir de las ecuaciones transformadas de Park —para tensión, flujo, torque electromagnético y movimiento— [3] se realizaron las simulaciones que permitieron evaluar el comportamiento de los GE y los otros generadores ante las perturbaciones planteadas.

#### Cortocircuito sincrónico trifásico a la salida de los terminales de la máquina

La corriente de cortocircuito es la máxima intensidad de corriente que se produce súbitamente cuando la tensión  $U$  en los bornes del generador es igual a cero, y sus valores picos son el máximo valor que puede alcanzar dicha corriente de cortocircuito, los cuales corresponden a una onda de corriente alterna con componentes de directa. La corriente que circula por cada fase del generador en cortocircuito, es similar a la que circula por un circuito R-L serie, alimentado bruscamente por una fuente de tensión sinusoidal, es decir, la corriente es asimétrica respecto al eje de tiempo y disminuye en forma exponencial. Sin embargo, existe una diferencia fundamental y ella radica en que la reactancia del



Figura 3 Respuesta de los GE a un cc súbito, trifásico en los terminales del generador

generador no permanece constante durante el fenómeno, lo cual se puede observar en la figura 3.

| No. | GE  | Razón 1-3 | Razón 1-4 | Razón 1-5 |
|-----|-----|-----------|-----------|-----------|
| 1   | MTU | 1,81      | 1,24      | 1,17      |
| 2   | Man | 1,40      | 1,11      | 1,10      |
| 3   | H4  | 1,50      | 1,12      | 1,11      |
| 4   | H9  | 1,12      | 1,05      | 1,04      |
| 5   | F1  | 1,36      | 1,13      | 1,11      |
| 6   | F7  | 1,13      | 1,05      | 1,04      |

Tabla 2 Variación de la Icc en cada generados

En la tabla 2 se presentan las variaciones de la corriente de cortocircuito que sufren, en los primeros ciclos, los diferentes tipos de generadores.

El mayor valor de Icc lo presenta la turbina convencional de combustión interna F1 de 25 MVA con un valor de 15,15 en pu. Los que le siguen a continuación en orden decreciente son los grupos electrógenos MTU de 2,35 MVA y MAN de 3,87 MW con valores de 10,28 y 9,15 en pu respectivamente.

En cada caso —las turbinas convencionales de combustión interna, las de las hidroeléctricas y las de los electrógenos— mientras menor sea la potencia, mayor será la Icc.

Si se analiza la Icc durante un tiempo más prolongado, con lo cual se puede observar cómo la máquina llega a su estabilidad,

|     | <b>Xd</b> | <b>X'd</b> | <b>X''d</b> | <b>Pico</b> | <b>t estable</b> |
|-----|-----------|------------|-------------|-------------|------------------|
| MTU | 3,05C     | 0,299      | 0,160       | 2,11        | 2,15             |
| Man | 0,721     | 0,308      | 0,187       | 2,27        | 5,50             |
| H4  | 0,00C     | 0,260      | 0,236       | 2,77        | 2,36             |
| H9  | 0,05C     | 0,320      | 0,258       | 2,18        | 10,00            |
| F1  | 0,25 C    | 0,332      | 0,120       | 1,64        | 4,60             |
| F7  | 0,537     | 0,299      | 0,216       | 0,93        | 5,55             |

