

# PRISMA

## Tecnológico

ISSN 2076-8133 | Volumen 4, N.º 1 | 2013 | Edición anual

**La energía eléctrica,  
motor impulsor del desarrollo  
tecnológico**

**Visión de futuro de la electricidad en Panamá**

**Responsabilidad social  
en la gestión de la producción  
de las principales industrias  
panameñas**

**Sistemas de transmisión flexible  
en corriente alterna**

**Almacenamiento de energía magnética  
por superconducción**

**Diseño de un sistema híbrido  
de generación eléctrica a partir  
de fuentes renovables de energía**



Distribución  
GRATUITA



## Editorial

En tiempos de rápidos cambios para una sociedad poco acostumbrada a esta dinámica, pero empujada a adoptarlos debido a su rápido crecimiento poblacional, estructural, económico, de negocios y de otra índole, la intensa competencia profesional, el deterioro del medio ambiente, las ingentes demandas de energía y la fuerte competencia de las empresas por desarrollar nuevos productos, alcanzar nuevos mercados y aumentar sus ganancias, hace que se cree un panorama de "necesidad urgente" por encontrar y proveer soluciones a las situaciones y problemáticas que surgen frecuentemente, mismas en las que es imperante que toda la sociedad se involucre, haga aportes concretos; al tiempo que contribuye al mejoramiento integral de las condiciones de vida y el bienestar común.

Situaciones acuciantes como el aumento de la población y sus demandas de energía, principalmente eléctrica y de transporte, deben atenderse y tratar de solucionarse considerando políticas, tecnologías y cambios de actitud por parte de la población en términos de "conciencia ciudadana hacia el ahorro", mismas que sin duda permitirían la sostenibilidad de los recursos, la conservación y regeneración del medio ambiente; así como la mejora constante de las condiciones socioeconómicas de la población en general.

Estos cambios, necesidades y problemáticas imponen también su sello en el sistema educativo. Esto es así debido a que, para encontrar soluciones y alcanzar el éxito, se necesita una sociedad con individuos educados y capacitados, que tengan una formación completa tanto en la parte humana, como científica; ya que ambas partes, constituyen los pilares fundamentales para dar soporte a una sociedad próspera, que crece responsable y organizada, que con educación e investigación, promueve mecanismos clave para el desarrollo integral de la sociedad, contribuyendo significativamente a que ésta sea más competitiva y desarrollada, pero humana, como ha quedado plenamente demostrado en otras sociedades más desarrolladas, con riquezas y mejores condiciones de vida para sus ciudadanos, que al mismo tiempo y en la misma medida, se preocupan por ser sociedades cultas, educadas y preocupadas por el bien común.

Por un lado, la educación permite a las personas participar activamente en la sociedad con aportes valiosos, ofreciendo mejores perspectivas profesionales para mejorar las condiciones sociales; mientras que, por otro lado, la investigación abre nuevos horizontes, creando importantes condiciones que generan cambios y acciones sostenibles de verdadero desarrollo socio-económico.

Enmarcada en temas de educación, investigación, energía, transporte, responsabilidad social, tecnologías para sistemas eco-compatibles y muchos otros, presentamos con gran entusiasmo la edición 2013 de Prisma Tecnológico, esperando que la misma sea de su agrado, contribuya a generar ideas y proporcione información valiosa e inspiradora para encontrar y proveer soluciones e impulsar acciones concretas, de manera que todos podamos contribuir a mejorar nuestra cambiante, dinámica y pujante sociedad.

Dr.-Ing. Carlos A. Medina C.  
Universidad Tecnológica de Panamá  
carlos.medina@utp.ac.pa

## Contenido

### IMPACTO

- 4 La energía eléctrica, motor impulsor del desarrollo tecnológico. Visión de futuro de la electricidad en Panamá | *Edilberto Hall Mitre*

### TEC-NOTICIAS

- 9 Físicos crean un transistor funcional con un solo átomo

Celdas solares en pantalla de teléfonos inteligentes (Smartphones)

- 10 Nano-árboles consumen energía solar para convertir agua en hidrógeno para combustibles

Alemania planea una línea de 3800 km y \$25 millones para transmitir potencia eólica

### TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD

- 11 Responsabilidad social en la gestión de la producción de las principales industrias panameñas | *Virginia Santos H. | Erika Y. Pinzón M.*

- 15 Hacia la integración de la enseñanza universitaria de pregrado y la investigación | *Carlos A. Medina C.*

- 20 Entrevista con el Dr. Mehrdad Ehsani | *Ronald Y. Barazarte*

### ACTUALIDAD TECNOLÓGICA

- 22 Comparación de sistemas de comunicación inalámbrica para robots móviles | *Leonardo E. Fields M.*



**25** Sistemas de transmisión flexible en corriente alterna | *Ing. Francisco D. Pérez A., M.Sc.*

### TECNOLOGÍA A FONDO

**29** Almacenamiento de energía magnética por superconducción | *Guadalupe G. González*

**33** Trenes: material rodante del transporte ferroviario | *A. Berbey, R. Caballero, J.D. Sanz Bobi, J. Brunel, K. Guerra, J. Flores, A. Samaniego, W. Orozco*

### TECNOLOGÍA I+D

**38** Fusión de imágenes con múltiples puntos de enfoque basado en sensado compresivo | *Erick Quezada y Roger Arribasplata | Fernando Merchan*

**42** Seguridad eléctrica eficiente mediante UPS en sistemas hospitalarios | *Adda Ureña Solís*

**47** Diseño de un sistema híbrido de generación eléctrica a partir de fuentes renovables de energía | *Miguel Him Díaz*

### TECNO-HISTORIA

**51** La Batalla de las Corrientes: Edison, Tesla y el nacimiento del sistema de potencia | *Ronald Y. Barazarte*

**54** ENTRETENIMIENTO





# PRISMA Tecnológico



Universidad Tecnológica de Panamá

## AUTORIDADES

**Dr. Oscar M. Ramírez R.**  
Rector

**Dr. Omar O. Aizpurúa P.**  
Vicerrector Académico

**Dr. Gilberto A. Chang C.**  
Vicerrector de Investigación, Postgrado y Extensión

**Ing. Esmeralda Hernández P.**  
Vicerrectora Administrativa

**Ing. Luis A. Barahona G.**  
Secretario General

**Ing. Rubén D. Espitia P.**  
Coordinador General de los Centros Regionales

## Mensaje del Rector



La Universidad Tecnológica de Panamá (UTP), firme en su compromiso de informar y compartir con la sociedad panameña, acerca de la gran variedad de temas relacionados al desarrollo de la ciencia y al avance de la tecnología, se enorgullece en presentar este volumen de la revista **Prisma Tecnológico**.

El conocimiento es la luz. Haciendo una citación oportuna a la Ley de Snell, el papel más importante de la UTP es abrir la mente de nuestros estudiantes a ese mundo maravilloso del conocimiento, para que luego, en un efecto multiplicador, sea reflejado hacia la sociedad.

La mente humana es ilimitada en su capacidad para construir nuevas formas y tamaños, partiendo de lo que conoce, para crear lo que aún no existe. Es esa capacidad la que le ha permitido al mundo evolucionar; desde su forma más primitiva, hasta la deslumbrante e inimaginable era tecnológica que vivimos.

Construir un Panamá desarrollado, requiere de muchas cosas, pero principalmente, de la creatividad y conocimiento de nuestros jóvenes. El esfuerzo para lograr que la educación superior contribuya a este fin, nunca será suficiente.

Esperamos que el lector disfrute esta nueva edición de **Prisma Tecnológico**.

**Dr. Oscar M. Ramírez R.**  
Rector  
Universidad Tecnológica de Panamá

# La energía eléctrica, motor impulsor del desarrollo tecnológico

## Visión de futuro de la electricidad en Panamá

**Edilberto Hall Mitre**

Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá  
 edilberto.hall@utp.ac.pa

**Resumen:** *el objetivo de este artículo es el de presentar una visión general sobre el impacto que ha tenido la energía eléctrica en el desarrollo científico y tecnológico mundial. Se desarrolla una cronología de la revolución industrial, caracterizada por sus dos períodos denominados: la primera revolución industrial y la segunda revolución industrial o revolución capitalista, describiéndose los principales tipos de energía y su impacto en la evolución tecnológica. Además, se presentan: una breve reseña de la electrificación en Panamá y la importancia que esta tuvo durante la construcción y operación del Canal de Panamá; la evolución de la integración eléctrica nacional y su eventual privatización a finales del siglo XX; algunos datos actuales de la composición de la matriz energética, aunado a estimaciones realizadas por investigadores de la Universidad Tecnológica de Panamá sobre el potencial hídrico nacional para la generación de electricidad y un análisis de una visión de futuro de la electricidad para el país, la cual se compone de: el desarrollo de una cultura de ahorro y uso racional y eficiente de los recursos energéticos, la identificación de los recursos naturales estratégicos para la generación hidroeléctrica base, la conversión de la generación eléctrica cara por una que usa combustibles fósiles más baratos, y el fortalecimiento de la generación basada en recursos renovables.*

**Palabras claves:** *energía eléctrica, revolución tecnológica, electricidad en Panamá, matriz energética panameña.*

**Title:** *The Electrical Energy, Driver of the Technological Development. Vision of the Future of Electricity in Panama.*

**Abstract:** *the objective of this article is to present a general view on the impact of the electricity on the scientific and technological development of the world. A chronological development of the industrial revolution is presented, which is characterized by its two periods, namely: the first industrial revolution and the second industrial revolution or capitalist revolution, describing the main types of energy and their impact its impact in the technological evolution. In addition, a short review on electrification in Panama is presented, its importance during the construction and operation of the Panama Canal; the evolution of the national electrical integration and its eventual privatization by the end of XX Century; some actual data of the energy matrix composition is illustrated, together with estimations of the national hydroelectric*

*potential provided by scientists of Universidad Tecnológica de Panamá and an analysis of a vision of the future of electricity in the country; namely: the development of a culture of saving and rational and efficient use of our energy resources, the identification of the natural strategic resources to generate base hydroelectric power, conversion of costly electrical power plants to the use of cheaper fossil fuel, as well as the improvement in electrical generation based on renewable resources.*

**Key words:** *electrical energy, technological revolution, electricity in Panama, Panamanian energy matrix.*

### Introducción

Quizás hoy pocos recordarán acerca de las razones que motivaron la, así llamada, Revolución Industrial en los siglos XVIII y XIX, aunque aún nos quedan en los recuerdos de nuestros años de escuela, el proceso de transformación de las sociedades agrarias en sociedades industrializadas, de la desintegración del feudalismo y el triunfo del capitalismo. Esta revolución o fases de transformación industrial, fue un proceso de transición económico-social fundamentado principalmente en el uso del conocimiento científico aplicado a la práctica, tecnología. Las invenciones dieron lugar al desarrollo de la ciencia cuantitativa y experimental; el descubrimiento y aplicación de nuevas formas de energía, motor de todas estas aplicaciones; el descubrimiento y uso de nuevos materiales; el desarrollo de obras y mega-estructuras; el estudio científico del trabajo; entre otros. Dentro de toda esta riqueza histórica, el uso de la energía eléctrica ha jugado un papel trascendental y acelerador de todos los procesos de desarrollo, crecimiento económico, desarrollo de la calidad y el confort de vida de los residentes de este planeta, Tierra. Diversos aspectos de la energía eléctrica son el motivo de esta reseña: sus inicios, su papel en la Revolución Industrial, el impacto que ha tenido en la sociedad panameña, y lo que consideramos debe ser el futuro de su producción y aplicaciones en la República de Panamá.

### La primera revolución industrial

El estudio de la citada revolución industrial se divide en dos etapas o periodos bien diferenciados. La primera etapa, tiene sus inicios en Inglaterra, en la década de 1690, siendo este un movimiento que removió los cimientos de la sociedad feudal, caracterizada por la producción agraria rudimentaria y de economía de subsistencia; la misma es una revolución antifeudal en Francia y en otros países europeos y de Asia. Producto de este proceso aparece un nuevo orden económico, el capitalismo, lo que promueve la rápida caída y desintegración del régimen actual, pero que crea dos clases: la burguesía industrial y el proletariado (el capitalista y el obrero). Este proceso estuvo marcado por innovaciones tecnológicas en las que el carbón, el vapor y la fuerza del agua fueron las fuentes de energía básicas, se da primordialmente en Inglaterra, y se caracteriza por aspectos tecnológicos, socio-económicos y culturales.

Los aspectos tecnológicos fueron dominados por la invención y uso de: la maquinaria de vapor en los sistemas ferroviarios, los vapores navales, y las primeras industrias de producción masiva; el telégrafo que permitió los inicios de las comunicaciones, y otras innovaciones



relativas a estos sistemas. En este período, la Ingeniería Mecánica fue de gran importancia, se usan nuevos materiales tales como el hierro y acero para la construcción de máquinas; el carbón de piedra es la fuente energética primaria para la producción de vapor, y la energía hidráulica para impulsión de maquinaria industrial. En cuanto a los aspectos socio-económicos, el proceso se caracteriza por la concentración del capital, los derechos ciudadanos y laborales, la concentración de grandes masas en centros urbanos y el sistema de patentes para protección de las



invenciones, así como la creación de mayores ingresos y riqueza. Por otro lado, los aspectos culturales fueron una consecuencia de la concentración de grupos étnicos y poblaciones multiculturales que buscaban trabajo y mejores condiciones de vida. La gente migró desde los campos, abandonando la agricultura rudimental, hacia las ciudades trayendo consigo sus costumbres, principios y tradiciones.

### La segunda revolución industrial

La segunda etapa, denominada por muchos como la segunda revolución industrial o era del capitalismo, tiene sus inicios en la década de 1850, debido al notable surgimiento de nuevos tipos de industria mucho más tecnificadas, tales como la eléctrica, química y automovilística. En este periodo se desarrolla un proceso de industrialización en varias naciones del planeta. Aparecen innovaciones tecnológicas sin precedentes, se desarrolla la investigación científica



como base de las innovaciones en nuevos campos de la ciencia, se dan nuevas transformaciones sociales, predomina el capital en las relaciones económicas y la hegemonía de los países industrializados sobre las naciones pobres. Surgen nuevas formas de energía, entre ellas, el petróleo y sus derivados y la electricidad; aunque el carbón aún mantiene su

posición entre las energías primarias usadas, incluso hoy día, para generación de electricidad y vapor industrial.

El petróleo y sus derivados, aunque ya conocidos desde la antigüedad, emergen al mismo tiempo que la electricidad y su aplicación para propósitos industriales. La nueva industria química hace posible el desarrollo de múltiples productos y materiales a partir del petróleo, así como su utilización en nuevas innovaciones tecnológicas en el área de la transportación terrestre y aérea, con el motor de combustión interna reemplazando en corto tiempo la máquina de vapor. Se crea el automóvil y el aeroplano los que acortan las distancias entre naciones y continentes convirtiéndonos en una aldea de países y naciones. Todo este proceso requirió la utilización de nuevos materiales, especialmente, metales que hicieron posible todo el



desarrollo tecnológico y mejoraron la eficiencia de las nuevas máquinas, equipos y dispositivos. La Ingeniería Metalúrgica juega un rol indispensable en este proceso de desarrollo industrial. Se considera el fin de este periodo, en Europa, el inicio de la primera guerra mundial, y más tarde en otras naciones desarrolladas no

### La energía eléctrica motor impulsor del desarrollo tecnológico

La electricidad tiene un sinnúmero de aplicaciones en todos los ámbitos de la vida: industrial, comercial, las comunicaciones, las sociedades, los usos residenciales, etc. Con la electricidad surge el teléfono, la radio, los sistemas de refrigeración mecánica, que permiten el progreso y vida en áreas del mundo inhóspitas; la iluminación urbana y residencial, la ampliación de las jornadas de trabajo a las 24 horas del día y con ello, el incremento de la producción industrial y comercial; los medios de comunicación urbanos tales como trenes y autobuses eléctricos; las telecomunicaciones; y los procesos industriales, como la electrólisis, base para la extracción de metales como el aluminio, a partir de la Bauxita, entre muchas otras aplicaciones. Es prácticamente imposible cuantificar en dinero las proporciones del impacto que este tipo de energía aporta al desarrollo científico y tecnológico en este periodo, y particularmente porque está ligada con el uso del petróleo y sus derivados.



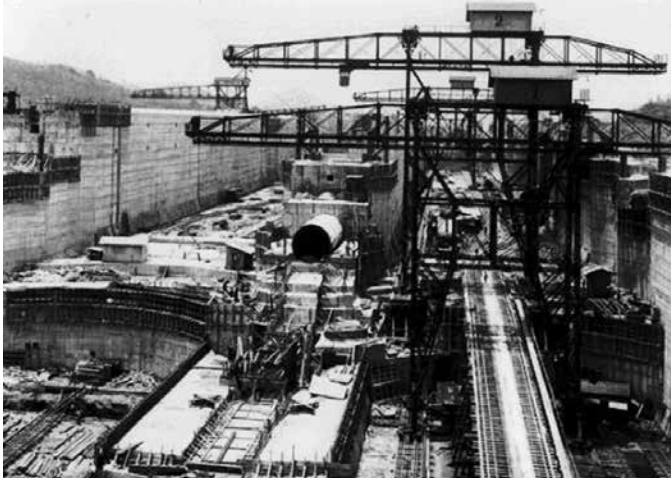
La industria eléctrica se puede analizar en dos partes componentes. Primero: la generación y transporte, distribución a los centros de consumo y, la utilización y comercialización de la electricidad. Segundo: la producción y desarrollo de equipos, dispositivos y máquinas eléctricas. Estas son la base para el surgimiento de nuevas formas de producción industrial. Sin embargo, nada de esto

ha sido posible sin la simbiosis entre las diferentes áreas del conocimiento científico tales como: la ingeniería civil (obras, estructuras, suelos, cemento, etc.), la ingeniería mecánica (máquinas, motores, equipos industriales y dispositivos, etc.), la ingeniería hidráulica (uso del agua como fuente energética), la ingeniería metalúrgica (uso de metales como hierro, acero, cobre, aluminio, etc.), la ingeniería química (procesos industriales, uso del petróleo y sus derivados, etc.), la ingeniería industrial (estudio del trabajo, procesos de producción, etc.), y otras áreas que promovieron la investigación científica como base del desarrollo tecnológico.

### Electrificación en Panamá

A principios del siglo XX en Panamá, en los inicios de la construcción del Canal Interoceánico se edificó una planta de generación eléctrica en

las riveras del pacífico, en Miraflores, compuesta de tres unidades de 1500 kVA, 2200 Volt, 25 Hertz, turbogeneradores Curtis que operaban a 1500 rpm impulsadas con vapor producido con calderas de carbón, para suplir de electricidad a las diferentes plantas de construcción que en el caso de las esclusas de Gatún requerirían de unos 2,000,000 de yardas cúbicas de concreto, lo que en su momento representaría la mayor masa de concreto construida en tiempos modernos. Se decidió el uso de un sistema de transmisión de 44 kV el cual aún cumple con las necesidades de transmisión de electricidad al día de hoy, incluso luego de concluida la expansión del canal en los próximos años, dados los niveles de carga y las distancias relativamente cortas, unos 50 kilómetros. La generación de electricidad se diseñó para 25 ciclos por segundo (Hertz), con el objetivo de reducir las pérdidas magnéticas (calentamiento de las laminaciones de los cuales se construían los núcleos de acero del momento). Esta planta serviría de respaldo de las dos plantas hidroeléctricas que se cimentarían más tarde en Gatún (planta de 6,000 kW, tres unidades trifásicas a 25 Hertz y 2200 volts) y en Miraflores (un duplicado de la planta de Gatún) durante la estación seca, ya que en ese momento aún no se conocía con precisión los requerimientos y comportamiento del agua en la región.



Todo este desarrollo permitió la operación eficiente y segura de la vía, el sistema de trenes de carga y pasajeros, y cubrir todas las necesidades de energía de los sistemas administrativos, centros urbanos y residenciales, convirtiendo el Canal de Panamá en una de las siete maravillas modernas de las construcciones humanas del mundo.

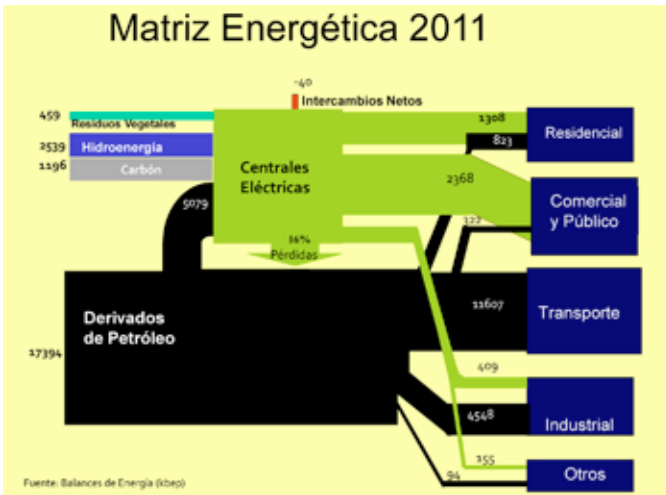
Décadas más tarde, se crea el Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación (IRHE) en 1961 como empresa estatal autónoma, para coordinar y expandir las instalaciones de energía eléctrica necesarias y para proveer el suministro de energía adecuado y confiable del país. Se incorporan empresas privadas, mucho antes establecidas en las regiones del país, como la Fuerza y Luz, la Empresa Eléctrica de Chiriquí, Santiago Eléctrica y la Empresa Eléctrica La Chorrera, logrando la integración eléctrica total en el país. Luego, a inicios de la década del 70, se inicia el proceso de expansión de generación con los proyectos de Bayano (150 MW), La Estrella y Los Valles

(90 MW) y Fortuna (300 MW). Se requirió la construcción de más de 850 km de líneas de transmisión a 110 y 230 kV y más de 6,600 km de líneas de distribución para prestar el servicio eléctrico a más de 300,000 usuarios. Para finales de siglo, en 1998, el gobierno nacional del momento hace efectiva la privatización de los activos del IRHE dividiéndola en siete empresas (tres de generación, tres de distribución y una de transmisión).