Tabla 3 Variación de la Icc hasta alcanzar su estado estable

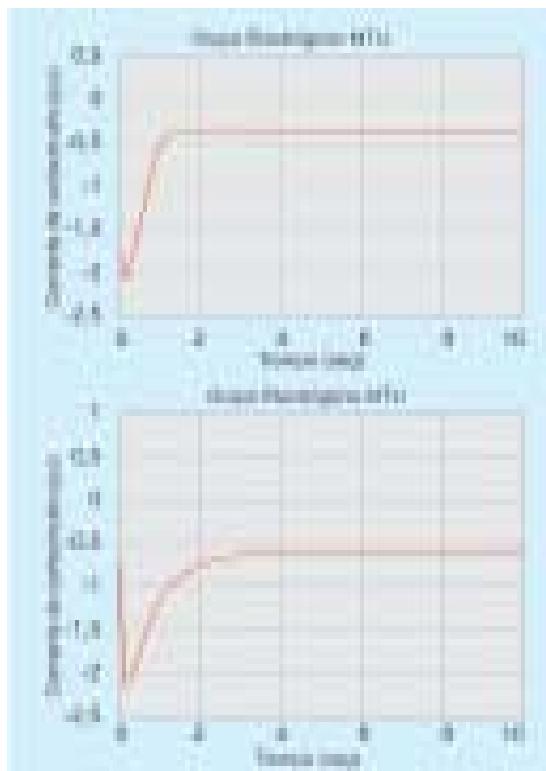


Figura 4 Variación de Icc hasta alcanzar el estado estable

y el mayor valor alcanzado de Icc pasado los primeros instantes, se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 3 y en la figura 4.

Como puede observarse la mayor Icc, hasta que las turbinas alcancen su estado estable, la tiene la turbina de hidroeléctrica H4 y a continuación están los GE. Es precisamente el GE MTU de 2,35 MVA el que menor tiempo toma en alcanzar la estabilidad con 2,15 s.

#### Desconexión súbita total de la carga

Ante una anomalía o falla del sistema eléctrico que ocasione la desconexión súbita del GE del sistema, es decir, la unidad pierde la carga que estaba alimentando y se presenta el fenómeno conocido como rechazo de carga —reactiva, activa y/o nominal—, el cual se entiende como el comportamiento del generador ante la anomalía. Al ocurrir un rechazo de carga, la unidad tiende a incrementar su velocidad y el regulador de velocidad de la misma debe controlar este evento, manteniéndola girando a su velocidad nominal y lista para su reconexión al sistema, con lo que de este modo se evita que se produzca una velocidad tan alta que cause daño a la unidad, a la vez que se mantiene su disponibilidad para el sistema, aunque es inevitable una variación de la tensión en los terminales de salida del GE. Los resultados obtenidos de la simulación se presentan en la tabla 4 y la figura 5, para el caso de los GE.

La turbina que presenta mayor rechazo de carga reactiva frente a una caída total del sistema es el GE MTU; como dato de interés al respecto, este generador tienen una Xd muy elevada (3,05 pu) lo cual puede ser la causa de este resultado. La segunda turbina de mayor rechazo es también el GE MAN.

#### Desconexión parcial de la carga

La disminución parcial brusca de la carga que se alimenta desde los GE, sin llegar a la desconexión de la misma, puede provocar la variación de la corriente en el estator del generador del GE. Para el caso

|     | <b>P(MW)</b> | <b>Xd</b> | <b>X'd</b> | <b>X''d</b> | <b>V</b> | <b>t (s)</b> |
|-----|--------------|-----------|------------|-------------|----------|--------------|
| MTU | 2,35         | 3,050     | 0,299      | 0,180       | 2,83     | 21,20        |
| Man | 3,87         | 1,721     | 0,308      | 0,187       | 2,03     | 25,25        |
| H4  | 35,00        | 1,000     | 0,260      | 0,235       | 1,43     | 33,35        |
| H9  | 86,00        | 1,050     | 0,320      | 0,258       | 1,46     | 22,65        |
| F1  | 25,00        | 1,250     | 0,332      | 0,120       | 1,765    | 28,85        |
| F2  | 147,00       | 1,537     | 0,299      | 0,216       | 1,81     | 25,25        |

Tabla 4 Variación de la tensión en los terminales del GE al ocurrir una desconexión súbita de la carga

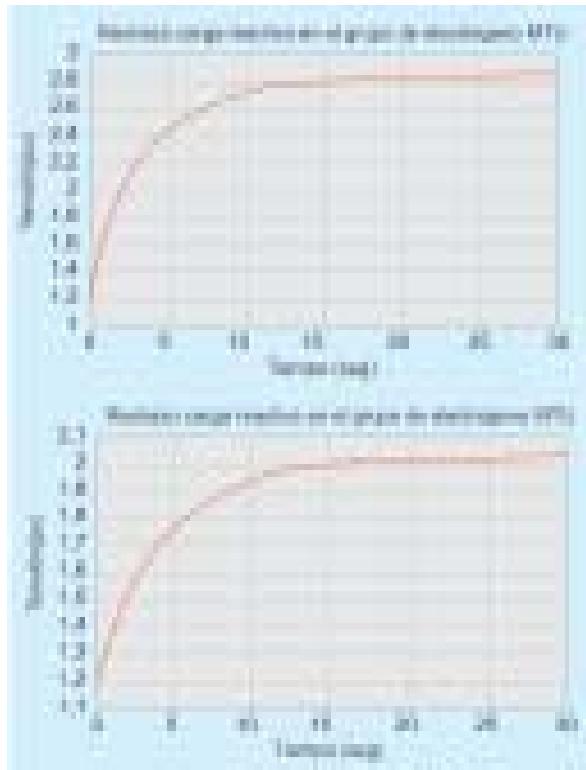


Figura 5 Variación de la tensión en los terminales de los GE al ocurrir una desconexión súbita de la carga

| Corriente en los ejes |     |     |
|-----------------------|-----|-----|
|                       | diq | did |
| Primer caso           | 0,3 | 0,3 |
| Segundo caso          | 0   | 0,3 |
| Tercer caso           | 0,3 | 0   |

|     | X <sub>d</sub> | X' <sub>d</sub> | X'' <sub>d</sub> | Primer caso | Segundo caso | Tercer caso |
|-----|----------------|-----------------|------------------|-------------|--------------|-------------|
|     | U              | t (s)           | U                | t (s)       | U            | t (s)       |
| MTU | 3,050          | 0,299           | 0,160            | 0,479       | 0,116        | 0,090       |
| Man | 1,721          | 0,308           | 0,187            | 0,369       | 0,500        | 0,093       |
| H4  | 1,000          | 0,260           | 0,235            | 0,264       | 0,250        | 0,078       |
| H9  | 1,050          | 0,320           | 0,258            | 0,296       | 0,258        | 0,096       |
| F1  | 1,250          | 0,332           | 0,120            | 0,463       | 1,015        | 0,543       |
| F7  | 1,537          | 0,299           | 0,216            | 0,542       | 1,015        | 0,090       |

Tabla 5 Variación de la tensión en los generadores ante una variación súbita de la corriente en el estator

analizado se simula una variación de la corriente en ambos ejes  $d$  y  $q$  de la máquina, en un orden del 30 %, en las condiciones que se presentan en la tabla 5.

Como puede observarse de la tabla 5 y de las figuras 6 y 7, las variaciones de tensión que se producen en los terminales del GE al ocurrir la variación de la corriente por el estator están en el orden del 9 al 48 % en el GE MTU, en un entorno de 0,1 s, mientras que en el GE MAN varía



Figura 6 Variación de la tensión en el GEMTU ante la variación súbita de la corriente en el estator

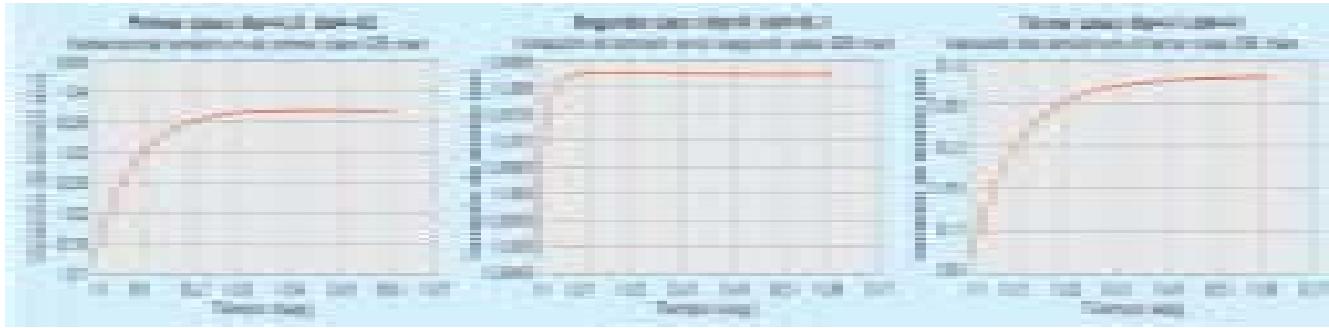


Figura 7 Variación de la tensión en Ge MAN ante una variación súbita de la corriente en el estator