Actualmente, según datos de la Secretaría Nacional de Energía (SNE), para finales de 2011 los resultados de los sectores eléctrico y energía son los siguientes: la capacidad eléctrica instalada total es de 2,391.4 MW, de los cuales 1,040.1 es térmico (42.66%) y 1,351.3 es de origen hidroeléctrico (56.5%); mientras que la generación bruta total de electricidad fue de 7,798.6 GWh. De estos, 4,098.2 GWh (52.55%) es de origen hidroeléctrico, 2,344.7 GWh (30.07%) bunker, 903.7 GWh (11.59%) diesel, y 452.0 GWh (5.8%) carbón. Esto quiere decir que poco menos de la mitad de la generación eléctrica del país es de origen termoeléctrico, utilizando derivados del petróleo importado. En el mismo periodo, el país importó unos 72,203.9 MWh y exportó solo 8,134.4 MWh de energía al mercado de Centroamérica. La tasa promedio de crecimiento de la demanda alcanzó el 5.2% al 2011, mientras que la demanda máxima histórica es de 1,386.27 MW y se registró el 19 de junio de 2012.

La intensidad energética (IE), la cual representa el consumo final de energía por unidad de PIB expresado en barriles equivalentes de petróleo (bep), fue de 1.068, con tendencia a la baja, lo que refleja el incremento de la actividad económica del sector bancario y de las telecomunicaciones las que utilizan poca energía eléctrica para producir cada Balboa. Un análisis de la matriz energética del último año nos indica que el uso del petróleo y sus derivados, fue de 17,394 kbe (miles de barriles equivalentes de petróleo de 1996), de los cuales 11,607 kbe (66.73%) es para uso del transporte; 5,079 kbe (29.2%) es la componente para la generación de electricidad; y 4,548 kbe (26.15%) es para usos industriales; entre otros usos menores. Las pérdidas energéticas promedio del sistema eléctrico se estimaron en 16%. Alrededor del 65% del consumo de electricidad en el país es para usos de refrigeración y acondicionamiento de espacios.



### Visión de futuro de la electricidad en Panamá

El país ha mantenido un crecimiento sostenido en los últimos años, siendo una de las economías de la región de mayor crecimiento económico, a pesar de la crisis financiera internacional y los altos costos del petróleo y sus derivados. De los datos de la matriz energética se puede analizar que el país debe reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles de mayor costo tales como: el bunker (HFO: Heavy Fuel Oil) utilizado para la generación eléctrica, el diesel liviano (LFO: Light Fuel Oil) para generación eléctrica y transporte, y la gasolina. Existe una buena oportunidad de aminorar los consumos eléctricos implementando las leyes, reglamentos y verificaciones técnicas que sean necesarias para lograr mayor eficiencia y ahorro energético en todos los sectores del consumo eléctrico. Debe diversificarse la matriz de generación eléctrica, suplantando las actuales tecnologías de generación eléctrica que usan petróleo por otras que emplean carbón y gas natural, y fortaleciendo la generación basada en recursos renovables, como la eólica y solar.

El ahorro energético deberá ser parte de nuestra cultura de consumo, ya que existe una tremenda oportunidad de reducir nuestra facturación eléctrica haciendo uso racional y eficiente de la electricidad. El ahorro energético es una práctica que se basa en tres conceptos fundamentales del consumo energético. El primero, consumir con calidad:



por bajo factor de potencia y alta demanda; reduciendo desbalances de carga y sobrecargas en las edificaciones; reemplazando aislamientos térmicos deficientes; reduciendo las fugas de aire acondicionado; así como, seleccionando apropiadamente las capacidades de los equipos electromecánicos. El segundo es, consumir con eficiencia: reemplazando los equipos de vieja data por otros de alta eficiencia

comprobada; implementando sistemas de control de iluminación automáticos; sumado al diseño y construcción de instalaciones eléctricas y edificaciones con materiales apropiados; además de, dimensionar el consumo energético de las edificaciones según estándares internacionales, entre otras técnicas. Las personas que visitan nuestra ciudad capital se sorprenden de las bajas temperaturas en los edificios y del derroche de energía, que se hace evidente con solo observar a la gente usando abrigos. El tercer concepto básico del ahorro energético es, consumir con conocimiento: realizando diagnósticos energéticos que suministren información significativa sobre el estado actual de las redes eléctricas; entrenando al personal sobre las técnicas de ahorro energético; educando a nuestros niños en las escuelas sobre la importancia y las prácticas de ahorro energético en el hogar, las escuelas, y en todas partes. Serán nuestros hijos los que verdaderamente apliquen la cultura del ahorro energético como parte integral de sus relaciones cotidianas. Será necesario implementar una normativa de "revisado de eficiencia energética" a las edificaciones, anualmente, similar al revisado de los vehículos a motor; esto nos ayudaría a evitar conatos de incendios producto de circuitos eléctricos sobrecargados, y malas prácticas de instalación y protecciones; ayudaría a los empresarios y administradores de edificios a implementar técnicas y sistemas de ahorro energético que mejoren los costos operativos de los negocios e inmuebles.

El Estado panameño deberá definir una política de estado sobre los recursos naturales estratégicos para lograr la generación eléctrica base para el suministro confiable y barato de electricidad para el 2050, y no permitir que sean los inversionistas privados quienes decidan nuestras prioridades en cuanto a suministro y capacidad eléctrica, actitud esta que ha puesto en disputa a los inversionistas con nuestros conciudadanos. Hay que garantizar los espacios en áreas protegidas y áreas comarcales, en los que se encuentran los recursos hídricos estratégicos, para desarrollar los proyectos de generación eléctrica. Se deben lograr las mediaciones entre las comunidades y el estado que nos permitan alcanzar los acuerdos necesarios que beneficien a las comunidades y al país en su conjunto, armonizando el progreso de las comunidades, el medio ambiente y el avance del país. Debemos estar claros que todos somos panameños con iguales deberes, derechos y privilegios, y que el bien común prevalece sobre los intereses de las etnias, grupos e individuos. Por otro lado, los ambientalistas de este país deben jugar un papel protagónico aportando proactivamente un plan maestro de sitios para plantas eléctricas de diferentes tecnologías (hídricas, térmicas, eólicas y solares, o de cualquier otra naturaleza) que sean coherentes y ambientalmente sustentables, en lugar de adoptar la posición usual de ser críticos y detractores de toda nueva iniciativa de proyecto de generación eléctrica. El estado deberá ofertar a los inversionistas locales e internacionales los proyectos estratégicos de generación eléctrica para desarrollar su matriz energética, quienes deberán tener la capacidad financiera y experiencia necesaria; además, deberá suministrar los estudios que exigen las normas de la ASEP (ejemplo: estudios eléctricos, estudios de impacto ambiental, socio-económicos, y de pre-factibilidad), y todas las licencias y permisos locales y nacionales, con la finalidad que los inversionistas inicien los proyectos tan pronto sean licitados, garantizando de antemano,



su éxito y finalización según los planes de construcción. Se deberán evaluar más científicamente otras iniciativas de proyectos menores de generación eléctrica, que no forman parte de los recursos estratégicos de la nación, para evitar que se realicen proyectos eléctricos en las inmediaciones de poblados, y que existan múltiples proyectos hidroeléctricos sobre ríos de bajo caudal promedio anual.



Panamá es un país rico en recursos hídricos, según estimaciones de estudios realizados por investigadores y especialistas de la Universidad Tecnológica de Panamá, el país cuenta con una capacidad hidráulica para generación de energía eléctrica de unos 15 GW (miles de millones de Watts); mientras que la capacidad hidroeléctrica instalada para generación eléctrica, a la fecha, es de tan solo 1.4 GW. Nuestro sentido común nos indica que, dado el potencial hidroeléctrico disponible de más de 10 veces la capacidad instalada actual, el futuro de la generación eléctrica del país está en cubrir en exceso la demanda total de energía eléctrica con medios hidroeléctricos; utilizar recursos de origen fósil de importación de bajo costo tales como el gas natural y el carbón, que complementen la generación eléctrica en períodos de baja capacidad hidráulica, tal que se pueda exportar los excedentes térmicos al mercado centroamericano, y así aprovechamos de proyectos tales como el de interconexión eléctrica con Centroamérica (SIEPAC), el cual cuenta con disponibilidad de transporte de 300 MW. Panamá debe establecer como objetivo estratégico de estado disfrutar de la energía eléctrica más barata, confiable y abundante de la región, lo que nos brinda las siguientes ventajas competitivas: ayudaría al fortalecimiento de las inversiones y costos de producción de las empresas locales e inversionistas extranjeros en el país; atraería a mayor número de empresas multinacionales cuyas políticas del uso “verde”, confiabilidad y economía de la energía eléctrica les permita establecerse en nuestro país; la operación económica del Metro, una vez concluida esta primera línea debe iniciarse la construcción de la siguiente; desarrollar líneas urbanas de buses eléctricos; implementar trenes eléctricos ligeros para comunicar las regiones de Arraiján y Panamá Oeste; incorporar el transporte ferroviario eléctrico a la matriz del transporte de carga para el Occidente (provincias centrales y Chiriquí) y el Oriente (Panamá Este y Darién) del país, lo que reduciría los costos de movimiento de carga y el uso de los combustibles del transporte urbano y de carga, bajando el precio de la transportación masiva de pasajeros y de los productos de la canasta básica. Una

línea férrea hacia oriente demanda la construcción de nuevas líneas de transmisión eléctrica hacia el Darién, lo que promueve el urbanismo, la mejor calidad de vida, salubridad, educación, y explotar todo el potencial de riqueza natural y turística de esa región. El impacto que estos proyectos traerían a nuestro país sería inmenso, y específicamente, tendríamos fácil acceso a todas las regiones de nuestro suelo patrio, aún no conocidas por muchos.



Nuestra visión de país, compartida por otros colegas y amigos, es que Panamá tiene todo el potencial de recursos hídricos, sol y viento abundantes para convertirnos para el año 2050 en un país “todo eléctrico”, lo que nos mantendría en la cresta de la ola del desarrollo humano, crecimiento económico y modelo a seguir. Debemos cimentar una conciencia nacional del ahorro y uso racional y eficiente de los recursos energéticos, respetando y logrando el balance conveniente entre el medio ambiente y el desarrollo sostenido que todos anhelamos para el beneficio de nuestros hijos. Llevar energía eléctrica a los lugares más apartados de la nación significa desarrollar en todos los sentidos a nuestras comunidades, y explotar plenamente nuestro potencial natural para el bienestar económico.

El Presidente de los Estados Unidos de América, Jimmy Carter, señaló que “la siguiente guerra mundial será debido al agua”; palabras sabias de un estadista de gran visión. Nuestro país ha sido bendecido ya que contamos con abundancia de agua y otros recursos naturales que aún no han sido explotados, a pesar de la existencia de las tecnologías apropiadas para tal fin. Nuestro futuro como nación se ve brillante con la utilización más eficiente de nuestra principal riqueza natural, el agua, y de la electricidad como energía motor impulsor del progreso de nuestro país.

### Referencias

- [1] *Estadísticas del Sector Energía (2012)*. Sitio web de la Secretaría Nacional de Energía [En línea]. Disponible en: <http://www.energia.gob.pa/EstadisticaEnergetica.html>
- [2] E. Schildhauer, *Electricity in the Construction and Operation of the Panama Canal*, General Electric Review, Supplement to vol. XVIII, no. 7, July 1915.
- [3] M. Moreno, *Modernización del sector eléctrico en Panamá*, www.monografias.com
- [4] G. González, R. Barazarte, “Estudios de Alternativas Energéticas Sostenibles para Panamá”, Programa de Tecnologías Energéticas Avanzadas y Sostenibilidad, FIE, Universidad Tecnológica de Panamá, SNE-BID, 2002.



## Físicos crean un transistor funcional con un solo átomo

(Fuente: «Physicists Create a Working Transistor from a Single Atom», by John Markoff, The New York Times)

Un grupo de físicos Australianos y Americanos han construido un transistor funcional en base a un solo átomo de fósforo incrustado en un cristal de silicio.

El grupo de físicos de la University of New South Wales y Purdue University, afirman que han cimentado las bases para el desarrollo de un computador cuántico futurista que posiblemente algún día funcione en un mundo a nano escala y que será 'órdenes de magnitud' más pequeño y rápido en comparación con las máquinas actuales basadas en silicio.

En contraste a las computadoras convencionales que están basadas en transistores con estados distintivos "on" y "off" o "1" y "0", las computadoras cuánticas están basadas en qubits los cuales resaltan las peculiares propiedades de la mecánica cuántica. A diferencia del transistor, un qubit puede representar una multiplicidad de valores simultáneamente.

Esto puede hacer que sea posible factorizar grandes números con mucha más rapidez que con las máquinas convencionales, lo que desfavorece a los sistemas modernos de datos aleatorios (data-scrambling systems) los cuales son la base del comercio electrónico y privacidad de datos. Las computadoras cuánticas también podrán hacer posible simular estructuras moleculares con gran velocidad, una ventaja que es prometedora para el diseño de nuevos medicamentos y otros materiales.

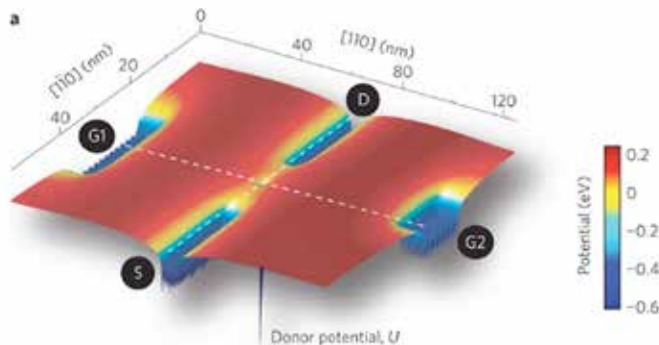


Foto: <http://www.engadget.com/2012/02/21/single-atom-transistors-point-to-the-future-of-quantum-computers/>

El Dr. Andreas Heinrich, físico de I.B.M., indica que la investigación fue un paso significativo hacia la creación de un sistema computacional cuántico funcional. Sin embargo, el aplicar computadoras cuánticas para realizar tareas útiles permanece incierto, y los investigadores señalaron que su trabajo más que nada demostraba los límites fundamentales a los que las computadoras de hoy en día serán capaces de encogerse.

Hasta estos momentos, transistores de un solo átomo han sido creados en base a ensayo y error, indican los científicos. "Pero el dispositivo es perfecto," afirmó Michelle Simmons, líder de grupo y directora del ARC Centre for Quantum Computation and

Communication en la University of New South Wales. "Esta es la primera vez que alguien ha demostrado control de un solo átomo en un sustrato con este nivel de precisión, indicó".

## Celdas solares en pantalla de teléfonos inteligentes (Smartphones)

(Fuente: «Solar Cells in Smartphone Screens, Researchers advance thin-film energy harvesters», By Neil Savage, IEEE Spectrum)



Foto: Tim Robbets/Getty Images.

Un grupo en la Universidad de Cambridge, liderado por Arokia Nathan (IEEE Fellow), está trabajando con un sólo propósito: desarrollar un teléfono celular que cada vez requiera menos recarga. En la reunión de otoño de la Sociedad de Investigación de Materiales en Boston, Arman Ahnood, un investigador del grupo, dijo a los científicos que eventualmente se podrá tener un teléfono que no necesitará ser conectado para ser cargado.

Para extender el tiempo entre cargas, el grupo de Nathan construyó el prototipo de un aparato que convierte la luz del medio ambiente a electricidad, utilizando un arreglo de celdas solares, hechas a partir de una delgada capa de silicio amorfo hidrogenado, diseñado para ser colocado dentro de la pantalla del celular. En un típico diodo emisor de luz orgánico (OLED, por sus siglas en inglés), solamente alrededor del 36% de la luz que penetra es proyectada fuera del frente de la pantalla, dice Ahnood. La mayoría de ella escapa por las esquinas del OLED, donde es inútil. Sin embargo, Nathan y sus colaboradores, de la firma canadiense IGNIS Innovation, se han propuesto recolectar esta luz desperdiciada colocando las delgadas capas de celdas fotovoltaicas alrededor de la pantalla también.

Hacer que el aparato funcione requerirá superar otro problema: fluctuaciones en el voltaje provistas por la celda solar, la cual pudiera dañar la batería del teléfono. Los investigadores, quienes hasta recientemente basaron sus investigaciones en la University College London, diseñaron un circuito transistor de capa delgada para disminuir los picos de voltajes y extraer electricidad con mayor eficiencia.

Tomará un poco de tiempo ir de un prototipo a productos consumibles. Por ejemplo, el equipo está explorando diferentes diseños de circuitos y materiales con el objetivo de incrementar la eficiencia del sistema recolector de energía. Otros esquemas de recolección de energía, como los recolectores de energía cinética basados en MEMS, pudieran contribuir a mayores mejoras, dice Nathan.



## Nano-árboles consumen energía solar para convertir agua en hidrógeno para combustible

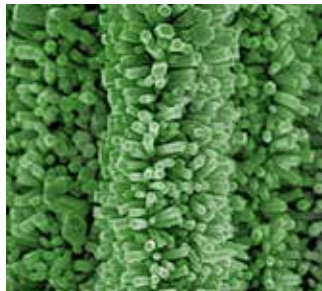
(Fuente: «Nanotrees Harvest the Sun's Energy to Turn Water Into Hydrogen Fuel», Science Daily)

En la Universidad de California, San Diego, ingenieros eléctricos están construyendo un bosque de pequeños árboles utilizando nano alambres con el propósito de capturar energía solar de manera limpia y utilizarla para producir hidrógeno para generación eléctrica. Reportado en la revista *Nanoscale*, el equipo indicó que los nano alambres, los cuales están hechos de materiales naturales abundantes, como silicio y óxido de zinc, también ofrecen una manera económica de producir hidrógeno a gran escala.

“Esta es una forma limpia de generar combustible limpio”, indicó Deli Wang, profesor en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computacional de la UC San Diego Jacobs School of Engineering.

La estructura vertical del árbol y sus ramas son clave para capturar la mayor cantidad de energía solar, según Wang. Esto es debido a que la estructura vertical del árbol captura y absorbe luz mientras que superficies planas simplemente la reflejan, indicó Wang, añadiendo que es similar a las células fotorreceptoras de la retina en el ojo humano. En imágenes de la Tierra, tomadas desde el espacio, la luz se refleja de superficies planas como en los océanos o desiertos, mientras que en los bosques aparece obscuro.

El equipo de Wang ha imitado esta estructura en su “arreglo de nano ramas 3D” el cual utiliza un proceso llamado separación de agua por fotoelectroquímica para producir hidrógeno gaseoso. La separación de agua se refiere al proceso de separar agua en oxígeno e hidrógeno para extraer el hidrógeno en forma de gas y así utilizado como combustible. Este proceso utiliza energía limpia sin producir gases de efecto de invernadero. Por comparación, la forma actual convencional de producir hidrógeno recae en utilizar electricidad proveniente de combustibles fósiles.



“Se considera al hidrógeno como una fuente limpia de energía en comparación con los combustibles fósiles pues no produce emisiones de carbón, pero el hidrógeno utilizado actualmente no se genera limpiamente,” indica Ke Sun, estudiante doctoral de ingeniería eléctrica quien lidera el proyecto.

A largo plazo, lo que el equipo de Wang desea obtener es una gran fotosíntesis artificial. En la fotosíntesis, a medida que las plantas absorben los rayos solares también recolectan el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua de la atmósfera para crear carbohidratos que utilizan para impulsar su propio crecimiento.

“Estamos tratando de reproducir lo que las plantas hacen para convertir la luz solar en energía,” dijo Sun. “Estamos tratando que en un futuro cercano, nuestra estructura de “nano-árboles” pueda

ser parte de un dispositivo eficiente que funcione como un verdadero árbol para fotosíntesis”.

## Alemania planea una línea de 3800 km y \$25 billones para transmitir potencia eólica

(Fuente: «Germany Plans 3800-kilometer, \$25 Billion Transmission Network for Wind Power», IEEE Spectrum)

El operador de transmisión de Alemania, luego de haber marcado el récord de mayor producción de energía solar, indicó que actualmente hay planes para construir una inmensa línea de transmisión para acomodar los recursos eólicos en crecimiento.



La meta es construir 3,800 kilómetros (más de 2,300 millas) de líneas de alto voltaje -2100 km de líneas de corriente directa y 1,700 de líneas de corriente alterna- proveniente de las costas del mar Báltico y el mar del Norte hacia las partes sureñas del país. El mar del Norte ya alberga algunas turbinas fuera de la costa (y el gobierno desea alrededor de 10 GW de viento instalado para el 2022 para alcanzar las metas de energía renovable del país). Para el 2030, la esperanza es que más de 25 GW sean instalados —algo alrededor de 5000 turbinas, dependiendo del tamaño.

Las líneas de transmisión no serán fáciles de construir. Las nuevas líneas costarán alrededor de 20 billones de euros (cerca de \$25 billones), y se necesitará la aceptación del público y los políticos para llevar a cabo el proyecto.

Klaus Kleinekorte, CEO del operador de transmisión Amprion, enfatizó la importancia de comenzar este proyecto tan pronto sea posible ya que se desea tenerlas entregando potencia a más tardar en el 2020. Alemania posiblemente tendrá un pequeño déficit energético en las próximas décadas debido a la salida de las plantas nucleares luego de Fukushima, las cuales en su totalidad deberán ser desconectadas para el 2022. La red se verá con mayores posibilidades de sufrir apagones con la salida de los reactores nucleares y la entrada de renovables, lo que pudiera ser facilitado con la entrada de buenas redes de transmisión.

Y aunque el costo de \$25 billones parece un poco alto, es sólo una pequeña parte dentro de la imagen energética completa de Alemania. A principios de este año, Siemens estimó que eliminar las plantas nucleares pudiera costar más de \$2 trillones. Es refrescante ver cómo el país comienza a manipular estos problemas energéticos —aun cuando las dificultades de logística y costos están en todas partes, Alemania claramente no está jugando cuando a energía renovable se refiere.



# Responsabilidad social en la gestión de la producción de las principales industrias panameñas

Virginia Santos H. | Erika Y. Pinzón M.

Facultad de Ingeniería Industrial  
Universidad Tecnológica de Panamá  
erika.pinzon@utp.ac.pa

**Resumen:** *la Responsabilidad Social (RS) debe ser vista como un enfoque holístico que parte del hecho de que las industrias no están solas en los mercados, ya que también las componen los productores, trabajadores, usuarios y consumidores de sus productos y servicios, la comunidad en donde están ubicadas y las poblaciones afectadas por sus prácticas productivas y/o comerciales. Es por ello que ha surgido un sentido de RS más allá de las responsabilidades legales que tienen que cumplir las industrias, lo cual podríamos resumir en que este concepto no trata de imponer que sólo se cumplan los requisitos legales, sino más bien que, éstas voluntariamente reconozcan que tienen una responsabilidad con todos los actores que la componen, el medio ambiente y los recursos que le sirven para producir lo que venden. Sin embargo, la conciencia de que las industrias deben adoptar formalmente un programa de RS como mecanismo voluntario que brinde beneficios a la sociedad y a ellas mismas, aún no se logra, ya que muchas consideran que cumplen en la medida en que proporcionan empleo a la comunidad y cumplen con las leyes que rigen sus prácticas productivas y de negocios.*

**Palabras claves:** *industrias, producción, responsabilidad social.*

**Title:** *Social Responsibility in the Production Management of the Main Panamanian Industries.*

**Abstract:** *Social responsibility (RS) must be seen as a holistic approach from the fact that industries are not alone in markets, which are also composed of producers, workers, users and consumers of their products and services, the community where they are located and populations affected by their productive and/or commercial practices. That is the reason why a RS sense has arisen beyond legal responsibilities that industries have to fulfill, which could be summed up in that this concept does not seek to impose that only legal requirements are met, but rather that industries voluntarily recognize that they have a responsibility to all the actors which are part of them, the environment and the resources that are used to produce what they sell. However, the awareness that the industries must formally adopt a program of RS as voluntary mechanism to provide benefits to society and to themselves, have not yet been achieved since many believe that they achieve this as long as they provide employment to the community and comply with the laws that govern their production and business practices.*

**Keywords:** *industries, production, social responsibility.*

## La investigación: metodología y participantes locales

Conscientes que la Responsabilidad Social (RS) es un tema que está tomando cada vez mayor relevancia a nivel mundial debido a los constantes cambios provocados por la globalización, la falta de conciencia generalizada, los rápidos avances tecnológicos y los desequilibrios en el medio ambiente, se decidió llevar a cabo una investigación exploratoria, mediante el método cualitativo directo, con un muestreo por conveniencia que incluyó la aplicación de entrevistas exhaustivas a expertos en Responsabilidad Social Industrial (RSI) que laboran en sectores industriales panameños y llevan adelante programas de RSI.

Es así como fueron considerando siete sectores industriales: Extracción de Madera, Pesca, Manufactura, Explotación de Minas y Canteras, Construcción, Distribución de Electricidad y Sector Agropecuario; dando como resultado un total de nueve elementos muestrales o entrevistados, a razón de uno por sector industrial, más uno adicional por sector, en aquellos casos en los que los mismos llevan a cabo más de una actividad económica y/o productiva. También se incluyó la opinión del Sindicato de Industriales como principal gremio industrial y a la empresa Lindo y Maduro, como caso excepcional por haber sido ganadora de la medalla Vicente Pascual Barquero, otorgada por APEDE por su Liderazgo Ético y Responsabilidad Social Empresarial.

Dichos sectores industriales fueron evaluados en cuanto a su desempeño en materia de Gestión de la Producción Industrial (GPI), evaluación que fuera realizada entre enero y marzo de 2012, con la intención de sondear la situación y nivel de desarrollo de esta temática en Panamá; así como también, el papel social que las industrias están jugando para proporcionar a nuestra sociedad, bienes y servicios de calidad con una base ética y sin perder de vista los problemas sociales.

Por otro lado, se encontró que según investigaciones llevadas a cabo por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) [1], el concepto de RS evolucionó a partir del interés de empresarios europeos y estadounidenses que luego de la depresión de 1929, buscaron generar un clima favorable entre los empleados, con el fin de garantizar mejores condiciones de trabajo y bienestar para los trabajadores.

## El surgimiento y evolución de la RS en Panamá y el mundo

Luego de la segunda mitad del siglo pasado y después de la segunda guerra mundial, las aspiraciones socialistas de los trabajadores, llevaron a los empresarios a ver la necesidad política de integrarlos progresivamente a la gestión de las empresas. Paralelo a este interés político y social que llevó al desarrollo de una incipiente RS, fue necesario ampliar la conciencia de los empresarios acerca de las consecuencias sociales de las acciones de las empresas. Ello aconteció en las décadas de 1950 y 1960 en Estados Unidos, cuando la acción caritativa individual del empresario evolucionó hacia la acción del conjunto de las empresas, incentivadas por facilidades tributarias.

En Panamá, el concepto de RS ha surgido formalmente gracias a la creación del Centro Empresarial de Inversión Social (CEDIS), el cual es un organismo sin fines de lucro establecido desde el año 2000, por empresarios visionarios, cuyo objetivo central es el de contribuir al desarrollo económico



y social del país. Sin embargo, basándonos en los resultados de la investigación en cuestión, encontramos que aún se desconoce la esencia de dicho concepto a nivel de las industrias y empresas panameñas, pese a que muchas llevan algún tiempo recorriendo el camino hacia la puesta en marcha de actividades de RS en Panamá.

Para explicar mejor este concepto, citamos al autor William Stanton, quien en su obra Fundamentos de Marketing [2] señala que: “La RS se da cuando el concepto de amplitud del marketing se extiende, una empresa reconoce que su mercado abarca no solamente a los compradores de su producto, sino también, a cualquier afectado directamente por sus operaciones”. Esto es lo que se conoce como Marketing Social, el cual está estrechamente ligado al concepto de RS.

Y es que la RS ha de ser vista como un enfoque holístico que parte del hecho que las industrias no están solas en los mercados, ya que también las componen los productores, trabajadores, usuarios y consumidores de sus productos y servicios, la comunidad en donde están ubicadas y las poblaciones afectadas por sus prácticas productivas y/o comerciales como se ilustra a continuación.



Figura 1. Enfoque holístico de la RS [3].

Es por ello que ha surgido un sentido de RS más allá de las responsabilidades legales que tienen que cumplir las industrias, lo cual podríamos resumir en que este concepto no trata de imponer el que sólo se cumplan los requisitos legales, sino más bien que éstas voluntariamente reconozcan que tienen una responsabilidad con todos los actores que la componen, el medio ambiente y los recursos que le sirven para producir lo que venden.

No obstante, la conciencia de que las industrias deben adoptar formalmente un programa de RS como mecanismo voluntario que brinde beneficios a la sociedad y a ellas mismas en aspectos tales como: operacionales, productivos, financieros, comerciales y de mejora de su imagen, aún no se logra, ya que muchas consideran que cumplen en la medida en que proporcionan empleo a la comunidad y cumplen con las leyes que rigen sus prácticas productivas y de negocios. Aunado a esto, la RS es comúnmente confundida con dos

conceptos básicos: la filantropía y la inversión social.

La filantropía se expresa en la utilización de un mecanismo de donaciones en dinero o especie a grupos humanos o individuos con carencias materiales; mientras que la inversión social es la canalización de recursos de la empresa hacia la comunidad, que beneficia tanto a ésta como a la misma empresa.

Contrario a lo antes expuesto, la RS va más allá porque busca integrar la filantropía, la inversión social, el voluntariado, las relaciones públicas, la necesidad de asegurar la lealtad de la comunidad y su desarrollo con el incremento de la productividad del trabajador; así como el interés de obtener utilidades y programas de RS de manera permanente y estable en el tiempo, lo cual se conoce como “sostenibilidad”. Esto implica crear una visión integral de largo plazo en la que no sólo se incorpora la comunidad, sino también la sociedad en general y el país.

Según expertos en este tema, como el autor Bernardo Kilksberg [4], la RS es una exigencia ética de la sociedad, pero al mismo tiempo, es el modo en que la empresa puede reciclarse para el siglo XXI. Un siglo donde deberá rendir cuentas, no sólo a sus dueños como equivocadamente creía Fiedman, sino a todas las partes interesadas (*stakeholders*), lo que significa: a sus propios empleados, los pequeños inversionistas, los consumidores, la opinión pública y la sociedad civil en sus diferentes expresiones y agrupaciones.

## Los resultados y su impacto en el sector industrial panameño

Con los resultados del sondeo realizado en la ciudad de Panamá a un representante industrial experto en materia de RS de cada uno de los siete sectores antes señalados, el Sindicato de Industriales y la empresa Lindo y Maduro, ahora sabemos que en nuestro país la situación actual de la RS, a nivel de las industrias, se encuentra más o menos balanceada, en donde la balanza se inclina más hacia el hecho de que algunos sectores consideran que las prácticas de RS sólo se están utilizando como una herramienta para hacer negocios y no como un compromiso social auténtico; mientras que otros sectores, opinaron que la RS no se está tomando a la ligera o por compromiso



Figura 2. Impacto de la RS a nivel de las industrias locales [5].



ASPECTOS QUE HAN IMPACTADO SU INDUSTRIA

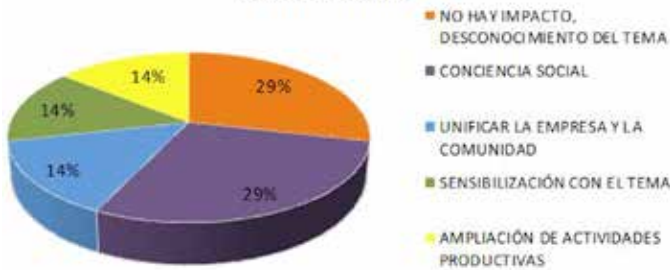


Figura 3. Aspectos que han impactado en las industrias locales [5].

TENDENCIA

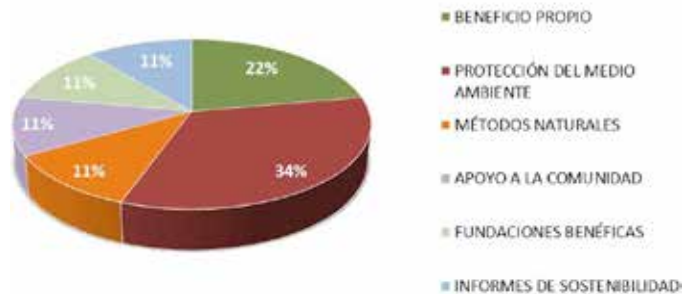


Figura 4. Tendencias a nivel global en la RSI de la GPI [5].

legal, ya que perciben que se está creando conciencia a nivel de todo el mercado local, pero que éste es un proceso que toma su tiempo debido principalmente a factores tales como: la falta de conocimiento sobre lo que realmente es la RS, los altos costos de implementación de programas y la falta de normas que regulen dichas prácticas.

Asu vez, consideraron que la tendencia global es la responsabilidad con el medio ambiente, seguida del apoyo a las comunidades, fundaciones benéficas, el uso de métodos naturales en la producción para mejorar el ambiente y los recursos renovables.

En términos generales se piensa que a nivel mundial la competitividad en este aspecto es mucho mayor que en Panamá, debido a que el número de industrias mundiales es mayor, lo cual les permite que inviertan mucho más en RS, al tiempo que, conocen más sobre el tema y tienen más experiencia. En esta misma línea, hubo quienes mencionaron que en el país se está aprovechando el desarrollo económico y la incursión de empresas multinacionales para estar más actualizados sobre las mejores prácticas de RS y cómo implementarlas; sin embargo, la percepción general es que en Panamá realmente no hay programas de RS con impacto social sostenido, debido a que sólo se están realizando programas momentáneos y prácticas inspiradoras, pero las mismas no tienen una continuidad en el tiempo, pues sólo se centran en actividades puntuales como ferias, iniciativas de apoyos a comunidades y sobre todo, se piensa que el concepto de sostenibilidad es mal interpretado y hasta desconocido por los panameños, ya que no se sabe a ciencia cierta cuáles son sus implicaciones y su alcance, centrándose simplemente en llevar a cabo actividades anuales de RS, cuando lo que debería lograrse son proyectos que se sostengan por sí solos y a través del tiempo o a largo plazo con sólo darles ayuda, dedicación e instrucción inicial y posterior seguimiento.

Para la gran mayoría de los expertos, el concepto de RS está plenamente vinculado al tema de la protección al medio ambiente porque la industria impacta notoriamente en la contaminación ambiental.

Es por ello que se piensa que se deben mejorar los procesos de manejo de desperdicios y emanación de vapores o gases tóxicos, al tiempo que, también se piensa que el concepto de RS debe ser definido e incluido en la educación, la cultura, en las comunidades y, sobre todo, en la toma de decisiones empresariales.

La situación real percibida frente a este tema en la gestión de la producción industrial es que no hay programas de RS establecidos que les ayuden a tener una guía de cómo llegar a ser socialmente responsables, sólo hay un cumplimiento de lo mínimo exigido por entes reguladores como ANAM u otros, pero en esencia, se sabe que sus recomendaciones no constituyen una regulación, norma o práctica de RS propiamente dicha.

Es por ello que la mayoría señaló que realizan prácticas de RS implementadas como políticas internas, propias y voluntarias, con las que suponen que la RS se está desarrollando cada día más gracias a los avances tecnológicos, aunque reconocen que existe una gran desorganización a nivel industrial por falta de interés en el tema, lo cual hace que no haya un impacto significativo en materia de RS industrial.

Esto no quiere decir que las industrias no gestionen la RS, pero reconocen que aunque conlleva actividades que benefician a las empresas, comunidad y medio ambiente, lo que hacen es poco y quienes más la implementan, son las que se deben a sus empresas madres o a sus clientes extranjeros, quienes les exigen cumplir con dichas normas porque éstas son de normal cumplimiento en sus países de origen, especialmente en el caso de sectores tales como la minería y la pesca.

En la Tabla 1 se indican las actividades más destacadas y gestionadas por tipo de sector.

Con las prácticas de RS adoptadas e implementadas en cada sector, se percibe una empatía o aceptación entre las comunidades. Algunos sugieren que también han logrado aumentar la demanda de sus productos y servicios porque los clientes se sienten identificados con la causa y cooperan con las empresas que dan a conocer sus prácticas de RS.

Finalmente se llegó a la conclusión que las industrias panameñas consideran que existen muchas posibilidades en materia de RS porque con su adopción, mejoran los procesos y productos terminados, aumentan la competitividad e involucran a sus asociados internos y externos en el proceso productivo. Además, consideran que todo esto sería aún más fácil de lograr si los gremios industriales y empresariales, apoyaran con mayor divulgación y sensibilización a sus agremiados sobre esta temática y, sobre las mejores prácticas a



adoptar en cada sector. La importancia de esta sugerencia radica en que los expertos consideran que en Panamá aún no existe algún ente regulador que capacite, regule y/o monitoree formalmente las prácticas de RS, exceptuando al sector minero, cuyo experto mencionó algunas iniciativas aisladas por parte del Ministerio de Comercio e Industrias (MICI) a nivel estatal; mientras que el del sector de distribución de electricidad mencionó a SUMARSE, institución que se dedica a dar seguimiento y orientación sobre prácticas de RS a nivel privado.

Lo cierto es que aunque este tema está muy de moda a nivel mundial, aún queda mucho por hacer y mucho que aprender en materia de RS, e incluso, aún está por verse si se aprueba definitivamente o no, tomando en cuenta que dicho concepto aún genera posiciones encontradas por diversos aspectos como: la tendencia a su implementación sólo por la importancia de quedar bien con los clientes, aplicándose como compromiso social y como mecanismo de agregar valor a los productos y servicios; por el cumplimiento de leyes o exigencias de los mercados, o hasta por los altos costos de implementación que conlleva, entre otros aspectos.

SITUACIÓN REAL PERCIBIDA

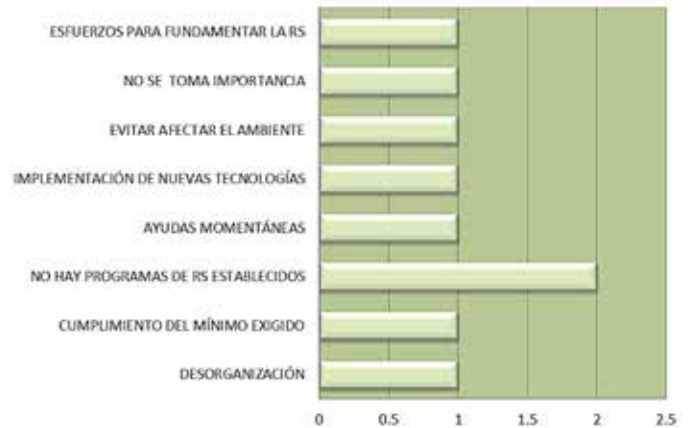


Figura 5. Situación real percibida en las industrias frente al concepto de RS en la GPI [5].

Tabla 1. Actividades de RS más destacadas y gestionadas en las industrias locales [5].

MADERA	PESCA	MANUFACTURA	MINERÍA	CONSTRUCCIÓN	ELECTRICIDAD	AGROPECUARIO
<ul style="list-style-type: none"> <li>Préstamo de terrenos para siembra de productos alimenticios en beneficio de la comunidad con la ayuda de líderes de la comunidad.</li> <li>Donación de suministros para la siembra, para aquellas personas que tengan terrenos disponibles.</li> <li>Limpieza de áreas comunes (comunidad-empresa).</li> <li>Siembra de bambú para crear una barrera contra los polvillos que desecha una planta cementera en la comunidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incentivos a los colaboradores para que participen en las prácticas de RS, a través de seminarios.</li> <li>Velar por el cumplimiento de reglamentaciones existentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reciclaje constante.</li> <li>Apoyo anual a la Teletón 20-30.</li> <li>Donaciones a iglesias.</li> <li>Participación en campañas para la prevención de cáncer.</li> <li>Proteger el medio ambiente con prácticas de reutilización.</li> <li>Brindar un ambiente de trabajo adecuado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Garantizar la educación en poblaciones aledañas.</li> <li>Promover sano esparcimiento en comunidades adyacentes.</li> <li>Conservación de flora y fauna.</li> <li>Reforestación y restauración de zonas.</li> <li>Capacitación al personal e interés por su desarrollo profesional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Donación de útiles escolares.</li> <li>Limpieza de cunetas en la comunidad.</li> <li>Poda de árboles que pueden representar un riesgo para las familias</li> <li>Mantenimiento de las carreteras.</li> <li>Control del polvo industrial para evitar que afecte a la comunidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Promover actividades para la niñez y juventud.</li> <li>Promover la educación- Creación de una fundación denominada "Conexión".</li> <li>Crear conciencia en el uso racional de la energía eléctrica y así ayudar a proteger el medio ambiente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Programas de bienestar social.</li> <li>Ayuda a discapacitados.</li> <li>Uso de productos amigables con el ambiente.</li> <li>Cooperación con fundaciones no gubernamentales.</li> </ul>

## Referencias

- [1] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. *Responsabilidad Social Empresarial*. Panamá, República de Panamá 2003.
- [2] W. Stanton, M. Etzel, B. Walker, *Fundamentos de Marketing*. Decimocuarta edición. México 2007.
- [3] ISO 26000 Responsabilidad Social, Folleto "Descubriendo ISO 26000", [http://www.iso.org/iso/discovering\\_iso\\_26000-es.pdf](http://www.iso.org/iso/discovering_iso_26000-es.pdf)
- [4] B. Kilksberg, A. Sen. *Primero la gente*. Argentina, Buenos Aires 2010.
- [5] V. Santos, "La Responsabilidad Social en la Gestión de la Producción Industrial Panameña". Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, Mayo de 2012.
- [6] S. Rodríguez, *La Red del Pacto Global y sus Miembros en Panamá, RSE*. Panamá 2008.
- [7] Sindicato de Industriales de Panamá. *Balance Económico y Perspectivas*. Panamá, 2006.