entre el 9 y el 37 %, en un entorno de 0,1 a 0,6 s, se observa una variación más brusca en el caso del GE MTU. Por otro lado, estas variaciones están en el mismo entorno que los otros generadores analizados.

Asimismo, una variación de la carga provoca la variación de la corriente en el estator, pero también puede provocar una variación en la tensión

|     | X <sub>d</sub> | X' <sub>d</sub> | X'' <sub>d</sub> | Pico  | t(s)  |
|-----|----------------|-----------------|------------------|-------|-------|
| MTU | 3,050          | 0,299           | 0,160            | 0,578 | 2,500 |
| Man | 1,721          | 0,308           | 0,187            | 0,545 | 3,770 |
| H9  | 1,050          | 0,320           | 0,258            | 0,564 | 7,560 |
| H4  | 1,000          | 0,260           | 0,235            | 0,445 | 2,000 |
| F1  | 1,250          | 0,332           | 0,120            | 0,670 | 3,790 |
| F7  | 1,537          | 0,299           | 0,216            | 0,810 | 3,830 |

Tabla 6 Análisis del valor de la corriente del estator ante una U súbita de un 20 %

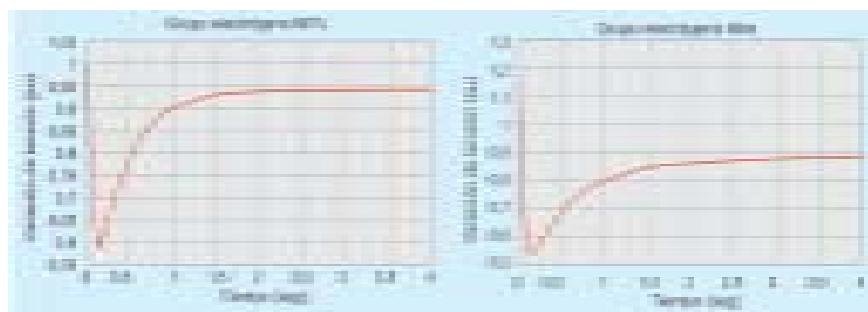


Figura 8 Variación de corriente del estator ante una U en el estator

del mismo. Lo que puede variar esta corriente fue analizado a partir de considerar una variación de tensión ( $U$ ) del 20 % en el estator. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6 y la figura 8.

Se puede apreciar que en las turbinas convencionales de combustión interna y las hidroeléctricas, la que posee una mayor potencia alcanza un mayor pico de corriente —valor máximo de corriente en la onda de amortiguación, hasta su llegada a estado estable— y un mayor tiempo de restablecimiento.

Las hidroeléctricas son las de menor pico de corriente ante una variación del 20 % de la tensión. En el caso de los GE, el mayor pico lo poseerá el de menor potencia, pero es entre ellos el que tiene una  $X_d$  mayor.

Debido a que la  $V$  es una disminución, las variaciones de corriente del estator para todas las turbinas, estabilizan por debajo del valor unitario.

Si se analizan estos resultados con relación a los requerimientos técnicos establecidos para GE de clase G3, tal y como se han comprado para Cuba, se tienen los siguientes resultados:

- La desviación transitoria de la tensión por variación de la carga, para el grupo G3 es de un 18 %, según la norma 8528 [2]. Al analizar los valores obtenidos ante esta perturbación en la simulación (Tabla 5), se aprecia que, para las diferentes variaciones súbitas de corriente en el estator analizadas, la variación de tensión es superior a los rangos especificados por la norma ISO 8528 para el primero y tercer casos, las cuales son propias para el grupo G1; no debe dejarse pasar que estos análisis se realizaron sin considerar el efecto de la saturación y sin tener en cuenta la actuación de un regulador de tensión, lo que evidencia la necesidad de este regulador para que ante una perturbación de este tipo la máquina pueda trabajar dentro de los límites establecidos.