# Hacia la integración de la enseñanza universitaria de pregrado y la investigación

**Carlos A. Medina C.**

Facultad de Ingeniería Eléctrica  
Universidad Tecnológica de Panamá  
carlos.medina@utp.ac.pa

**Resumen:** *durante mucho tiempo se ha debatido acerca de la importancia e impacto de integrar la investigación con la enseñanza universitaria de pregrado. Hay muchos estudios que muestran que no existe una correlación significativa entre ambas, pero también existen muchos otros estudios que indican claramente las formas en que la investigación puede enriquecer la enseñanza y tener un impacto positivo en la formación de los estudiantes y el desempeño de los docentes. En este sentido, este artículo contrasta los objetivos de la investigación y la enseñanza, y considera diversas formas en que ambas se pueden complementar, interrelacionar y retroalimentar para beneficio de estudiantes, docentes y toda la sociedad. Se desarrolla, también, el concepto de docente-investigador y se proponen algunas medidas que pueden llevar a las universidades a lograr una sinergia entre investigación y enseñanza.*

**Palabras claves:** *docente-investigador, enseñanza de pregrado, integración enseñanza e investigación, investigación.*

**Title:** *Towards the integration of the undergraduate university education and research*

**Abstract:** *For a long time, the importance and impact of integrating research with the university education of undergraduate students has been discussed. There are many studies that show that there is no significant correlation between the two, but there are also many other studies that clearly indicate the ways in which research can enrich teaching and have a positive impact on training of students and the performance of teachers. In this sense, this article contrasts the objectives of research and teaching, and considers various ways in which both can complement, interrelate and feed back for the benefit of students, teachers and society as a whole. Also, the concept of teacher-researcher is introduced, and some measures that may lead to the universities to achieve a synergy between research and teaching are proposed.*

**Keywords:** *teacher-researcher, undergraduate education, teaching and research integration, research.*

## Introducción

La perspectiva de realizar investigación científica y desarrollo de tecnología en las universidades no es algo nuevo, y en las últimas décadas se ha convertido en un requerimiento, al punto de que

en los países desarrollados la productividad en investigación es un criterio dominante, y a veces en el único criterio, para la contratación, permanencia y promoción del personal en las universidades, no sólo de aquellas dedicadas a la investigación, sino también en otras instituciones cuya principal misión es la enseñanza. Y es que se entiende que la investigación es el principal instrumento para solucionar o plantear alternativas a los problemas socioeducativos, políticos, económicos y culturales de una sociedad, y es un medio que permite reflejar las condiciones y capacidades de un país, de la comunidad y de la misma institución que la promueve.

Así, la investigación debe ser un elemento fundamental de toda universidad que debe promoverse y vincularse a la enseñanza, desde el nivel de pregrado. Si esto no se considera, se corre el peligro de tener universidades que no son más que fábricas de títulos profesionales, y que omiten otras funciones como aquellas buscadoras del saber puro y aplicado para resolver, de manera eficaz y eficiente, los problemas de la sociedad. Entonces, es necesario, en las universidades, crear y construir conocimiento, y no solamente repetirlo, por lo que durante la formación universitaria no sólo es necesario aprender nuevos conocimientos sino –y sobre todo– incorporar los mecanismos a través de los que se genera el conocimiento.

Esta necesidad es urgente en Panamá y en la región Latinoamericana, ya que las universidades, en su historia, se han visto limitadas y afectadas por el bajo desarrollo de la investigación; en muchos casos no existe investigación y en otros casos en que algo de investigación se hace, ésta tiene una relación casi nula con la enseñanza de pregrado y de postgrado.

Por esto, es importante plantearse las siguientes preguntas: ¿qué busca la enseñanza?, ¿qué es investigación? y ¿cómo se pueden integrar investigación y enseñanza en el nivel de pregrado para lograr una sinergia?

## Enseñanza e investigación

La enseñanza efectiva tiene múltiples objetivos importantes y entre los más significativos están: permitir a los estudiantes lograr una comprensión profunda e integral de los temas que estudian, ayudar a los estudiantes a aprender cómo desglosar y resolver problemas intelectuales, desarrollar en los estudiantes una aguda capacidad analítica, y la capacidad para articular sus percepciones y entendimiento con convicción; fomentar el deseo por aprender e investigar, y preparar a los estudiantes para sus carreras profesionales y para contribuir a la sociedad.

Por otro lado, investigación se puede definir como la búsqueda científica del conocimiento, o como cualquier estudio sistemático, para establecer hechos novedosos, resolver problemas nuevos o existentes, probar nuevas ideas, o desarrollar nuevas teorías, usando un método científico.

El Manual de Frascati de la OECD [1] define dos formas de investigación: básica y aplicada; así como el término desarrollo experimental, todos bajo el concepto de I+D. Las definiciones de investigación en [1], ampliamente aceptadas, se enfocan principalmente en la obtención de nuevos conocimientos, y trabajos originales. La primera acerca de los fundamentos de los fenómenos



y hechos observables y la segunda, acerca de objetivos prácticos específicos. Es decir, corresponden a lo que podríamos llamar “investigación para descubrimiento”.

En general, se establece que “la I+D aparece cuando la solución de un problema no resulta evidente para alguien que está perfectamente al tanto del conjunto básico de conocimientos y técnicas habitualmente utilizadas en el sector de que se trate” [1]. Es decir, debe haber un elemento apreciable de novedad y resolución de una incertidumbre científica y/o tecnológica.

Estas definiciones se concentran en el tipo tradicional de investigación científica (investigación para descubrimiento) que busca generar nuevo conocimiento. Sin embargo, como universidad, es necesario, para desarrollar y fortalecer la investigación, integrar ésta con el proceso de enseñanza aprendizaje y las actividades de extensión. Se reconoce así, que la investigación para descubrimiento (o de frontera) es una función vital en las universidades, pero también son valiosos y necesarios los esfuerzos de estudios para comprender mejor y perfeccionar el proceso educacional, para extender los nuevos descubrimientos a contextos más amplios o a otras disciplinas, o para aplicar el nuevo conocimiento a problemas con impacto de mayor alcance.

Este planteamiento no es algo nuevo, y está sustentado en valiosos trabajos, indicados a continuación, cuyas ideas han sido adoptadas en importantes universidades de Estados Unidos y Europa:

- Un modelo de investigación académica que se originó en 1990 con la influyente publicación *Scholarship Reconsidered* [2] de Ernest Boyer, quien consideró que la definición tradicional de lo que se acepta como investigación era muy limitada para las universidades.
- Las definiciones de cuatro formas de investigación y los protocolos para su evaluación que se establecen en la monografía *Scholarship Assessed* [3].
- La investigación de Laursen y otros, cuyos resultados aparecen en la publicación “*Undergraduate Research in the Sciences: Engaging Students in Real Science*” [4], sobre la importancia de la investigación como herramienta educativa para estudiantes de pregrado.

Por ejemplo, Laursen y otros presentaron sus resultados en la evaluación de los efectos que el participar en procesos de investigación a nivel de licenciatura tuvo en los estudiantes y las instituciones académicas en las que esto se daba. Este estudio fue realizado para universidades cuyo principal propósito es la formación de profesionales a nivel de licenciatura en áreas de ciencias, tecnología y matemáticas, y es ampliamente aceptado como un indicativo de la importancia de involucrar a los estudiantes de licenciatura en procesos de investigación cuyas preguntas y metodologías sean auténticas al campo de trabajo, independientemente de la obtención o no de resultados originales.

La integración de la investigación y la enseñanza posibilita incorporar y apoyar la enseñanza para mejorar el aprendizaje, apoyar la enseñanza en la práctica y aumentar la participación de los docentes en actividades de investigación. Esto último es muy importante, porque mientras se valoren más actividades que cuentan como investigación, mayor es la cantidad de docentes que pueden integrar investigación y enseñanza, y mayor será la cantidad de estudiantes favorecidos con esta experiencia.

En la universidad, se hace necesario, entonces, adoptar una definición adecuada, amplia y propia de lo que es investigación, así como un protocolo de evaluación de la misma, que permita integrar la investigación y la enseñanza, de forma que se tenga un efecto positivo significativo en la formación de los estudiantes y el desarrollo de los docentes-investigadores.

La integración entre enseñanza e investigación vendría en la formación de los estudiantes, por diversas metodologías, en los diversos procesos o pasos que se siguen en una investigación formal, así como la participación directa de los mismos en algunas etapas de un proyecto de investigación y algunos estudiantes en sus trabajos de final de carrera. Esta integración la tienen que hacer los docentes-investigadores, quienes son los que deben tener la capacidad y experiencia para generar nuevo conocimiento.

### El docente-investigador

Aún cuando docencia e investigación tienen diferentes objetivos y requieren distintas competencias y cualidades personales, también es cierto que la enseñanza y la investigación son actividades que se pueden complementar, interrelacionar y retroalimentar mutuamente, para lograr una sinergia.

Como se resume en [5], el fin principal de la investigación es avanzar el conocimiento, mientras que el de la enseñanza es desarrollar y fortalecer capacidades. Los científicos se valoran principalmente por lo que descubren y los problemas que resuelven, y los docentes por lo que ellos permiten a sus estudiantes descubrir y resolver. Los buenos investigadores deben ser observadores, objetivos, diestros para hacer inferencias, y tolerantes con las ambigüedades; mientras que los buenos docentes deben ser comunicadores diestros, estar familiarizados con las condiciones que promueven el aprendizaje y expertos en establecer estas condiciones, accesibles y empáticos. Es posible y deseable tener ambos conjuntos de características, pero tal vez no sea posible la excelencia en ambos tipos de tarea, ya que ambas son demandantes y el tiempo que se ocupe en una, es tiempo que se le “quita” a la otra. Por lo tanto, no debe sorprender que haya estudios que revelen que no existe una correlación significativa entre investigación y enseñanza [6]. Pero ese no es el punto que tratamos aquí, sino el hecho que en la universidad actual todo docente debe tener conocimientos y experiencias en investigación, para poder incorporarlos en la enseñanza a nivel de pregrado por medio de diversas metodologías y actividades. No se debe esperar que todos los docentes sean investigadores excelentes, pero sí se debe procurar que la investigación constituya el centro esencial para la formación de los profesionales en todos los campos del saber, y se tengan docentes no sólo dedicados a la docencia o a la transmisión de conocimientos, sino docentes activos que investiguen y conviertan a sus estudiantes de oyentes pasivos en co-investigadores activos, integrando así la docencia y la investigación.

El desarrollo de la capacidad investigativa implica dos aspectos esenciales: el primero, que el docente domine los métodos de investigación, y el segundo, que el docente participe en la dirección y ejecución de proyectos de investigación. Sin embargo, estos aspectos no se desarrollan, si previamente los docentes no han recibido una

formación en materia de investigación. En este sentido, es importante tener presente que solo algunos docentes se destacan tanto en la enseñanza como en la investigación, muchos en una u otra, y algunos no son excepcionales en ninguna. Por eso, es necesario tomar en cuenta las potencialidades de cada docente y desarrollar una gestión que les acomoda de forma conveniente y adecuada a ambos roles. Por otro lado, como al final esto es un asunto individual, es necesario que el docente universitario asuma una actitud crítica desde y en su propia formación, la cual no debe centrarse solamente en la actualización de los avances del conocimiento de su campo específico, sino que debe ser asumida desde la perspectiva de la formación integral, ética, pedagógica, científica, humanística y tecnológica, buscando mejorar en sus dos roles – docencia e investigación.

Se hace necesario entonces, que el docente en ejercicio se incorpore a un proceso de desarrollo y perfeccionamiento profesional relacionado con cursos de especialización, maestría y doctorado, lo cual conducirá no sólo a convertirlo en un especialista en el área de conocimiento, sino que lo proveerá de herramientas técnico científicas, dominio conceptual y procedimental adecuado para hacer investigación.

El desarrollo de la investigación es compromiso del docente con y para la sociedad y la universidad, lo que constituye un imperativo, ya que las consecuencias de dicha actividad crean un aporte favorable a los problemas que emergen de la sociedad, y de igual forma los productos de la investigación y la práctica cotidiana de la misma por parte de los docentes-investigadores, son una contribución para mejorar la calidad de la docencia y de desarrollo profesional.

Así, la formación del docente-investigador ha de entenderse como un proceso complejo y de compromiso donde debe contribuir el interés del docente, de la institución y del estado con la finalidad de producir y desarrollar profesionales comprometidos con esta actividad y capaces de responder a los retos de la sociedad, y que desde la cátedra se convierta en un modelo a seguir por sus estudiantes, al integrar la docencia con la investigación.

### ¿Cuáles son las ventajas de integrar la enseñanza y la investigación?

Actualmente la velocidad con que se generan los conocimientos y tecnologías es más rápida que su difusión, por lo que el modelo de enseñanza basado en la asimilación de información ha dejado de ser una solución realista para el desarrollo, a menos que se modifique el modelo y se incorpore en su base un importante componente de investigación científica. Esto hace necesario reconsiderar el papel de la investigación y reelaborar la forma cómo la misma debe insertarse en la formación de recursos humanos si aspiramos a que éstos sean de primer nivel.

A pesar de que no hay evidencias de que el buen desarrollo de actividades de investigación garantiza una mejora espontánea de la calidad de enseñanza, esto sí permite generar bases adecuadas para lograrlo. Como indica Ungerfeld en [7], es posible mejorar muchos aspectos del proceso de enseñanza aprendizaje a partir de una masa de docentes con formación científica sólida que logren, por ejemplo, desarrollar textos y material de apoyo con perspectivas distintas a los textos clásicos, así como ejemplos actualizados y contextualizados, que acentúen lo formativo; estimular la participación de estudiantes en

actividades de investigación y la divulgación de resultados, e incorporar a las actividades de enseñanza la búsqueda, manejo y análisis de información de fuentes apropiadas, entre otras cosas.

La participación en actividades de investigación universitaria permite también una mejora significativa en la formación y desempeño de docentes y en la motivación de los estudiantes. Estos últimos se enfrentan con nuevas situaciones, y aumentan su acción y comprensión, al tiempo que se estimula el desarrollo de su personalidad y autoconfianza.

Así, los integrantes de los centros universitarios, incluyendo a los estudiantes, deberían realizar actividades de investigación, no solamente como tarea generadora de conocimientos, sino también como actividad de enseñanza directa, apuntando a una formación de primer nivel. Para todos, el principal objetivo debe ser la formación científica y el desarrollo de una mentalidad creadora.

La investigación estimula el razonamiento, y por tanto el aprendizaje dirigido hacia el conocimiento de la verdad. Esto, a su vez, tiene un impacto significativo en el comportamiento no sólo en el área científica, sino también socioeconómica y cultural de las personas. Además, el proceso de investigación enseña a aprender, ya que estimula el análisis crítico de la realidad, al tiempo que motiva a ir más allá en el análisis de los conocimientos adquiridos de la docencia o de la lectura, y refuerza la capacidad de análisis y síntesis. Esto, en general, permite mejorar la calidad de la enseñanza aprendizaje.

Además, la integración de la investigación es un modelo efectivo para desarrollar el pensamiento lógico y la síntesis de conocimientos, que son unas de las más importantes dificultades formativas de los estudiantes universitarios, tanto a nivel de las actividades de enseñanza aprendizaje como en las evaluaciones, y que resultan ser, probablemente, unas de las causas de fracaso profesional.

También, la integración a actividades de investigación es una de las formas más adecuadas para que el estudiante conozca y desarrolle su propia forma de aprender; además de permitir al estudiante visualizar al conocimiento como algo dinámico. A su vez, para desarrollar actividades de investigación es necesario conocer cuál es el límite de conocimiento en una determinada área, por lo que también se aprende a manejar información nueva, y a sintetizar nuevas teorías e ideas.

La investigación también permite desarrollar un lenguaje adecuado, claro, preciso y conciso, que sea percibido sin dificultad o dudas, permitiendo definir o describir una cosa dando de ella todos los datos necesarios para que sea bien identificada y distinguida de cualquier otra sin espacio para dudas, y expresarse sólo con las palabras justas y necesarias. Un trabajo de investigación puede ser considerado como tal sólo si es comunicado. Por lo tanto, hay que incorporar este aspecto a la utilización de la investigación en la enseñanza.

Las actividades de investigación resultan una forma efectiva de entrenarse para plantear el desarrollo de estrategias conocidas o diferentes en la solución de situaciones nuevas, no previstas dentro de los esquemas tradicionales, a través de los que se presenta el contenido clásicamente. Con la investigación se pueden entender los fundamentos de los problemas, lo que es necesario para poder trabajar sobre los mismos, y elaborar posibles alternativas de solución.

La investigación también permite desarrollar diseños de metodologías concretas basadas en el pensamiento lógico para la solución de



problemas. Los argumentos sobre lo apropiado de determinado diseño, o la interpretación de evidencia en función de teorías anteriores es una parte importante de la ciencia. A su vez, la experiencia de participar en actividades de investigación permite aprender sobre la viabilidad de utilizar uno u otro camino para solucionar una situación.

Otro aspecto importante que se logra con la investigación es la capacidad para recombinar conocimientos. Generalmente, en la enseñanza, la realidad se segmenta para poder comprenderla y abarcarla mejor. Pero para utilizar los conocimientos sobre una realidad única y comprender fenómenos complejos, es necesario reorganizar y combinar esos conocimientos segmentados. Hoy día, el desarrollo de la tecnología y las soluciones más importantes a problemas complejos surgen de la investigación interdisciplinaria.

Además, la investigación permite el desarrollo de aptitudes intuitivas, permitiendo al individuo ser capaz de utilizar sus conocimientos y experiencias anteriores para intuir respuestas, o, en definitiva, desarrollar hipótesis, es decir, utilizar información anterior para elaborar posibles respuestas a una situación diferente, lo que posibilita su expansión y aplicación en actividades diversas.

### Llevando la investigación al aula de clases

La experiencia de la mayoría de los estudiantes de pregrado en nuestras universidades es que reciben lo que se les brinda. En un curso tras otro, ellos escriben, transcriben, absorben y repiten, como esencialmente se ha hecho por mucho tiempo. Con la integración de la investigación y la enseñanza se busca cambiar la cultura de receptores por una cultura de investigadores y de descubrimiento. Para esto se sugiere la inclusión de metodologías basadas en el descubrimiento en los cursos de pregrado, que permitan el desarrollo de capacidades y habilidades de investigación.

Llevar la investigación directamente al salón de clases, en la forma de discusión directa del contenido de investigaciones no es la manera adecuada, ya que resulta muy difícil porque las estructuras de conocimiento jerárquicas en disciplinas como la ingeniería o ciencias físicas ponen la mayoría de la investigación muy por encima del nivel de pregrado, y las restricciones de los contenidos en cursos tradicionales limitan las oportunidades de introducir material nuevo en los mismos.

La integración de la investigación en los cursos de pregrado puede ser beneficiosa siempre que la investigación ilustre el contenido esencial del curso sin distraer o confundir más que clarificar.

Así, la integración debe ser hecha por la enseñanza en una forma que emule el proceso de investigación y no simplemente describiendo la propia investigación, introduciendo así a los estudiantes de sus clases en el proceso de investigación y desarrollando en ellos importantes capacidades de investigación.

Una estrategia didáctica que se acerca mucho a emular la investigación es la enseñanza inductiva. En este método el estudiante es confrontado con un reto de algún tipo – una pregunta que debe responder, un problema que debe resolver, o un conjunto de observaciones o resultados experimentales que debe explicar – y el aprendizaje tiene lugar en el contexto del intento del estudiante de enfrentar el reto. Variaciones de esta estrategia incluyen el

aprendizaje basado en indagaciones, aprendizaje basado en problemas, y aprendizaje basado en proyectos. Todos estos son métodos inductivos que se pueden adecuar a los cursos particulares.

Además, el conocimiento en investigación de los docentes-investigadores, incluyendo su conocimiento de literatura relevante, familiaridad con estrategias de búsqueda de información, conocimiento de técnicas experimentales modernas, experiencia en supervisar estudiantes investigadores, conciencia de los colegas que están realizando trabajos relacionados en el área o simplemente su familiaridad con el proceso de investigación propiamente, puede, todo esto, traerse al proceso de enseñanza aprendizaje y por lo tanto enriquecer la enseñanza del estudiante en su ambiente de clases. Los estudiantes que reciban este tipo de enseñanza podrán adquirir un entrenamiento excelente en las destrezas requeridas para estudios de posgrado y carreras en investigación. Más importante, ayudará a los estudiantes a desarrollar un pensamiento crítico y habilidades de resolución de problemas que les servirá en cualquier carrera y futuro profesional que sigan. En adición, si a los estudiantes se les enseña inductivamente en sus primeros años de carrera, esto puede inducir a muchos más a buscar experiencias en investigación más tarde en su currículo.

Es importante incorporar actividades orientadas a aprender cómo se genera el conocimiento tanto en las actividades clásicas de enseñanza (clases teóricas, teórico-prácticas y prácticas) como en la enseñanza interactiva. La incorporación de actividades de investigación a la enseñanza puede realizarse en campos muy variados del conocimiento, desde la investigación fundamental, hasta el desarrollo de técnicas y manejos de productos.

Algunas formas, métodos o técnicas que pueden explorarse y que se tienen registros de buenos resultados de su aplicación en la formación de estudiantes son [5], [7]:

- Actividades de evaluación crítica de artículos científicos, lo que contribuye a la formación metodológica del estudiante.
- Realización de monografías que impliquen una actualización bibliográfica profunda, lo que permite el aprendizaje de la búsqueda y manejo de fuentes directas, el análisis crítico de las mismas, y la síntesis de la información obtenida. Esto permite al estudiante sintetizar y relacionar conocimientos, rompiendo con la estructura de los conocimientos clasificados en función de cursos.
- Desarrollo de estrategias de aprendizaje de redacción científica como la presentación o la escritura de artículos con rigor científico, pasando por todo el proceso al que se someten los artículos de investigación, incluyendo la presentación y sustentación del mismo.
- Seminarios experimentales en los que un grupo reducido de estudiantes desarrolla una actividad de investigación completa, desde la revisión bibliográfica hasta la sustentación de los resultados, bajo la guía de un tutor.
- Grupos de estudio, formados por estudiantes que se preparan para la investigación bajo la dirección de un docente o investigador, desarrollando actividades básicas de investigación o proyectos de aplicación.
- Realización de un trabajo final para graduarse, que puede ser una tesis o una pasantía. En estas actividades el estudiante puede

aplicar, en ciertas actividades concretas en un área de interés, gran parte de los conocimientos adquiridos durante su formación anterior. El estudiante debe demostrar capacidades y habilidades para enfrentar situaciones-problemas, y brindar posibles soluciones. Será el responsable último del desarrollo del trabajo, de la implementación de la solución y del análisis de los resultados del mismo.

## Conclusiones y recomendaciones

El desarrollo de la investigación es uno de los principales elementos para lograr los cambios y transformaciones que necesitan los países. Este proceso de gran complejidad por su propia dinámica y naturaleza necesita de presupuestos justos para las universidades y los centros de investigación, además de otras políticas de incentivos motivacionales para que el colectivo docente de las universidades o centros de saberes logre insertar docentes en todas sus categorías.

La formación para la investigación es un proceso continuo de acciones orientadas a favorecer la apropiación y desarrollo de los conocimientos, habilidades y actitudes necesarias para que los docentes puedan desempeñar con éxito actividades productivas asociadas a la investigación científica, el desarrollo científico - tecnológico y la innovación, ya sea en el sector académico o en el productivo.

Dentro de este marco, la investigación en las Instituciones de Educación Superior, debe constituir el centro esencial para la formación de los profesionales en todos los campos del saber, ya no se concibe un profesor universitario dedicado sólo a la docencia o a la transmisión de conocimientos, se requiere de docentes activos que investiguen y conviertan sus estudiantes de oyentes pasivos en co-investigadores activos, integrando así la docencia y la investigación.

De tal manera que, renovar el aprendizaje y la enseñanza, también depende de cómo se transmite el conocimiento y es evidente que ningún sistema de educación superior puede cumplir su misión y ser un aliado viable para la sociedad en general, si parte de su equipo docente y de sus entidades organizativas no realizan investigación, de acuerdo a las metas institucionales particulares, el potencial académico y los recursos materiales.

Actualmente en Panamá, particularmente en la Universidad Tecnológica de Panamá, se están haciendo importantes esfuerzos por impulsar la investigación, pero está claro que aún hay mucho por hacer si las universidades esperan fomentar y apoyar una fuerte vinculación entre la investigación y la educación de pregrado. Las siguientes medidas pueden llevar a las universidades en esta dirección [5]:

- Reconocer formalmente y recompensar a los docentes-investigadores quienes integren exitosamente su enseñanza e investigación, como se hace, por ejemplo, en el Sistema Nacional de Investigación de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá.
- Establecer programas de desarrollo para los docentes-investigadores tanto en enseñanza como investigación, incluyendo formas para integrar los dos dominios. Un ejemplo de esto, son

los programas UTP-innova y UTP-investiga de la Universidad Tecnológica de Panamá.

- Promover la participación en investigación de un mayor espectro de estudiantes de pregrado, y asegurarse que hay un contacto significativo entre los estudiantes investigadores y sus asesores o consejeros y las fuentes de financiamiento.
- Reconocer y recompensar el desempeño y la productividad de los docentes-investigadores en todos los tipos de investigación sugeridos y aplicar los mismos estándares de desempeño a todos.
- Motivar a los docentes-investigadores a utilizar métodos de enseñanza inductivos (por ej., basados en problemas, en proyectos o en indagación); proveer programas de desarrollo que preparen a los docentes-investigadores en el uso efectivo de estos métodos; y evaluar la efectividad de los métodos para integrar investigación y enseñanza.
- A nivel institucional, reconocer y recompensar a los programas y departamentos que adopten algunos o todos de las medidas indicadas.
- A nivel nacional, las agencias de financiamiento gubernamental o filantrópico deberían estipular, en los criterios de evaluación de propuestas que un subconjunto de los proyectos financiados debe tener impactos medibles en la educación de pregrado.

Creemos que la investigación tiene un alto potencial para contribuir significativamente en la calidad de la educación de pregrado y que las universidades tienen la obligación de fortalecer la integración de la investigación y la enseñanza.

La investigación, más que un compromiso, debe ser algo intrínseco del ser de todo docente universitario.

## Referencias

- [1] Manual de Frascati *Propuesta de Norma Práctica para Encuestas de Investigación y Desarrollo Experimental*. OCDE–Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos. Editorial Fundación española ciencia y tecnología, 2002.
- [2] E. L. Boyer, *Scholarship Reconsidered: Priorities of the Professoriate*, Princeton, NJ: Carnegie Foundation for the Advancement of Teaching, 1990.
- [3] C. Glassick, M. Taylor, G. Maeroff, *Scholarship Assessed-Evaluation of the Professoriate, An Ernst Boyer Project of The Carnegie Foundation for the Advancement of Teaching*, Jossey-Bass – a Wiley imprint, U.S.A., 1997.
- [4] Laursen, Hunter, Seymour, Thiry and Melton, *Undergraduate Research in the Sciences: Engaging Students in Real Science*, Jossey-Bass. 2010
- [5] M. Prince, R. Felder, R. Brent, "Does Faculty Research Improve Undergraduate Teaching? An analysis of Existing and Potential Synergies", *Journal of Engineering Education*, pp. 283 – 294, Oct. 2007.
- [6] K. Feldman, "Research Productivity and Scholarly Accomplishment of College Teachers as Related to Their Instructional Effectiveness: A Review and Exploration", *Research in Higher Education*, Vol. 26, 1987, pp. 227 – 298.
- [7] R. Ungerfeld, *La investigación como soporte de actividades de enseñanza universitaria*, Revista digital de educación y nuevas tecnologías, Contexto educativo, Número 30 año V.
- [8] J. Rowley, *Developing constructive tension between teaching and research*. *International Journal of Educational Management* 10:6-10, 1996.
- [9] A. Hunter, S. Laursen, E. Seymour, *Becoming a Scientist: The Role of Undergraduate Research in Students' Cognitive, Personal, and Professional Development*, *Science Education*, v91 n1 p36-74 Jan 2007, John Wiley & Sons, Inc.



# Entrevista con el Dr. Mehrdad Ehsani

**Ronald Y. Barazarte**

Facultad de Ingeniería Eléctrica  
Universidad Tecnológica de Panamá  
ronald.barazarte@utp.ac.pa

**E**l Dr. Mehrdad Ehsani es profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica, director del Laboratorio de Electrónica de Potencia y Sistemas de Propulsión Eléctrica y director del Programa de Energía Sostenible e Ingeniería Vehicular en la Universidad de Texas A&M. En el mes de junio del 2012, el Dr. Ehsani estuvo en la Ciudad de Panamá participando en el proyecto “Estudio de Alternativas Energéticas Sostenibles para Panamá” y aprovechamos esta oportunidad para entrevistarlo.



### **Háblenos de los inicios de su programa de investigación y los retos que enfrentó como nuevo miembro de la comunidad académica.**

Empecé con alguna experticia, proveniente de lo aprendido durante mi investigación doctoral y mi experiencia laboral previa. Me propuse utilizar ese conocimiento como una base para encontrar el servicio más valioso que pudiese dar a la sociedad. Sin embargo, nunca sentí que era necesario amarrarme a aquello que ya conocía o en lo que era bueno, por el contrario, sentía que mi experiencia demostraba que podía trabajar al más alto nivel. Entonces me puse a buscar las mejores oportunidades para aplicar mis talentos donde fueran más útiles, donde brindaran máximo servicio y crearan máximo valor.

Establecer una reputación también fue importante. Para eso, haber culminado un doctorado de una buena universidad y tener buenos antecedentes fueron un buen inicio. En ese momento me dediqué a salir a buscar otros colegas de muy alto nivel que pudiera involucrar con mi programa. Al hacer esto, hay que involucrarlos en proyectos interesantes con la institución para la que trabajas, esa es la forma de establecer credibilidad. Es importante recordar que el proyecto, aunque esté lejos de tu objetivo central, no debe distraerte de él. En general, sólo hay que ser sincero y no darse por vencido.

### **¿Cuál ha sido la experiencia que más ha influenciado en su carrera como investigador?**

Ninguna en especial, no puedo pensar en ninguna experiencia que realmente haya alterado mi vida. Desde una edad temprana he sido un visionario. Desde mi infancia me veía a mí mismo como un futuro líder de la tecnología. Lo único que sabía era que quería hacer grandes cosas en favor de la tecnología, y hacerlas donde realmente

importara. El resto ha sido el camino a hacerlo. La mayor parte del tiempo ha sido difícil, pero el éxito consiste en una larga cadena de fracasos a veces interrumpidos por logros.

Yo no iba a esperar que nada pasara, preferí empujar y esperar a que la resistencia a mi avance cediera. La misma gente que se te opone te enseñará a tener éxito y a superarlos, pero uno debe ser muy sensitivo a esas señales. Sin embargo, siempre están allí. Por otro lado, nunca he conocido a nadie en una posición de poder que yo crea que no pueda alcanzar. Es importante reconocer, los motivos que los han llevado donde están. Pero si ellos llegaron allí, tu también puedes.

De hecho, a veces debo de ser muy cuidadoso con lo que deseo, pues una vez que lo hago sé que lo conseguiré. Lo importante es mantener las prioridades claras. Si te planteas metas realistas, pero nobles, de seguro las alcanzarás. Si deseas algo, no debes pensar en qué difícil o que doloroso puede resultar llegar allá, simplemente debes hacerlo. Es importante recordar que la buena suerte siempre llega para la mente preparada.

### **¿Ha tenido experiencia previa de colaboración científica con Latinoamérica? Háblenos de ella.**

Sí, he trabajado con Brasil, México y ahora con Panamá. Pero mi primer contacto fue con la Universidad Técnica de Guayaquil. Lo disfruté muchísimo, en general disfruto mucho interactuar con personas alrededor del mundo. Para mí son como primos lejanos, siempre he escuchado de ellos, pero nunca los había conocido.

Lo que vi con el caso de Ecuador y otros lugares en Latinoamérica es que miraban a la tecnología de la manera equivocada. La miraban como que tuviese que ser un problema complicado, o que tuviese que ser resuelto de la forma más difícil para que valga la pena hacerlo. No se dan cuenta que la tecnología es sobre crear valor. Esto puede ser porque están lejos de donde se fabrican los productos basados en tecnología. Y, entre más lejos estás de la industria, más tiendes a pensar que la tecnología es alguna forma de arte intelectual. Esto es algo que reduce su capacidad de crecer académicamente y de beneficiar a su país y a ellos mismos.

Para mí, si resuelves un problema simple y creas mucho valor, eres mucho más listo que aquel que resuelve un problema muy difícil pero que no crea ningún valor. En otras palabras, es resolver los problemas que importan, no solamente los problemas que otros no pueden resolver.

Amo Latinoamérica porque es la extensión natural del lugar en el que trabajo, Texas. Sin embargo debo decir que en general disfruto trabajar donde se pueda generar cambios importantes. No disfruto tanto trabajar con Europa o Japón, pero trabajar con China, Turquía y países africanos y latinoamericanos es lo que más disfruto.

### **¿Planea algunos proyectos de colaboración con Panamá? Háblenos de ellos.**

Sí, de los muchos países que conozco, creo que Panamá tiene características únicas que lo hacen un país con un potencial muy interesante para proyectos. Es lo suficientemente pequeño para que los problemas puedan ser manejables, tiene una posición geográfica privilegiada y su gente es única, en el sentido que entienden

democracia e igualdad y tienen todas las condiciones iniciales para convertirse en una sociedad altamente ilustrada. No va a ser fácil, pero al menos no hay grandes restricciones culturales que eliminar.

Específicamente en energía, creo que Panamá puede convertirse en una vitrina para el mundo, en términos de producción de energía limpia, abundante y a costo mínimo. Al hacer eso, el desarrollo económico y cultural procede inmediatamente. La energía es el impulsor y en ningún lugar del mundo he visto que las posibilidades sean mejores.

### **¿Qué recomendación haría a las autoridades panameñas en cuanto a la promoción de la investigación y su uso como herramienta de desarrollo?**

Honestamente creo que la forma en la que estimulas a que algo suceda, es que lo nutres abundantemente, de la manera en la que crías a un hijo. Este país debe hacer eso para sus mentes jóvenes brillantes. No se pueden equivocar en ser generosos en términos de fondos y condiciones adecuadas para los investigadores jóvenes, ya que eventualmente al menos algunos de ellos se desarrollarán plenamente en investigadores de nivel internacional. Y es este tipo de investigación la que estimula el desarrollo de un país.

### **¿Cuál considera usted que es el reto tecnológico más importante al que nos enfrentamos?**

Definitivamente es el acceso equitativo a los recursos, especialmente a aquellos necesarios para alcanzar un nivel aceptable de desarrollo, alrededor del mundo. Hoy en día hay algunos que tienen recursos suficientes y en exceso para satisfacer sus necesidades y vivir cómodamente dentro de los más altos estándares de desarrollo. Pero también hay otros que no son capaces de satisfacer sus necesidades mínimas, no tienen lo necesario y no tienen medios para alcanzarlo. Eliminar esa disparidad es el mayor reto de la humanidad.

Aunque el problema tiene un componente humano importante, yo tengo que ayudar con lo que conozco, y eso es tecnología. Basado en esto, veo a la energía en el centro del problema. La energía puede propiciar condiciones para mejor educación, salud, productividad y otras cosas que forman parte de ese nivel de desarrollo requerido para alcanzar un nivel digno de vida. Por lo tanto, en los países en vías de desarrollo, siento que se deben direccionar todos los recursos que sean posibles, a resolver el problema energético. La energía es el centro de la sociedad moderna y si deseas desarrollarte, tienes que tener energía.

### **¿Cuál es el enfoque principal de su investigación actualmente?**

Siempre he estado interesado en energía. Todo en lo que he trabajado durante los últimos 40 años está relacionado a energía y

constituye mi herramienta para estudiar el problema hoy. Al principio trabajaba en problemas aislados relacionados a energía: electrónica de potencia y sus aplicaciones, sistemas de propulsión eléctrica, máquinas eléctricas, tecnologías vehiculares avanzadas, energías renovables, etc. Hoy en día, puedo trabajar en el problema más amplio de energía y su sostenibilidad. Como ya he trabajado en tecnologías específicas, ya conozco los detalles y ahora voy a concentrarme en el panorama general del problema.

### **En su opinión, ¿qué es sostenibilidad?**

La respuesta corta es: no sé. Sin embargo, lo que sí sé es que la sostenibilidad está menos relacionada al planeta que a las personas. No es un problema sobre cómo mantener el planeta limpio o la vegetación o en general mantener el planeta como está, principalmente porque al planeta no le interesa; él es sostenible con o sin nosotros. Es un problema sobre cómo mantener a la gente sostenible y asegurar su supervivencia en este planeta.

Como el problema es de sostenibilidad humana y no planetaria, importantes aspectos del comportamiento humano entran en juego. Por ejemplo, una persona que no tiene nada que comer, no está interesada en si los niveles del mar están subiendo o si la contaminación se está incrementando. Entonces el reto es crear un tejido uniforme de todas las personas del planeta, cada uno con sus propios intereses, pero que ese tejido sobreviva. No es un problema material. No tiene ningún sentido resolver el problema de producción de dióxido de carbono de los Estados Unidos, porque ellos son solamente un 5% de la población mundial. Los problemas del 95% restante de la población son los que importan. El problema de cómo pueden ellos alcanzar el desarrollo.

### **¿Cómo cree que Panamá puede desarrollar un futuro energético sostenible?**

Varias cosas son importantes para lograr este objetivo. Primero, desarrollar al máximo sus abundantes recursos hidráulicos, mediante generación hidroeléctrica. Combinar esto con el desarrollo de energía solar, en la forma de generación eólica, para compensar la variabilidad del recurso hidroeléctrico. Y, en general, electrificación de la sociedad, desde los usos más convencionales a aquellos usos más avanzados, incluyendo usos residenciales, transporte masivo electrificado y el desarrollo de recursos electrónicos basados en energías limpias o "clean cloud".

La solución es un "Panamá eléctrico" con un sistema de potencia híbrido hidroeléctrico-eólico. Esa sería la llave para un desarrollo cultural, económico y tecnológico acelerado de este país y su prominencia internacional como modelo de sostenibilidad.



# Comparación de sistemas de comunicación inalámbrica para robots móviles

Leonardo E. Fields M.  
 Universidad Tecnológica de Panamá  
 leonardo.fields@utp.ac.pa

**Resumen:** Los robots móviles ofrecen nuevas soluciones a problemas críticos y también cotidianos como búsqueda y rescate, exploración, mapeo, limpieza y transporte. En muchos de estos problemas es posible incrementar el impacto de los robots móviles si estos son capaces de comunicarse y realizar dichas tareas como un equipo, de forma coordinada. Este artículo provee una visión comparativa sobre algunos de los distintos sistemas de comunicación actuales que hacen posible la interacción entre robots móviles.

**Palabras claves:** comunicación inalámbrica, robótica.

**Title:** Comparison of Wireless Communication Systems for Mobile Robots.

**Abstract:** Mobile robots provide new solutions to critical and everyday problems such as search and rescue, exploration, mapping, cleaning and transportation. In many of these areas, it is possible to increase the impact of mobile robots if they are able to communicate and perform tasks as a team, in a coordinated manner. This article provides a comparative overview of some of the current communication systems that make possible the interaction among mobile robots.

**Keywords:** robotics, wireless communications.

## 1. Introducción

La comunicación entre robots móviles presenta un desafío a los sistemas de comunicación actuales. Debido a las limitantes que presenta la comunicación cableada en cuanto a la movilidad del robot y los recursos necesarios, la comunicación inalámbrica para estos casos se vuelve necesaria. Entre los sistemas de comunicación en esta línea se tienen:

- Comunicación por radiofrecuencia
- Comunicación ultrasónica
- Comunicación láser

Cada uno de estos sistemas tiene bondades y limitantes propias de las características del canal, pero todos han demostrado su viabilidad en distintas situaciones. Independientemente del tipo de canal empleado se encuentran los paradigmas de comunicación, los cuales determinan la forma en que los robots utilizarán el canal para comunicarse entre sí. Algunos de estos paradigmas serán abordados durante el desarrollo de este artículo.

Los robots móviles requieren, para sus operaciones más típicas, comunicación en tiempo real, que se refiere a la transmisión de información con un margen de velocidad dentro de límites de tolerancia previamente establecidos. Algunos sistemas requieren que esta medida sea inferior a los nanosegundos, otros sistemas toleran incluso segundos.

## 2. Sistemas de comunicación

A continuación examinamos en detalle algunos de los sistemas de comunicación entre robots.

### 2.1. Comunicación por radiofrecuencia

La comunicación por ondas de radio es la más común en cuanto a tecnología inalámbrica se refiere. Para que este tipo de comunicación se dé, es necesario establecer algunas normas entre el emisor y el receptor tales como: la frecuencia de onda que se usará y el sistema de codificación/decodificación empleado para la conversión analógica/digital. Actualmente, la banda de 2.4 GHz se utiliza comúnmente para sistemas locales de comunicación.

Un problema característico del canal de radio es la distancia que puede alcanzar una frecuencia. Los robots móviles son además especialmente vulnerables al costo energético de emitir una señal, ya que por lo general, estos disponen de una cantidad de energía muy limitada para sus operaciones.

Cuando se establece la comunicación, es necesario que los paquetes de información enviados (igual que en las redes de comunicación convencionales) tengan alguna forma de identificar al receptor designado, ya que la información que viaja por el canal está disponible para todos los que puedan recibirla. Para resolver este problema es posible implementar un sistema de encriptación que compartan el emisor y el receptor.