- Ante una perturbación del tipo de desconexión súbita de la carga (rechazo de carga), las variaciones que se observan de la tensión en los terminales del GE (Tabla 4), son superiores a los establecidos como requisitos técnicos por la ISO ya mencionada, lo que requiere también ser analizado bajo las condiciones que se plantearon en el estudio. Se evidencia que sin un control de tensión, estos grupos no podrían cumplir con los requerimientos establecidos.

## Conclusiones

El nuevo concepto de Generación Distribuida está emergiendo como un nuevo paradigma de generación y distribución de la energía eléctrica. Las líneas de distribución que componen el sistema eléctrico en la actualidad fueron diseñadas y construidas hace ya algunas décadas. Dichas líneas fueron concebidas en un contexto totalmente diferente al actual y con el propósito exclusivo de distribuir la energía proveniente de las líneas de transporte entre los clientes. Con la Generación Distribuida nace un nuevo concepto de distribución. Este nuevo sistema de distribución integra diferentes tipos de tecnologías, con el objeto de construir un sistema de distribución más flexible, fiable y seguro. En esta dirección, Cuba se encamina hacia la adquisición e instalación de equipos de generación más eficientes y seguros como los GE y otras formas de generación, que convenientemente ubicados en distintos puntos del país —Generación Distribuida—, desempeñan un papel fundamental en la búsqueda de soluciones para un suministro con calidad.

La evolución y sofisticación de los equipos electrónicos modernos los ha hecho más sensibles a perturbaciones; sin embargo, el usuario de estos desea que su funcionamiento sea confiable, flexible y seguro. Estas condiciones exigen un estudio sistemático, tanto de las fuentes de perturbación como de la compleja interacción entre estas y el equipo susceptible.

De igual forma, la decisión de utilizar los GE como un elemento fundamental en el esquema eléctrico cubano requiere de estudios que permitan definir las mejores formas de explotación, las variaciones en los esquemas de protección y las adecuaciones generales y particulares que la presencia de dichos grupos impone en dicho sistema. ■

## Referencias bibliográficas

- [1] Generación Distribuida. Disponible en: <http://www.energiasverdes.com/>
- [2] ISO 8528:1993, Reciprocating Internal Combustion Engine Driven Alternating Current Generating Sets, first edition, 1993.
- [3] Amaya Enciso, Martha Cecilia. "Modelización de los efectos de saturación y saturación cruzada en una máquina sincrónica de polos salientes". Tesis de doctorado, Universidad del Valle, Cali, Colombia, abril, 2004.

Esta página puede ser suya



Centro de Información Científico-Técnica de ETECSA  
Centro de Negocios Miramar, calle 3<sup>ra</sup>, e/ 76 y 78, Edificio Beijing, 4<sup>to</sup> Piso, oficina 404.  
Playa, Ciudad de La Habana, Cuba. C.P.: 11300  
Teléfonos: (537) 266 8451, 266 8452.  
Correos electrónicos: [carlota.fernandez@etecsa.cu](mailto:carlota.fernandez@etecsa.cu) [vilma.vidal@etecsa.cu](mailto:vilma.vidal@etecsa.cu),

# A b r e v i a t u r a s

## A

**A**  
*Ampere*

Amperio

**AC**

*Alternating Current*

Corriente Alterna

**AICD**

Agencia Interamericana para la Colaboración y el Desarrollo  
*Inter-American Agency for Cooperation and Development*

**AIE**

Agencia Internacional de la Energía  
*International Energy Agency*

## B

**BJT**

*Bipolar Junction Transistor*  
Transistor de Unión Bipolar

## C

**CA**

Corriente Alterna  
*Alternating Current*

**CC**

Corriente Continua o Directa  
*Direct Current*

**CD**

Corriente Directa o Continua  
*Direct Current*

**CD/CA**

Corriente Directa o Continua/  
Corriente Alterna  
*Direct Current/ Alternating Current*