Además, el ruido en este tipo de canal es generado por interferencia electromagnética, la cual está constantemente presente en entornos urbanos. Para abordar el problema del ruido en este tipo de canales, existen actualmente muchos sistemas de codificación. En un sistema de comunicación unidireccional, donde un emisor controla uno o varios robots sin recibir ningún tipo de retroalimentación, es posible utilizar un sistema de codificación bloque-a-bloque, ya que la cantidad de mensajes distintos que necesita el robot para operar es muy baja. Pero si se desea comunicar a los robots entre sí, y que los mismos intercambien información compleja sobre su entorno, se requerirá otro tipo de codificación, ya que esto no admite márgenes de error como los tolerados por la codificación bloque-a-bloque.

Otro problema en este sistema de comunicación son los obstáculos físicos que tienden a atenuar el alcance de la señal enviada.

Todos estos factores hacen que la diferencia entre los bits de datos recibidos y los bits de información contenidos sea considerablemente alta.

Podría pensarse en la comunicación por radio para robots móviles como el "peor caso" para las comunicaciones por radio.

A pesar de todo, por la naturaleza del canal, se sabe que es posible lograr una comunicación fiable, aunque sea necesario sacrificar velocidad en la transmisión de la información, un retraso aceptable para la mayoría de los casos.

### 2.2. Comunicación ultrasónica

En algunas situaciones, la comunicación por radio puede volverse virtualmente imposible por cuestiones de seguridad o de interferencia. En estos casos es posible emplear la comunicación ultrasónica.

La necesidad de comunicación acústica surge en principio por la poca efectividad de las ondas electromagnéticas bajo el agua y por el hecho de que las ondas sonoras viajan más lejos y más rápido en ese medio.

En el aire, las ondas sonoras no viajan tan rápido ni tan lejos como bajo el agua, pero aún así es posible utilizarlas para transmitir

información. Algunas investigaciones en esta línea sugieren que con equipos de bajo costo es posible alcanzar distancias de 25 metros [1].

Debido a sus similitudes con las comunicaciones por radio, podría ser útil aplicar algunos conceptos de codificación de canal establecidos por Shannon tales como el uso de señales antipodas y ortogonales para compensar el ruido acústico (el cual es virtualmente imposible ignorar). Algunas ventajas de este sistema son:

- La posibilidad de los sistemas modernos de identificar primero las propiedades del ruido ambiental tales como frecuencia, amplitud y textura; lo que le permitiría emitir señales que puedan diferenciarse fácilmente del ruido.
- La posibilidad de los sistemas de identificar patrones en una señal, lo cual también puede contribuir a aislar el ruido.

La comunicación acústica no es invulnerable a obstáculos físicos entre el emisor y el receptor, pero debido a que las ondas sonoras rebotan en la mayoría de las superficies, la comunicación es posible.

### 2.3. Comunicación láser

El rayo láser es un haz de fotones. A diferencia de otros haces de luz, el láser puede ser enfocado en puntos de tamaño muy reducido, lo que le permite conservar su intensidad a mayores distancias. Esta característica lo hace útil en comunicaciones. Actualmente la aplicación más prometedora del láser se encuentra en comunicaciones espaciales. Sin embargo, es posible utilizarlo en comunicaciones terrestres.

Un sistema de comunicación por láser requiere alinear manual o automáticamente al emisor y receptor, lo cual puede lograrse captando coordenadas con un GPS o visión artificial. Este sistema no está sujeto a las interferencias de las ondas sonoras ni electromagnéticas, pero existen otras fuentes de ruido que pueden afectarle tales como el aire caliente, lluvia, niebla, aves y otras fuentes de luz.

Estos problemas pueden ser resueltos, en parte, con el uso de filtros, intensificando la potencia del láser e incrementando la redundancia en la señal. La mayoría de los sistemas de comunicación láser al aire libre operan en la banda de clase 3B (hasta 500 mW) [2].

Una de las posibles aproximaciones para transmitir datos binarios puede ser la siguiente: si el emisor no recibe luz, se interpreta como un cero; si recibe luz, es un 1. Pero este método resulta poco fiable si el ruido es provocado por lluvia o por un ave.

Otra forma de interpretar la señal puede estar sujeta a su intensidad y no a un estado apagado / encendido.

En condiciones ideales, estos sistemas pueden alcanzar grandes velocidades lo que los hace útiles para transmitir audio y video, además de ofrecer mayor seguridad por la dificultad que presenta interceptar la señal.

### 2.4. Sistemas híbridos

Para hacer una red móvil de comunicación más eficiente se puede recurrir a combinar múltiples sistemas de comunicación.

De forma similar a la que se construyen topologías de red para LAN, es posible asignar a los robots distintas tareas con el objetivo de mantener abierto un canal en todo momento. Algunos de los robots (nodos) de la red podrían dedicarse exclusivamente a servir de puente de comunicación con otros equipos de robots distantes usando distintos sistemas de comunicación dependiendo de las condiciones ambientales como se ilustra a continuación.

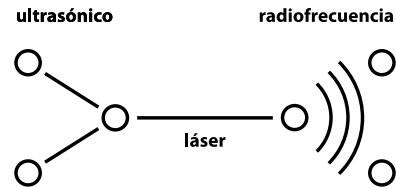


Figura 1. Los sistemas de comunicación híbridos para robots móviles les permiten a los mismos adaptarse a su entorno.

### 3. Redes Ad Hoc

Los equipos de robots móviles deben enfrentarse con frecuencia a un entorno desconocido, hostil y cambiante; con todo tipo de obstáculos (físicos y en los canales de comunicación). La comunicación centralizada y estática resulta ineficiente en estas circunstancias debido a la gran cantidad de energía necesaria para que cada robot pueda comunicarse con el nodo base. Adicionalmente, una falla en el nodo base podría deshabilitar toda la red.

Independientemente del tipo de canal empleado, las redes ad hoc podrían ayudar a resolver estos problema.

En una red ad hoc para comunicaciones entre robots, ninguna unidad conoce la red completa, sino sólo a sus vecinos inmediatos, como puede observarse en la Figura 2. La información tendrá que pasar por varios nodos antes de llegar a su destino. Para transmitir información cada robot tendrá que actuar como un router y valerse de protocolos de enrutamiento dinámicos.

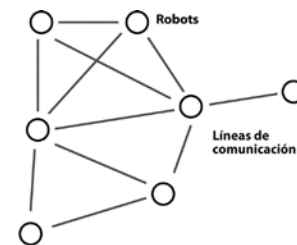


Figura 2. En las redes Ad Hoc, cada nodo sólo conoce a sus vecinos cercanos.

La información tendrá que pasar por varios nodos antes de llegar a su destino. Para transmitir información cada robot tendrá que actuar como un router y valerse de protocolos de enrutamiento dinámicos.

Para esta tarea algunos autores sugieren el uso de protocolos reactivos, los cuales actualizan las tablas de enrutamiento sólo cuando es necesario [3].

### 4. Ahorro de energía

Por las limitantes tecnológicas actuales, la energía de la cual dispone un robot móvil para su funcionamiento, el cual incluye traslación, comunicación y detección, es muy limitada. Esto hace necesario el desarrollo de protocolos "energéticamente sostenibles".

Mantener abierto un canal de comunicación implica un consumo considerable de energía. Existen protocolos que buscan solucionar este problema tales como [3]:

- PAMAS (Power-Aware Routing in Mobile Ad hoc networks).
- TDMA (Time-Division Media Access).



## 5. Transmisión de energía

Los canales de comunicación también pueden ser usados para transmitir energía. La transmisión de energía entre robots móviles puede ayudar a resolver el serio problema que representa la energía limitada con la que cuentan los robots móviles para sus operaciones. Es posible, por ejemplo, utilizar un haz láser para transmitir energía a un receptor similar a una celda solar [4].

Utilizando la misma filosofía de las redes ad hoc, una red de robots móviles puede ser alimentada completa o parcialmente si se dispone de una fuente de energía abundante y preferiblemente móvil, y de emisores y receptores en cada nodo de la red, como se observa en la Figura 3.

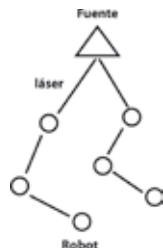


Figura 3. Sistema de alimentación inalámbrica por láser usando una fuente.

Este método permitiría a los robots operar indefinidamente siempre que exista un camino entre la fuente de energía y el robot solicitante, que viaje a través de los nodos de la red.

Implementar un sistema de recepción y transmisión de energía en cada robot de la red puede volverse costoso. Otra solución al problema consiste en utilizar algunos robots como terminales que puedan transmitir y recibir energía, y al resto de los robots de la red sólo como receptores, como es el caso de la Figura 4.

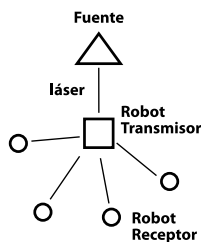


Figura 4. Sistema de alimentación inalámbrica por láser usando una fuente y un nodo transmisor.

Otro canal que posibilita la transmisión de energía son las microondas. Pero tanto éste como el láser tienen algunos inconvenientes tales como:

- Absorción atmosférica.
  - Baja eficiencia en la conversión de energía lumínica a eléctrica.
- Aún con estas desventajas, la posibilidad de transmitir datos y energía por el mismo canal abre un abanico de posibilidades para la supervivencia a largo plazo de las redes de robots móviles.

## 6. Inteligencia artificial y uso del canal

Controlar un robot a distancia es una operación que consume mucha energía y recursos, pues requiere de transmisión en tiempo

real de los comandos y de retroalimentación por parte del robot. Es por eso que se busca que los robots sean lo más autónomos posibles. Líneas de investigación como visión artificial permiten a los robots distinguir objetos y planificar rutas mediante el uso de técnicas como las redes neuronales (para memorizar patrones en las imágenes).

Muchas aplicaciones con robots móviles requieren que los nodos hagan un recorrido de cierta zona geográfica, encuentren objetos, detecten obstáculos y busquen mejores rutas. Esta información permite a los nodos distribuir su trabajo y evitar redundancias. Transmitir esta información de forma eficiente es importante para evitar la sobrecarga del canal y un consumo innecesario de energía.

## 7. Conclusiones

En la comunicación por radiofrecuencia, las técnicas de transmisión y los sistemas de compresión y corrección de errores actuales hacen de este canal una opción viable en la mayoría de los casos.

La comunicación por láser se impone en comunicaciones a larga distancia y destaca por su velocidad de transmisión pero requiere de condiciones atmosféricas favorables y línea de visión directa entre emisor y receptor.

La comunicación ultrasónica es una alternativa eficiente y de bajo costo para reemplazar a la comunicación por radiofrecuencia donde la interferencia electromagnética impide usar este canal, o a la comunicación láser, donde una línea de visión directa no es posible. Sin embargo, la comunicación ultrasónica tiene poco alcance en el aire, su mayor aplicación se encuentra en comunicaciones subacuáticas.

Al usar cualquiera de estos sistemas se debe prestar atención a los protocolos de comunicación que se estarán usando dentro de la red, donde se hace necesario lograr un balance entre velocidad y ahorro de energía.

Las redes de robots móviles pueden valerse de estos y otros sistemas de comunicación, ya sea utilizando uno de ellos o combinándolos, para desplegar un equipo de trabajo coordinado capaz de realizar tareas eficientemente.

Existen aún muchos problemas por resolver en este campo, pero las posibilidades que ofrece han despertado un interés que está lejos de terminar.

## Referencias

- [1] S. Justin, "Designing an Ultrasonic Modem for Robotic Communications", US Army Research Laboratory, 2009.
- [2] K.K. Sharma, "Wireless Laser communication link using array sensor and GPS/electronic compass based aligner", CO2 Laser Division, Laser Science and Technology Center, Defence R&D Organisation, Metcalfe House, Delhi, India.
- [3] W. Zhigang, L. Lichuan and Z. MengChu, "Protocols and Applications of Ad-hoc Robot Wireless Communication Networks: An Overview", International Journal of Intelligent Control and Systems, VOL. 10, No. 4, pag. 296-303, Dec. 2005.
- [4] Summerer Leopold, Oisín Purcell, "Concepts for wireless energy transmission via laser", ESA -Advanced Concepts Team, The Netherlands, 2009.
- [5] G. Andrea, Wireless Communications, Stanford University, Cambridge University Press, 2005.
- [6] W. Alan, "Distributed Sensing and Data Collection via Broken Ad Hoc Wireless Connected Networks of Mobile Robots", Intelligent Autonomous Systems (Engineering) Laboratory, University of the West of England Bristol.
- [7] B. Tucker and A. Ronald, "Communication in Reactive Multiagent Robotic Systems", Mobile Robot Laboratory, College of Computing, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1994.

# Sistemas de transmisión flexible en corriente alterna

**Francisco D. Pérez A.**

Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria  
Universidad Tecnológica de Panamá  
francisco.perez@utp.ac.pa

**Resumen:** *en el presente trabajo se describe, a grandes rasgos, qué son los Sistemas de Transmisión Flexibles en Corriente Alterna, mejor conocidos como dispositivos FACTS. Se hace una descripción de sus usos y aplicaciones en el sistema eléctrico de potencia, especialmente en el área de transmisión de energía eléctrica. Adicionalmente, se presenta una clasificación de estos dispositivos según su tipo de conexión y según su aplicación en la red eléctrica de potencia.*

**Palabras claves:** *compensador estático, FACTS, Flujo de Potencia, SVC, TCSC, UPFC.*

**Title:** *Flexible Alternating Current Transmission Systems.*

**Abstract:** *The present work describes Flexible Alternating Current Transmission Systems, better known as FACTS devices. Their use and application in electric power systems are discussed, especially in the area of electric energy transmission. Additionally, a classification of these devices is presented according to the type of connection and application in electric power networks.*

**Keywords:** *FACTS, power flow, static compensator, SVC, TCSC, UPFC.*

## 1. Introducción

El uso de la tecnología de dispositivos FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) ha tenido un gran auge en los últimos años dado el actual escenario del sector eléctrico, que se presenta en un constante proceso de desregulación buscando crear un mercado realmente competitivo.

Lo anterior ha llevado a los sistemas eléctricos a realizar funciones para los que no estaban originalmente diseñados, es decir, ya no sólo se requiere que los generadores muy distantes giren en sincronismo y transmitan la energía en forma coordinada respetando los límites físicos impuestos por la red, sino que la operación debe ser llevada a cabo de forma que se mantenga y se mejore la seguridad de los sistemas de potencia durante y después del proceso de desregulación de las empresas.

En los últimos años, se ha dificultado la transmisión de la energía eléctrica debido a que existen cada vez restricciones más severas para el uso de derecho de vía.

Adicionalmente a esto, se deben construir líneas de gran longitud en ciertos casos, lo que introduce problemas de transporte de potencia a gran distancia, de estabilidad dinámica y de voltaje y de controlabilidad del flujo.

Otra motivación para el acelerado uso de los FACTS es el ambiente competitivo entre las empresas eléctricas, ya que el potencial de esta tecnología se basa en la posibilidad de controlar la ruta de flujo de potencia y la habilidad de conectar redes que no estén adecuadamente interconectadas, dando la posibilidad de comercializar energía entre agentes distantes donde antes no era posible.

No obstante, el uso masivo de los FACTS no ha rendido sus frutos debido a las restricciones de seguridad, disponibilidad y costo de los componentes.

## 2. ¿Qué son los FACTS?

Los sistemas de transmisión y distribución de las empresas eléctricas han comenzado un período de cambio, debido principalmente a la aplicación de la electrónica de potencia, microprocesadores y comunicaciones en general. Esto los ha llevado a una operación más segura, controlable y eficiente.

En esta área se han llevado a cabo diversas investigaciones, las que han conducido al desarrollo de los FACTS, dispositivos que abarcan al conjunto de equipos con capacidad de controlar el flujo de potencia o variar características de la red, empleando semiconductores de potencia para controlar el flujo de los sistemas de corriente alterna, cuyo propósito es dar flexibilidad a la transmisión de la energía sobre la base de dos objetivos principales:

- Incrementar la capacidad de transferencia de potencia en los sistemas de transmisión.
- Mantener el flujo en las trayectorias de la red para que se establezcan de acuerdo a las distintas condiciones operativas. Esto permite mejorar la eficiencia del sistema debido a:
- Un mayor control sobre el flujo de potencia, dirigiéndolo a través de las rutas predeterminadas.
- La operación con niveles de carga seguros (sin sobrecarga), y cercano a los límites térmicos de las líneas de transmisión.
- Mayor capacidad de transferencia de potencia entre áreas controladas con lo que el margen de reserva en generación puede reducirse considerablemente.
- Prevención de salidas de servicio en cascada, limitando el efecto de fallas en el sistema y equipos.
- El amortiguamiento de las oscilaciones del sistema de potencia, que dañan los equipos y limitan la capacidad de transmisión disponible.

Los sistemas de control de los FACTS están basados en la posibilidad de manejar los parámetros interrelacionados que restringen los sistemas (impedancias serie y paralelo, ángulo de fase, oscilaciones a frecuencias subsíncronas), permitiendo además operar las líneas de transmisión cerca de sus límites térmicos, lo que anteriormente no era posible sin violar las restricciones de seguridad del sistema.

Cada sistema de las empresas posee redes de potencia eléctrica que integran sus centros de generación y cargas, las que a su vez se interconectan con los sistemas vecinos. Esto permite compartir potencia entre las redes de regiones alejadas, con el propósito de aprovechar la diversidad de las cargas, debido a diferencias de clima y horario, disponibilidad de diversas reservas de generación en zonas



geográficas distintas, cambios en precios del combustible y en la regulación, etc.

Para facilitar gran parte de las transferencias de potencia, estas redes interconectadas ayudan a minimizar la necesidad de aumentar las plantas de generación y permiten a empresas y regiones vecinas comprar y vender energía entre ellas. Esto lleva a una operación segura y a más bajo costo.

En los últimos años, la demanda eléctrica ha crecido y seguirá creciendo considerablemente, unido a un aumento en la competencia en el sector generación. La gran dificultad que ha surgido es la adquisición de nuevos “derechos de vía”. Los FACTS pueden aportar en este caso, permitiendo una mejor utilización de las líneas ya existentes, aumentando su capacidad útil por medio de modificaciones de la impedancia y del ángulo de fase.

El flujo de potencia entre dos puntos a través de una línea de transmisión está dado por:

$$P_{ij} = V_i * V_j * \left[ \frac{\sin(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \right] \quad (1)$$

De esta expresión se desprende que la potencia que fluye por una línea no depende de los propietarios, de los contratos ni de los límites térmicos, sino más bien de los parámetros físicos de la red: voltaje en los extremos de la línea ( $V_i, V_j$ ), impedancia de la línea ( $x_{ij}$ ) y ángulos de fase de voltaje y corriente ( $\theta_i, \theta_j$ ) que se presenta al comienzo y al final de cada línea por el camino posible. Esto conlleva la dificultad de transmitir flujos de potencia a través de caminos determinados.

La diferencia entre una ruta directa y la determinada por la red se denomina: “flujo de anillo”, y se caracteriza por una circulación de potencia que disminuye la capacidad disponible de la línea.

Las principales ventajas de los dispositivos FACTS son:

- Permiten bloquear flujos en anillo indeseados. Esto posibilita aumentar la capacidad de las líneas en un 20-40% cuando de otra manera un “cuello de botella” en éstas obligaría a reducir la capacidad de flujo a través de ellas.
- Posibilitan la operación de las líneas a valores cercanos a sus límites térmicos, manteniendo o mejorando la seguridad y confiabilidad en el sistema. Esto permite a las empresas ahorrar dinero mediante la mejor utilización de sus activos (cables y quipos en general) acomodándose al aumento de demanda de energía y potencia por parte de los clientes.
- Facilitan responder rápidamente a los cambios en las condiciones de la red para proveer un control del flujo de potencia en tiempo real, el cual es necesario cuando se produce un gran número de transacciones en un mercado eléctrico completamente desregulado.

### 3. Tipos de FACTS

Existe un gran número de dispositivos FACTS con distintas constituciones, no obstante, su principio de funcionamiento no suele ser complicado y en muchos de ellos se deriva de la simple aplicación de la electrónica a equipos conocidos tradicionalmente. Por ello, se puede dividir a los FACTS en base a su concepción en dos

grandes grupos: FACTS derivados de la aplicación de “conmutadores electrónicos” a equipos tradicionales y FACTS basados en la aplicación de “convertidores”.

En cuanto a sus acciones sobre el sistema se clasifican en: dispositivos de compensación en serie, dispositivos de compensación en paralelo, derivación o “shunt”, y dispositivos desfasadores.

#### 3.1. Compensadores en serie

Podemos encontrar dos tipos de controladores. En primer lugar el control se hace por separado pero de modo coordinado en un sistema de múltiples líneas. O, como se muestra en la figura, el centro de control es unificado y permite entregar la compensación reactiva serie requerida por cada línea, pero también permite el flujo de potencia activa entre las líneas involucradas mediante el DC Power Link. Esta capacidad de controlar el tránsito de potencia activa se conoce como Controlador de Flujo de Potencia Interlíneas que hace posible balancear el flujo de las potencias reactivas y activas en las líneas de transmisión y mediante esto, maximizar la utilización y capacidad de transporte de las mismas.

Como su nombre lo indica, en este grupo se encuentran los controladores que se conectan en serie al elemento específico (una línea de transmisión, por ejemplo) y que pueden ser impedancias variables tales como capacitores o reactores, o una fuente variable construida en base a elementos electrónicos de potencia que entreguen una señal de voltaje a frecuencia primaria, subsíncrona o a las frecuencias armónicas deseadas. Mientras la señal de voltaje esté en cuadratura con la corriente de línea, el controlador consumirá o entregará sólo potencia reactiva. En cualquier otro caso se verá involucrado un manejo de potencia activa.

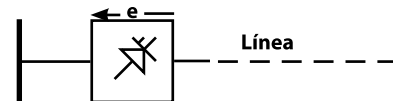


Figura 1. Diagrama equivalente de la compensación serie.

La compensación en serie inserta energía reactiva en la línea de transmisión. Mediante esto se logra acortar virtualmente las líneas. Como consecuencia, el ángulo de transmisión se reduce, y la transferencia de energía se puede aumentar sin la reducción de la estabilidad del sistema.

Dentro de los elementos a que encontramos en este grupo están:

- Compensadores Estáticos Síncronos Serie (SSSC).
- Controlador de Flujo de Potencia Interlíneas (IPFC).
- Capacitor Serie Controlado por Tiristores (TCSC).
- Capacitor Serie Encendido por Tiristores (TSSC).
- Reactor Serie Controlado por Tiristores (TCSR).
- Reactor Serie Encendido por Tiristores (TSSR).

#### 3.2. Compensadores en paralelo

La compensación en paralelo (*shunt*) consiste en suministrar potencia reactiva a la línea, para aumentar la transferencia de potencia activa, manteniendo los niveles de tensión dentro de los

rangos aceptables de seguridad. Tal como los controladores series, los elementos que se pueden conectar son los mismos, y la diferencia es que inyectan señales de corriente al sistema en el punto de conexión. El manejo de potencia activa mediante estos elementos está condicionado por los ángulos de desfase, del mismo modo que los controladores serie.

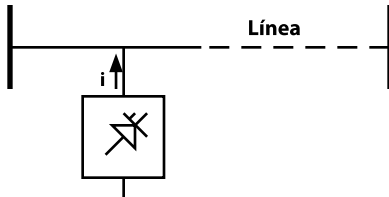


Figura 1.4. Diagrama equivalente de la compensación en paralelo.

En este grupo están:

- Compensadores Estáticos Síncronos (STATCOM).
- Generador Estático Síncrono (SSG).
- Sistema de Almacenaje de Energía en Baterías (BESS).
- Almacenaje de Energía en Superconductores Magnéticos (SMES).
- Compensador Estático de Reactivos (SVC).
- Reactor Controlado por Tiristores (TCR).
- Reactor Encendido por Tiristores (TSR).
- Capacitor Encendido por Tiristores (TSC).
- Generador (o Consumidor) Estático de Reactivos (SVG).
- Sistema Estático de VARs (SVS).
- Resistor de Freno Controlado por Tiristores (TCBR).

### 3.3. Compensadores combinados serie-serie

Podemos encontrar dos tipos de controladores. En primer lugar el control se hace por separado pero de modo coordinado en un sistema de múltiples líneas. O, como se muestra en la figura, el centro de control es unificado y permite entregar la compensación reactiva serie requerida por cada línea, pero también permite el flujo de potencia activa entre las líneas involucradas mediante el DC Power Link. Esta capacidad de controlar el tránsito de potencia activa se conoce como Controlador de Flujo de Potencia Interlíneas hace posible balancear el flujo de las potencias reactivas y activas en las líneas de transmisión y mediante esto, maximizar la utilización y capacidad de transporte de las mismas.

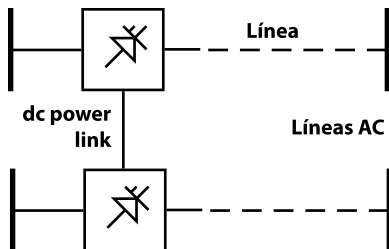


Figura 1.7. Diagrama del controlador unificado de potencia.

### 3.4. Compensadores combinados serie-paralelo

Del mismo modo que la combinación serie-serie, también se pueden operar de dos maneras. La primera mediante una combinación de controladores serie y paralelo controlados coordinadamente como se muestra a continuación:

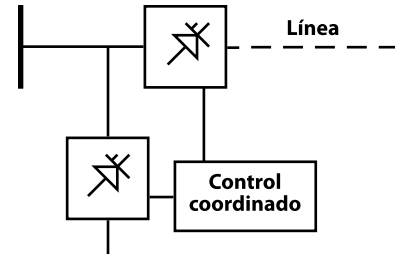


Figura 1.8. Diagrama de la compensación serie-paralelo.

O mediante un Controlador de Flujo de Potencia Unificado, que tal como en el caso anterior, posee la capacidad de agregar transferencia de potencia activa entre líneas si es necesario, mediante el DC Power Link.

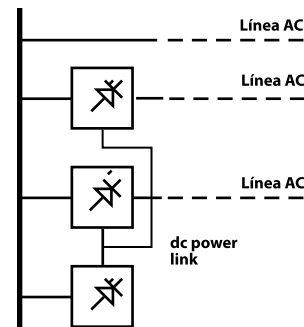


Figura 1.9. Diagrama del controlador unificado de potencia.

Dentro de los controladores serie-paralelo encontramos:

- Controladores de Flujo de Potencia Unificados (UPFC).
- Transformador Cambiador de Fase Controlado por Tiristores (TCPST).
- Regulador de Ángulo de Fase Controlado por Tiristores (TCPAR)
- Controlador de Potencia de Interfase (IPC).

Existen otros controladores que no están en el marco de los grupos descritos y que son los siguientes:

- Limitador de Voltaje Controlado por Tiristores (TCVL), que es un varistor controlado por Tiristores usado para limitar la tensión entre sus terminales durante condiciones transientes.
- Regulador de Voltaje Controlado por Tiristores (TCVR), que corresponde a un transformador controlado por tiristores que puede proveer voltaje variable con control continuo.

### 4. Ventajas

Las ventajas que ofrecen las familias de controladores descritos anteriormente son muchas y de varios tipos, y cada uno de estos elementos presenta una o más de las siguientes características:

- Control del flujo de potencia según se requiera, lo que permite



optimizar las capacidades de las líneas y moverse bajo condiciones de emergencia más adecuadamente.

- Aumentan la capacidad de carga de las líneas hasta su límite térmico, tanto en horizontes de corto plazo como estacionario.
- Aumentan la seguridad del sistema en general a través del aumento del límite de estabilidad transitoria, limitando corrientes de cortocircuitos y sobrecargas, ofreciendo la posibilidad de controlar apagones (blackouts) en cascada y absorbiendo oscilaciones electromecánicas de sistemas de potencia y máquinas eléctricas.
- Proveen conexiones seguras a instalaciones y regiones vecinas al mismo tiempo que reducen las exigencias generales de reservas de generación.
- Entregan mayor flexibilidad en la locación de nuevas unidades generadoras.
- Permiten mejorar los niveles de uso de las líneas.
- Reducen los flujos de potencia reactiva en las líneas de transmisión, y por lo tanto, una mayor capacidad de transporte de potencia activa.
- Reducen los flujos de potencia en anillo (loop flows).
- Incrementan la utilización de la generación de menor costo.

De cualquier modo, éstos controladores permiten la amplia variedad de capacidades descritas anteriormente debido a que el voltaje, corriente, impedancia, potencia activa y reactiva son variables interrelacionadas, por lo que cada controlador tiene múltiples opciones para el control de flujo de potencia, estabilidad, etc. tanto en lazo abierto como cerrado, por lo que las posibilidades son muchas.

### 5. Limitaciones

La gran versatilidad y la amplia gama de prestaciones que un elemento de transmisión flexible introduce a un sistema interconectado o sector cualquiera no son competitivas en precio con las soluciones más tradicionales. Claramente las mayores limitaciones estarán dadas por sus costos, que son comparativamente mayores a lo que podría resultar la instalación de una nueva línea en el caso de requerirse más capacidad de transmisión, por ejemplo. En este caso, los FACTS

trabajan con potencia reactiva lo que les da un rango de manejo menor al que si, por ejemplo, se duplicara una línea de transmisión, ya que aparte de mejorar la capacidad de potencia al doble, reduce la impedancia a la mitad del par transmisor, lo que otorga una mayor flexibilidad, a un precio menor. A medida que la tecnología de la electrónica de potencia se haga más accesible en cuanto a precios se podrán obtener más aplicaciones factibles en un sistema como el nuestro, pero por lo pronto hay que esperar.

### 6. Conclusiones

El término FACTS, aplicado a los sistemas eléctricos, engloba distintas tecnologías que mejoran la seguridad, capacidad y seguridad de las redes existentes de transporte, a la vez que mantienen o mejoran los márgenes operativos necesarios para la estabilidad de la red. Como consecuencia, puede llegar más energía a los consumidores con un impacto mínimo en el medio ambiente, con plazos de ejecución de los proyectos sustancialmente inferiores y con inversiones más reducidas. Todo ello en comparación con la alternativa de construir nuevas líneas de transporte o nuevas plantas generadoras.

Las dos razones principales para incorporar equipos FACTS a los sistemas eléctricos son: elevar los límites de estabilidad dinámica y mejorar el control de flujo de energía.

La mejora del funcionamiento de las redes eléctricas es cada día más importante por razones económicas y medioambientales. Los dispositivos FACTS son la solución mejor establecida en el mercado para mejorar la utilización de las líneas de transmisión.

### Referencias

- [1] N. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System", IEEE, New York, 2000.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [3] P. M. Anderson & A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", IEEE Computer Society Publisher, 1994.
- [4] E. Acha, C.R. Fuente-Esquivel, H. Ambriz-Pérez, C. Ángeles-Camacho, "FACTS, Modelling and Simulation in Power Networks", Jhon Wiley & Sons Ltd 2004.

# Almacenamiento de energía magnética por superconducción

**Guadalupe G. González**

Universidad Tecnológica de Panamá  
 guadalupe.gonzalez@utp.ac.pa

**Resumen:** *en este artículo presentamos una de las tecnologías de almacenamiento de energía actualmente utilizadas en sistemas de potencia, Almacenamiento de Energía por Superconducción. Primero, presentamos una pequeña reseña histórica sobre la superconductividad, sus orígenes y primeras aplicaciones, ya que es la base de este sistema de almacenamiento. Luego, explicamos los principios básicos de su funcionamiento y detallamos sus componentes principales. Finalmente, presentamos su aplicación en sistemas de potencia.*

**Palabras claves:** *almacenamiento de energía, electromagnetismo, sistema de potencia, SMES, superconductor.*

**Title:** *Superconducting Magnetic Energy Storage.*

**Abstract:** *in this article we present one of the energy storage technologies currently used in power systems, Energy Storage by Superconduction. First, we present a small historical review on superconductivity, its origins and first applications, since it is the base of this storage system. Then, we explain the basic principles of operation and detail its main components. Finally, we present its application in power systems.*

**Keywords:** *electromagnetism, energy storage, power system, SMES, superconductor.*

## 1. Introducción

El mundo industrializado gira alrededor de energía. En los últimos años, casi el 90% de la energía primaria en el mundo proviene de derivados del petróleo, ya sea en forma de carbón, petróleo crudo o gas natural [1]. Dado que éstos no son renovables no podemos depender de ellos como fuentes primarias de energía.

En las últimas décadas se han incrementado los esfuerzos para reducir el uso del petróleo a nivel mundial. Hemos visto cómo se han desarrollado los sistemas de energías renovables para generación eléctrica así como la comercialización de vehículos eléctricos, híbridos y de combustible flexible, entre otros; sin embargo, todas estas tecnologías parecen tener un punto débil en común: el sistema de almacenamiento de energía.

En los sistemas de potencia con generación eólica o solar, por ejemplo, la energía se extrae de manera intermitente; ya sea debido

a variaciones en la velocidad del viento o a la presencia de nubes durante el día. Estas fluctuaciones pueden afectar significativamente el sistema de potencia por consiguiente, se necesitan sistemas de almacenamiento capaces de almacenar grandes cantidades de energía que puedan amortiguar dichas fluctuaciones. También, se necesita asegurar la extracción de la energía en cualquier momento que sea posible no sólo cuando la carga lo requiera. Finalmente, se requieren métodos de almacenamiento capaces de satisfacer variaciones en la demanda [2,3].

Para satisfacer las necesidades previamente mencionadas, se han desarrollado diferentes tipos de sistemas de almacenamiento, entre ellos: térmico, químico, electroquímico, de aire comprimido, mecánico con volantes de inercia, bombeo hidroeléctrico, banco de capacitores y por superconducción, siendo esta última el tema de este artículo.

Los sistemas de almacenamiento de energía magnética por superconducción (SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage) fueron diseñados originalmente para satisfacer variaciones en la demanda diurna. Quizás su mejor característica es que es altamente eficiente; se ha estimado que una unidad puede tener un 90% de eficiencia mientras que los sistemas de almacenamiento por bombeo hidroeléctrico, las baterías y las volantes de inercia tienen una eficiencia típica del 60-70% [4].

## 2. Reseña histórica

La superconductividad fue descubierta en 1911 por Heike Kamerlingh Onnes, quien se encontraba estudiando la resistencia del mercurio sólido a temperaturas criogénicas, utilizando helio líquido como refrigerante [5].

Alrededor de los años 60's, científicos americanos, japoneses y europeos realizaron los primeros pasos en la creación de almacenadores de energía magnética por superconducción. Pero no fue hasta 1971, en el Centro de Superconductividad Aplicada de la Universidad de Wisconsin, cuando Peterson y Boom inventaron el sistema de SMES tal y como lo conocemos hoy en día. Después de esto, distintas compañías y centros de investigación han desarrollado y diseñado SMES para su uso en redes eléctricas.

## 3. Almacenamiento de energía magnética por superconducción

Las unidades de almacenamiento de energía magnética por superconducción (SMES) almacenan energía de la misma forma que lo haría un inductor convencional. Ambos, almacenan energía en el campo magnético creado por las corrientes que fluyen a través de un alambre bobinado. La principal diferencia radica en que en el SMES, una corriente directa fluye a través de un alambre superconductor; esto significa que el alambre se encuentra a temperaturas criogénicas y no muestra resistencia conductiva alguna.

El hecho que no exista resistencia óhmica en el alambre implica que no hay disipación térmica, por consiguiente, la energía puede almacenarse en el SMES virtualmente por tiempo indefinido hasta que sea requerida. Dado que la energía es almacenada como corriente circulatoria, puede extraerse de las unidades SMES con una respuesta casi instantánea siendo entregada o almacenada en



periodos que varían de fracciones de segundos a algunas horas [6].

Una unidad típica de almacenamiento de energía por superconducción consta principalmente de: la bobina superconductora, el sistema de refrigeración y la interfaz eléctrica.

### 3.1. Bobina superconductora

Los superconductores son capaces de transportar altos niveles de corrientes en la presencia de altos niveles de campos magnéticos a bajas temperaturas con cero resistencia al flujo de corriente eléctrica, a menos que sus valores críticos: temperatura ( $T_c$ ), densidad de flujo magnético ( $B_c$ ) y densidad de corriente ( $I_c$ ), sean excedidos.

Los materiales que exhiben superconductividad han ido creciendo en número y variedad, pero la cantidad de superconductores utilizados en aplicaciones prácticas y comerciales todavía es limitada, siendo la aleación de Niobio-Titanio (NbTi) la más utilizada en aplicaciones a altos niveles de potencia [5]. En la Tabla 1 podemos ver una lista de superconductores con sus valores críticos de temperatura, densidad magnética y su densidad energética ( $W_m$ ) [7].

Tabla 1. Lista de Superconductores

Superconductor	$T_c$ [K]	$B_c$ [T]	$W_m$ [J/m <sup>3</sup> ]
<b>Metales</b>			
Niobio (Nb)	9.26	0.82	2.68E+05
Tántalo (Ta)	4.48	0.30	3.58E+04
Vanadio (V)	5.03	1	3.98E+05
<b>No-Metales</b>			
C6Ca	11.5	0.95	3.59E+05
Diamante:B	11.4	4	6.37E+06
In2O3	3.30	3	3.58E+06
Si:B	0.40	0.40	6.37E+04
<b>Aleaciones Binarias</b>			
MgB2	39	74	2.18E+09
Nb3Ge	23.2	37	5.45E+08
Nb3Sn	18.3	30	3.58E+08
NbTi	10	15	8.95E+07

El contenido energético en un campo electromagnético es determinado por la corriente que fluye a través de las espiras de una bobina magnética y puede ser calculado con (1).

$$W_m = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1)$$

donde  $W_m$  es la energía almacenada [Joules].  
 $L$  es la inductancia [Henrios].  
 $i$  es la corriente eléctrica [Amperios].

Dado que la densidad de campo magnético en materiales ferromagnéticos no sobrepasa los 3 Teslas, las bobinas utilizadas para almacenar energía magnética por superconducción son usualmente colocadas en aire o al vacío con permeabilidad  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  [H/m].

Para obtener altos valores de energía ( $W_m$ ) con una corriente ( $i$ ) limitada por el superconductor utilizado es necesario incrementar la inductancia; lo cual se puede hacer utilizando la geometría adecuada. Existen tres configuraciones en el diseño de SMES:

- Solenoide sencillo con forma circular.
- Conexión en serie de solenoides coaxiales.
- Toroide de forma circular, ovalado o D comprendido por una serie de espiras conectadas en series. [6]

Cabe señalar que la configuración del inductor afecta la masa total de la estructura del SMES. Inductores con configuración toroidal compuesto por espiras sencillas tienen un campo magnético externo mínimo, lo cual es ideal para no afectar a los sistemas de navegación, la salud de las personas y las líneas de transmisión, pero utilizan aproximadamente el doble de superconductor, mientras que la configuración de solenoide sencillo es superior en términos de energía almacenada por peso.

### 3.2. Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento de un SMES está compuesto por el refrigerador, en donde se prepara el refrigerante y el contenedor criogénico en donde reposa la bobina superconductora para ser refrigerada y aislada térmicamente del medio ambiente (ver Figura.1).

El sistema de enfriamiento utiliza normalmente Helio como refrigerante ya sea como baño de Helio o por circulación forzada. Éste remueve todo el calor que entra al contenedor criogénico y por consiguiente asegura que la temperatura del superconductor no exceda la temperatura crítica. Dado que la planta de refrigeración posee una eficiencia límite, el calor que penetra por las tuberías, los soportes mecánicos y por radiación deben ser tan bajo como sea posible; para asegurar esto, se provee de un enfriamiento intermedio llamado "escudo térmico".

La refrigeración de la bobina y el aislamiento térmico son problemas técnicos de extrema dificultad dado a las bajas temperaturas (alrededor de 1.8 K) que se necesitan para mantener el superconductor trabajando de manera eficiente.

El refrigerador consume energía eléctrica y por consiguiente disminuye la eficiencia del SMES. Un sistema de refrigeración típico requiere aproximadamente 1.5 kW por mega watt-hora de energía almacenada [9].



1. Tubería de Helio
2. Espira superconductora
3. Anillo de refuerzo
4. Cámara de vacío
5. Columna de soporte

Figura 1. Pictórico de una bobina superconductora dentro de un contenedor criogénico de Helio, con capacidad de almacenar 100 MJ de energía.

\*Figura modificada de la versión original [8], traducida al español.

### 3.3. Interfaz eléctrica

La interfaz eléctrica entre el inductor superconductor y el sistema de potencia es un convertidor. El mismo es un rectificador/inversor que cambia la corriente alterna proveniente de la red a la corriente directa que fluye continua en las bobinas. Para cargar o descargar el inductor, el voltaje, a través de las bobinas, se hace positivo o negativo. Cuando la unidad está en reposo, independientemente del nivel de energía almacenado, la corriente se mantiene constante y el voltaje promedio, a través de las bobinas superconductoras, es cero [2].

La configuración típica de un convertidor para esta aplicación comprende dos puentes de tiristores de 6 pulsos, conectados en serie a la bobina superconductor en la parte directa del puente y acoplados, en la parte alterna, al sistema de potencia a través de un transformador.

Las pérdidas correspondientes al convertidor de estado sólido se estiman alrededor del 3 al 8% del total de la energía almacenada [6].

### 4. Almacenadores de energía magnética por superconducción en sistemas de potencia

En la Tabla 2, podemos ver algunos parámetros típicos de un sistema de almacenamiento por superconducción [4]. Los sistemas SMES son capaces de almacenar de 1 MW a 10 MW. La Figura 2 muestra una comparación entre la capacidad de almacenamiento y el tiempo de descarga de distintos sistemas de almacenamiento de energía.

Tabla 2. Parámetros típicos de un SMES

Total de energía almacenada	10000-13000 MWh
Energía disponible	9000-10000 MWh
Tiempo de descarga	5-12 h
Potencia máxima	1000-2500 MW
Corriente máxima	50-300 kA
Densidad de campo máximo	4-6 T
Diámetro medio de la bobina	300 m
Altura total de la bobina	80-100 m
Profundidad media debajo de la superficie	300-400 m
Eficiencia*	85-90 %
Pérdidas en el convertidor	2% de la potencia
Potencia del refrigerador	20-30 MW

\* Asumiendo un ciclo completo de carga/descarga al día.