**CDM**

*Clean Development Mechanism*  
Mecanismos de Desarrollo Limpio

**CEM**

Compatibilidad Electromagnética  
*Electromagnetic Compatibility*

## CEN

Comité Electro-Técnico Nacional  
*National Electrotechnical Committee*

## CEL

Calidad de la Energía Eléctrica  
*Quality of Electrical Energy*

## CF

*Crest Factor*

Factor de Cresta

## CISPR

*Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*  
*International Special Committee on Radio Interference*

Comité Internacional Especial de las Perturbaciones Radioeléctricas

## CLP

Controlador Lógico Programable  
*Programmable Logic Controller*

## CMOS

*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*

Semiconductor Complementario del Óxido de Metal

## COHCIT

Consejo Hondureño de Ciencias y Tecnologías  
*Honduran Science and Technology Council*

## CPU

*Central Processing Unit*

Unidad Central de Procesamiento

## CSGT

Centro de Supervisión y Gestión Territorial

## D

## DC

*Direct Current*

Corriente Directa o Continua

## DCM

*Discontinuous Conduction Mode*  
Modo de Conducción Discontinuo

## DES

Duración Equivalente de las Interrupciones del Servicio  
*Equivalent Duration of Service Interruption*

## DF

*Distortion Factor*

Factor de Distorsión

## DFID

*Department for International Development*

Departamento para el Desarrollo Internacional

## DG

*Distributed Generation*

Generación Distribuida

## DTA

Distorsión Total de Armónicas  
*Total Harmonic Distortion*

## E

## EDS

*Equivalent Duration of Service Interruption*

Duración Equivalente de las Interrupciones del Servicio

## EFS

*Equivalent Frequency of Service Interruption*

Frecuencia Equivalente de las Interrupciones del Servicio

## EMC

*Electromagnetic Compatibility*  
Compatibilidad Electromagnética

## emf

*Electromotive Force*

Fuerza Electromotriz

## EMI

*ElectroMagnetic Interference*  
Interferencia Electromagnética

## EMS

*Electromagnetic Susceptibility*  
Susceptibilidad Electromagnética

**ETNO**

*European Telecommunications Network Operator's Association*  
Asociación de Operadores Europeos de Redes de Telecomunicaciones

**F****FCC**

*Federal Communications Comission*  
Comisión Federal de Comunicaciones

**f.e.m**

Fuerza Electromotriz  
*Electromotive Force*

**FES**

Frecuencia Equivalente de las Interrupciones del Servicio  
*Equivalent Frequency of Service Interruption*

**FV**

Fotovoltaico  
*Photovoltaic (PV)*

**G****GE**

Grupos Electrógenos  
*Generators*

**GEI**

Gases de Efecto Invernadero  
*Greenhouse Gases*

**GEF**

*Global Environment Facility*  
Instalación Global de Medio Ambiente

**GeSI**

*Global e-Sustainability Initiative*  
Iniciativa Global de Sostenibilidad Electrónica

**GD**

Generación Distribuida  
*Distributed Generation*

**GRI**

*Global Reporting Initiative*  
Iniciativa Global para la Elaboración de Informes

**H****HDI**

*Human Development Index*  
Índice de Desarrollo Humano

**HMI**

*Human Machine Interface*

**HSP**

Horas Solares Picos  
*Peak Sun Hours*

**I****IDEA**

Instituto por la Diversificación y Ahorro de la Energía  
*Institute for Energy Diversification and Saving*

**IDH**

Índice de Desarrollo Humano  
*Human Development Index (HDI)*

**IEA**

*International Energy Agency*  
Agencia Internacional de la Energía

**IEM**

Interferencia Electromagnética  
*ElectroMagnetic Interference*

**IGBT**

*Insulated-Gate Bipolar Transistor*  
Transistor Bipolar de Compuerta Aislada

**ITMs**

Interruptores Termo Magnéticos  
*Thermomagnetic Switch*

**ITU**

*International Telecommunication Union*  
Unión Internacional de Telecomunicaciones

**L****LDI**

Larga Distancia Internacional

**LFR**

*Loss Free Resistor*

Resistor Libre de Pérdidas

**M****MDL**

Mecanismos de Desarrollo Limpio  
*Clean Development Mechanism*

**MOSFET**

*Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*

**O****OBE**

Organización Básica Eléctrica

**OCDE**

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

**ODM**

Objetivos de Desarrollo del Milenio  
*Millennium Development Objectives*

**ONU**

Organización de las Naciones Unidas  
*United Nations Organization*

# A b r e v i a t u r a s

P

**PC**

*Personal Computer*

Computadora Personal

**PGD**

Pizarra General de Distribución

*General Distribution Board*

**PLC**

*Programmable Logic Controller*

Controlador Lógico Programable

**PNUD**

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

*United Nations Development Program*

R

**RMS**

*Root Medium Square*

Raíz Media Cuadrática

**PV**

*Photovoltaic*

Fotovoltaico

**PWM**

*Pulse Wide Modulation*

Modulación por Ancho del Pulso

S

**SEM**

Susceptibilidad Electromagnética

*Electromagnetic Susceptibility*

**SEN**

Sistema Electroenergético Nacional

*National Electroenergetic System*

**SPCR**

Sistemas de Protección contra

Descargas Atmosféricas

*Atmospheric Discharge Protection Systems*

T

**THD**

*Total Harmonic Distortion*

Distorsión Total de Armónicas

**TIC**

Tecnologías de la Información y las Comunicaciones

*Information and Communication Technologies*

U

**UNE**

Unión Nacional Eléctrica

**UN-Energy**

*United Nations related to Energy*

**UNGA**

*United Nations Millenium Development Goals*

Objetivos de Desarrollo del Milenio de las Naciones Unidas

**UPS**

*Uninterrupted Power Suply*

Sistema de Alimentación Ininterrumpida

**UNE**

Unión Nacional Eléctrica

**UN-Energy**

*United Nations related to Energy*

**UNGA**

*United Nations Millenium Development Goals*

Objetivos de Desarrollo del Milenio de las Naciones Unidas

**UPS**

*Uninterrupted Power Suply*

Sistema de Alimentación Ininterrumpida

V

**Voltage**

Tensión o Voltaje

W

**Watt**

Vatio

**WBCSD**

*World Business Council for Sustainable Development*

Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible

**WEHAB**

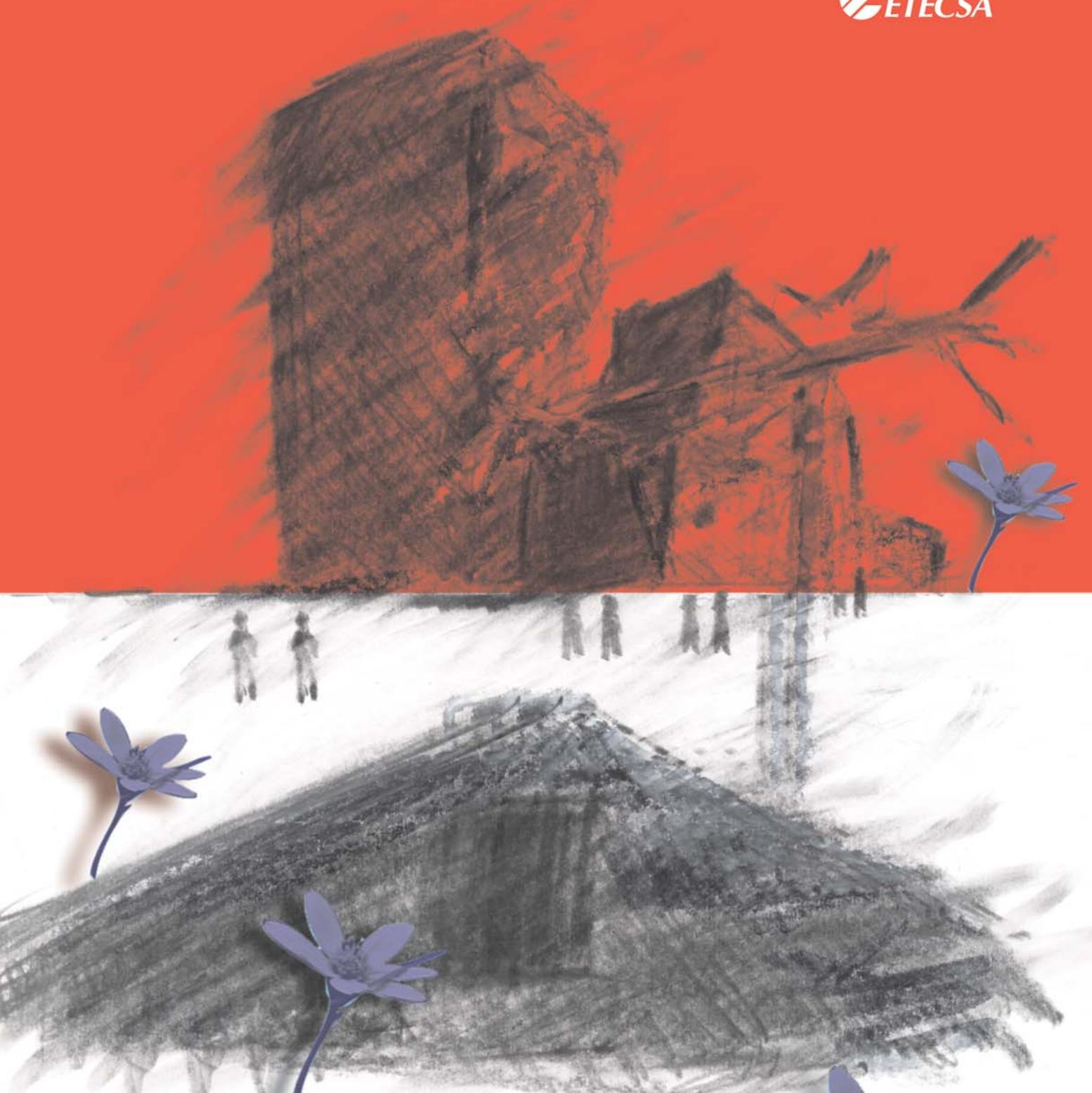
*Water, Energy, Health, Agriculture and Biodiversity*

Agua, Energía, Salud, Agricultura y Biodiversidad

**WSSD**

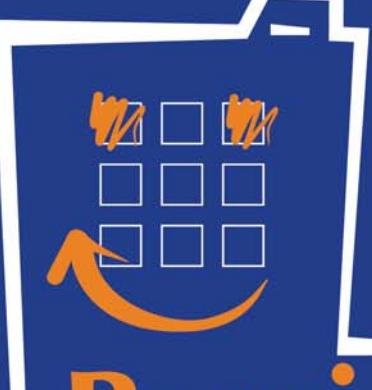
*World Summit Sustainable Development*

Conferencia de las Naciones Unidas en Medioambiente y Desarrollo



**Centro de Información Científico-Técnica de ETECSA**  
Vicepresidencia de Desarrollo y Tecnología

Centro de Negocios Miramar, calle 3<sup>ra</sup>, e/ 76 y 78, Edificio Beijing, Piso 4, oficina 404.  
Playa, Ciudad de La Habana, Cuba. C.P: 11300



# **desde mi Barrio** defendiendo lo nuestro

*...estamos en la esquina del teatro,  
te esperamos para el ensayo*

*...hola viejo  
estoy bien,  
voy el fin de semana*

*mami, recuerda...  
voy para la casa  
de estudio.*

**si detecta  
alguna avería  
repórtela al  
118**

**El cuidado de las redes de telecomunicaciones  
es responsabilidad de todos**



# Álvaro Alberto Pérez Medina



Título: Historia interminable  
Técnica: acrílico sobre tela  
Medidas: 130 x 80 cm