Dado que los sistemas de almacenamiento de energía magnética por superconducción son altamente eficientes y responden rápidamente a las variaciones de la demanda, pueden ser de gran utilidad a los sistemas de potencia ya que:

- tienen la capacidad de proveer energía al sistema (spinning reserve) si se presenta una pérdida en la generación;

- pueden proveer estabilidad durante transitorios ya que amortigua las oscilaciones presentes en la línea de transmisión;
- pueden amortiguar cambios bruscos de voltaje;
- y finalmente, el sistema de almacenamiento en general es relativamente pequeño en tamaño en comparación con otros sistemas de almacenamiento y su ubicación no se ve limitada a algún área específica como es el caso de las hidroeléctricas. [10,4].

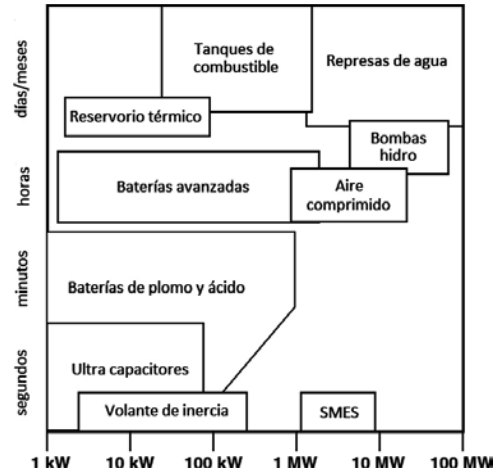


Figura 2. Tiempo de Descarga vs. Capacidad de almacenamiento en distintos sistemas de almacenamientos de energía.

\* Figura modificada de la versión original [10], traducida al español.

El primer SMES utilizado tanto para experimentación como para uso comercial fue diseñado por el Laboratorio Nacional Los Alamos (LANL, por sus siglas en inglés) y construido para la Bonneville Power Company en 1982. Estuvo en uso por cinco años y fue desmantelado para investigación. Este proyecto tenía una capacidad energética de 30 MJ y fue utilizado para estabilizar el sistema de potencia ya que amortiguaba las oscilaciones presentes en una línea de transmisión de 1500 km de largo. [6]

Según LANL, el costo de construcción de un sistema de almacenamiento por superconducción se distribuye de la siguiente manera:

- Bobina superconductor, 45%.
- Estructura, 30%.
- Mano de obra, 12%.
- Convertidor, 8%.
- Sistema de enfriamiento, 5%.

El mayor reto que presenta esta tecnología es reducir el costo total del sistema. La Tabla 3 presenta una proyección de costo para distintos sistemas de almacenamiento de energía [10]. Actualmente, el costo del sistema de almacenamiento SMES depende del costo de los superconductores. En el 2007, el costo del NbTi era de 1 \$/kAm, mientras que el Nb3Sn era de 1.50 \$/kAm (Dólar/kilo ampere por metro). Afortunadamente, una característica inusual de este sistema es que el costo por unidad de energía almacenada (MJ o kWh) decrece a medida que la capacidad de almacenamiento aumenta, es por esto que este tipo de sistema es preferible para aplicaciones de gran tamaño como lo es el sistema de potencia, aunque también se están realizando estudios para su aplicación en vehículos [11].



Tabla 3. Proyección de costos para sistemas de almacenamiento de energía

Sistema	Tamaños Típicos MW	\$/kW	\$/kWh
Ultra capacitores	1-10	300	3600
Volantes de Inercia	1-10	200-500	100-800
SMES	10-1000	300-1000	300-000
Aire Comprimido	50-1000	500-1000	10-15
Bombeo Hidroeléctrico	100-1000	600-1000	10-15

### 5. Conclusión

SMES es una tecnología de almacenamiento de energía que tiene mucho potencial debido a su capacidad de almacenar grandes cantidades de energía y aún ser rentable en comparación con otros sistemas de almacenamiento. El mayor reto que presenta es reducir el costo total del sistema, pero avances en los sistemas de refrigeración criogénica y el desarrollo de mejores superconductores puede llevar a que su aplicación sea mucho más comercial.

### Referencias

- [1] R. L. Evans, *Fueling our Future: An Introduction to Sustainable Energy*, 1era edición, Cambridge University Press, 2007, pp. 168.
- [2] W. V. Hassenzahl, "Superconducting Magnetic Energy Storage," IEEE Proceedings, vol.71, No. 9, Septiembre, 1983.
- [3] H.Y. Jung, A. Kim, J. Tamura, et. al, "A Study on the Operating Characteristics of SMES for Dispersed Power Generation System", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol.19, No.3, Junio 2009, pp.2028-2031.
- [4] W. Buckles and W. V. Hassenzahl, "Superconducting Magnetic Energy Storage," IEEE Power Engineering Review, Mayo, 2000, pp.16-20.
- [5] J. Bray, "Superconductors in Applications; Some Practical Aspects", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol.13, No.3, Junio 2009, pp.2533-2539.
- [6] A. Ter-Gazarian, *Energy Storage for Power Systems*, 1st edition, Peter Peregrinus Ltd., 1994.
- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_superconductors](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_superconductors)
- [8] W. V. Hassenzahl, "Will Superconducting Magnetic Energy Storage be Used on Electric Utilities Systems?" IEEE trans. On Magnetics, vol.Mag-11, No. 2, Marzo, 1975, pp.482-488
- [9] S. Vasquez, S.M. Lukic, E. Galvan and J. Carrasco, *Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications*, IEEE trans. On Industrial Electronics, vol.57, No.12, Diciembre 2010, pp.3881-3895
- [10] F. Farret and M. Godoy Simoes, "Integration of Alternative Sources of Energy", IEEE Press/Wiley-Interscience, 2006, Hoboken New Jersey, 1era edición, pp. 290.
- [11] L. Trevisani, A. Morandi, F. Negrini, P.L. Ribani and M. Fabbri, "Cryogenic Fuel-Cooled SMES for Hybrid Vehicle Application," IEEE trans. On Applied Superconductivity, vol. 19, No.3, Junio, 2009.

# Trenes: material rodante del transporte ferroviario

A. Berbey<sup>1</sup> | R. Caballero<sup>1</sup> | J.D. Sanz Bobi<sup>2</sup> |  
J. Brunel<sup>2</sup> | K. Guerra<sup>1</sup> | J. Flores<sup>1</sup> | A. Samaniego<sup>1</sup> |  
W. Orozco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica de Panamá  
<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Madrid

**Resumen:** se le conoce como material rodante a todos los tipos de vehículos dotados de ruedas capaces de circular sobre una vía férrea cuyo principal objetivo es transportar diferentes tipos de cargas. Los mismos se pueden clasificar de muchas formas, aunque los criterios fundamentales para clasificar el material rodante suelen ser su capacidad tractora y su uso comercial. En este artículo de divulgación tecnológica/científica se presentan varios aspectos del material rodante tales como: tipos de trenes, ventajas y desventajas de cada uno de ellos, características y partes del material móvil ferroviario y tipos de material móvil remolcado.

**Palabras claves:** material rodante, transporte, trenes.

**Title:** Trains: Rolling Stock of the Railroad Transportation.

**Abstract:** rolling stock comprises all types of vehicles equipped with wheels capable of moving on a railroad, which main objective is to transport different types of loads. These can be classified in many ways, although the basic criteria to classify the rolling stock are, typically, its tractive capacity and its commercial use. In this popular technical/science article, several aspects of the rolling stock such as: types of trains, advantages and disadvantages of each of them, features and parts of the rolling stock and the types of towed rolling stock, are presented.

**Keywords:** rolling-stock, transportation, trains.

## 1. Introducción

La necesidad de transportar grandes cargas, a grandes distancias llevó al hombre a la construcción de máquinas con gran capacidad de tracción. El constructor de la primera locomotora (25 de julio de 1814), que derivaría más tarde en un ferrocarril, fue George Stephenson. El destino inicial de la locomotora fue su utilización en las minas carboníferas, en cuya primera demostración se logró arrastrar una carga de cuarenta toneladas, a una velocidad de seis kilómetros por hora. El ferrocarril fue producto de la Revolución Industrial surgida en Inglaterra durante los siglos XVIII y XIX. Su evolución ha sido notable, y la utilización de material rodante es necesaria no sólo para el transporte de grandes cargas en vagones, sino también para el transporte de pasajeros en coches, tanto para pequeñas como para grandes distancias.

## 2. Trenes convencionales y automotores

Dentro del material móvil hay diversos tipos de vehículos que pueden ser motores o material remolcado. Dentro del material motriz se encuentran las locomotoras y los automotores. En las siguientes figuras se presentan las clasificaciones de las locomotoras de acuerdo a la tracción que las acciona.

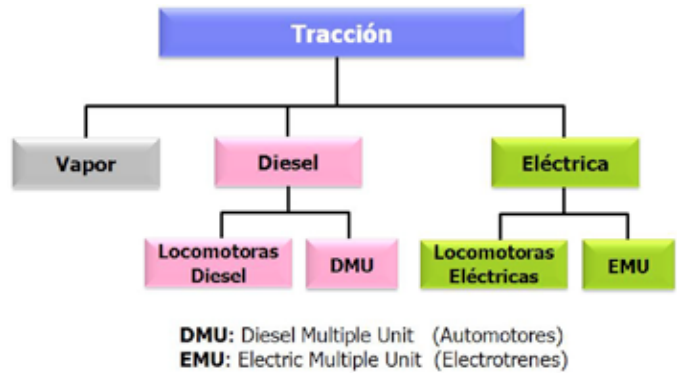


Figura 1. Clasificación de las locomotoras según el tipo de tracción.

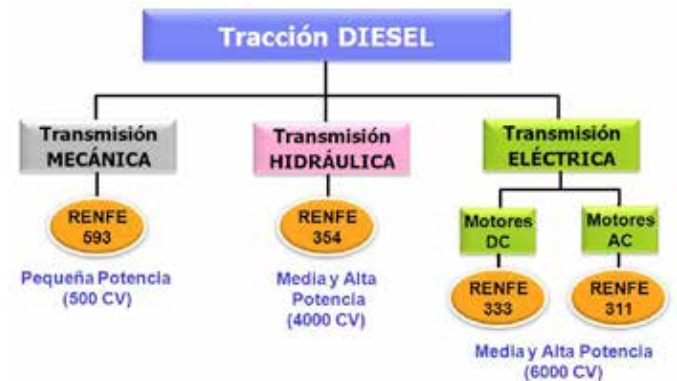


Figura 2. Clasificación de locomotoras con tracción diesel.



Figura 3. Clasificación de locomotoras con tracción eléctrica.



Existe otro tipo de clasificación de las locomotoras que corresponden a su funcionalidad, es decir, allí encontramos locomotoras de maniobras, locomotoras de carga para los medios y largos recorridos y, las locomotoras para servicios de viajeros que llegan a alcanzar hasta 220 km/h, como las últimas 252 de RENFE de 90 toneladas.

En cuanto a su nomenclatura, los vehículos ferroviarios tienen asignada una matrícula internacional que está integrada dentro de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) y que corresponde a parámetros tales como el tipo de vehículo, la compañía a la que pertenece y el país en el que está inscrita en los registros. Luego, con respecto a la distribución de la tracción en el material rodante nos encontramos con los trenes convencionales y automotores.

- Trenes convencionales: se caracterizan por las locomotoras, que son los vehículos que dan tracción a los trenes convencionales (locomotora(s) + coches o vagones); es decir, es una locomotora que tira de una serie de vagones o coches.
- Automotores: cuando la tracción se incorpora en los mismos vagones o coches; ocasiona una composición indeformable con un número fijo de vagones y, se forma un vehículo que en el argot ferroviario se denomina “automotor”; otros autores los denominan “material autopropulsado” o “unidad del tren”.

En la tabla 1 se muestra una explicación de las configuraciones comunes de los automotores.

**Tabla 1.**  
**Configuraciones comunes de los automotores**

Configuración	Denominación
Coche motor-Coche intermedio-Coche motor	M-Ri-M
Coche motor-Remolque intermedio-Remolque con cabina	M-Ri-Rc
Coche motor-Coche motor	M-M
Coche motor	M

Los coches con ausencia de tracción también se llaman remolques. Existen coches motores con cabina y sin cabina. Los coches intermedios también pueden denominarse por la letra R sola si son remolcados, o con la letra S o M si son motrices (en algunos sitios se utiliza la letra S para definir los coches motores sin cabina). Hay ocasiones en las que la tracción es distribuida a lo largo de todo el tren, y existen coches con capacidad motriz que no disponen de cabina. El tren serie 7000 o el 9000 de Metro de Madrid dispone de unidades motrices sin cabina. Igualmente el ICE-3 alemán o serie 103 de RENFE tiene coches motores sin cabina.

Como desventajas del material rodante autopropulsado frente al convencional tenemos dos aspectos: la rigidez de las composiciones y la comunicación entre composiciones acopladas. El primer aspecto

se refiere al hecho de que, como los automotores se utilizan sobre todo para transporte de viajeros, la única forma de variar la oferta de plazas en un servicio asegurado por automotores, es acoplando 2 o 3 de ellos, pero en ese caso la oferta de plazas aumenta bruscamente, por lo que la adaptación a la demanda es peor que en el caso de los trenes convencionales. Los trenes convencionales pueden adaptarse mejor a la demanda incorporando o segregando coches o vagones. El segundo aspecto negativo se refiere a que hay que disponer de puertas de intercomunicaciones en el frontal de las cabinas y éstas suelen dar problemas de estanqueidad. En la mayoría de los automotores modernos se ha optado por suprimirla.

**Tabla 2. Ventajas del material rodante autopropulsado frente al tren convencional.**

Propiedad	Descripción
Tracción distribuida	Permite tener una mejor prestación de aceleración y frenado, al tener mejor repartido el peso adherente. Además, el peso máximo por eje (que siempre corresponde al eje de los motores) es menor, por lo que la agresión o desgaste de la vía es menor y, esto beneficia a las actividades de mantenimiento posterior de la vía.
Posibilidad de redundancia en la conducción	Al tener la tracción distribuida en varios vagones, el fallo de un motor no deja inactivo o fuera de servicio al tren, sino que sólo habría una disminución de la potencia de circulación.
Reversibilidad	Al contar con 2 cabinas de una misma composición, la cabeza del tren se puede convertir en cola y viceversa, según la dirección de la conducción.
Sencillez de enganche	Entre automotores, permite agregar ramas a lo largo del recorrido en comparación con los trenes convencionales.
Mayor espacio físico	Al no llevar locomotora, casi toda la longitud es aprovechable para el transporte de pasajeros.
Comunicación entre los coches del automotor	La unión entre los coches se realiza a través de enganches “semipermanentes”.

### 3. Características generales del material móvil

Tanto el material móvil motor como el material remolcado tienen las siguientes características:

- **Ruedas troncocónicas:** la inclinación de las generatrices es de 1/20, la misma que la de los carriles. Con esto se mejora el apoyo de las ruedas sobre los carriles y se ayuda a la inscripción de eje en las curvas, al permitir que cada rueda adopte un radio de contacto distinto para de esta forma poder girar a diferente velocidad lineal pero a iguales revoluciones (el eje une ambas ruedas, siendo rígido).
- **Ruedas caladas:** como ventaja el calaje confiere al conjunto eje-rueda una mayor robustez, que lo hace muy apropiado para el ferrocarril, donde se mueven grandes cargas a grandes velocidades. Un inconveniente es la problemática de la inscripción en las curvas. Como excepción, existe el sistema de Talgo que se muestra en la siguiente figura, en el que las ruedas no están caladas, sino que son independientes. Este sistema no es un eje típico ferroviario.



Figura 4. Ruedas de un vehículo ferroviario.

- **Pestañas interiores:** permiten el guiado del tren.
- **Cargas aplicadas sobre la parte exterior de las ruedas:** el eje ferroviario sobresale de las ruedas, este saliente se denomina "mangueta". Sobre estas manguetas se apoya la caja del vehículo (a través de la suspensión). Con esta longitud adicional del eje se obtienen dos ventajas: las cajas de los vehículos pueden ser más anchas (mayor capacidad de transporte) y, se aumenta la estabilidad de los vehículos.
- **Peso suspendido y no suspendido:** el peso suspendido de un vehículo ferroviario es aquel que pasa por la suspensión para llegar al carril, es decir, está amortiguado. El peso no suspendido (ejes, cajas de grasa y todo o parte del peso de los motores y/o de la transmisión) está sin amortiguar. Cuanto mayor sea el peso no suspendido de un vehículo, más agresivo será este con la vía, ya que las cargas dinámicas incidirán sobre ella bruscamente.
- **Ruedas debajo de las cajas:** esto permite aumentar la anchura de las cajas, ya que no se ve limitada lateralmente por las ruedas, pero penaliza la altura de las mismas, al ser el gálibo limitado. Para ganar altura, las ruedas se fabrican con un radio pequeño (normalmente de 0,5 m).
- **Material móvil rígido o articulado:** se dice que es rígido cuando sus ejes no pueden girar respecto a un eje vertical para mejorar su inscripción en las curvas. La distancia entre 2 ejes fijos se denomina "empate". Cuanto mayor es el empate de un vehículo, peor será su capacidad de inscripción en las curvas y, por ello su agresión a la vía y su posibilidad de descarrillar serán mayores. Hoy en día, se utilizan los vehículos articulados, cuyos ejes pueden colocarse en una posición más o menos cercana al radio de curvatura, con lo cual mejora su inscripción. Actualmente, la mayor parte del material móvil utiliza bogies (ejes agrupados en carretones), cuyos bastidores tienen un pivote central que les permite girar. Con el material articulado se reduce el empate de los vehículos y, además (en el caso de los bogies) se obtienen más ejes sobre los cuales repartir la carga. Los vehículos articulados que mejor se inscriben en las curvas son los trenes articulados guiados, en los cuales el eje siempre se sitúa radialmente y, por ello, la rueda es tangente a los carriles.

#### 4. Partes del material móvil ferroviario

Las partes más importantes de un material móvil ferroviario son las siguientes:

- **Caja:** en su interior se sitúan los viajeros, la mercancía, los motores, etc., según el tipo de vehículo (coche, vagón o locomotora).
- **Bastidor:** es la estructura metálica o armazón formada por el bogie, que sirve como elemento de fijación de los ejes, las ruedas, los motores de tracción y las suspensiones, entre otras partes.
- **Larguero:** elemento longitudinal que forma parte de la estructura del bastidor de un vehículo.
- **Traviesas extremas o cabeceros:** elemento estructural situado en el extremo del bastidor de un vehículo que une los largueros de forma perpendicular a éstos y, que soporta normalmente los aparatos de choque y tracción. Al conjunto de elementos que configuran la caja del vehículo sobre la traviesa extrema se le denomina "testero".
- **Suspensión:** la caja transmite las cargas a las ruedas a través de la suspensión. La suspensión ferroviaria es doble: primaria y secundaria. La suspensión primaria tiene como misión absorber las irregularidades del carril y deformaciones geométricas de la vía, está situada entre las cajas de grasas y el bastidor del bogie o en el caso de los vagones de 2 ejes, entre la caja de grasa y el bastidor del vehículo. La suspensión secundaria es la encargada de absorber los movimientos verticales y laterales del bogie con respecto al bastidor del vehículo; además, sirve de apoyo de éste con el bastidor del bogie.
- **Cajas de grasas:** las cargas de la caja pasan al bastidor, del bastidor a la suspensión y de ésta a las manguetas de los ejes a través de las cajas de grasas. Son unos recipientes metálicos que contienen lubricantes y llevan encajado un rodamiento en el apoyo de las cargas sobre los ejes.
- **Rodadura:** permite que el vehículo se mueva sobre la vía. Puede estar formada por ejes independientes o bogies. Para el desplazamiento de los vehículos son necesarios los órganos de rodadura que están compuestos por:
  - **Eje:** pieza cilíndrica de acero en la que se montan las ruedas,



en los extremos están las manguetas que van dentro de los rodamientos y éstos en el interior de la caja de grasa.

En algunos vehículos están instalados discos de frenos. Para aligerar la masa no suspendida, a veces se utiliza un mecanismo consistente en un taladro a lo largo de todo el eje. Las manguetas son la parte de los ejes sobre la que se acopla la pista interior del rodamiento permitiendo su giro. Normalmente se encuentran en los extremos del eje (caja de grasa exteriores).

- **Bogie:** es el conjunto de elementos constituidos por el bastidor con elementos de suspensión, rodadura y freno. Generalmente, este bastidor suele tener una forma de H cerrada o abierta. En algunos vehículos el bastidor se utiliza para depósitos auxiliares de aire.
- **Rodamientos:** permiten el giro de la mangueta con el mínimo rozamiento posible y están lubricados habitualmente con grasa consistente.
- **Caja de grasa:** son los elementos que contienen los rodamientos; están situadas en torno a la mangueta del eje y, sobre ellas, descansa el peso del vehículo a través de la suspensión.
- **Ruedas:** son los elementos de forma circular que giran con su eje, teniendo su superficie de contacto con forma troncocónica. Éstas permiten el movimiento y guiado del vehículo. Actualmente, las ruedas son de tipo monoblock, esto quiere decir, que están fabricadas de una sola pieza. La rueda tiene tres zonas diferenciadas. La llanta es la superficie de rodadura, que presenta una forma concreta llamada perfil, que es ligeramente cónico y tiene la función de realizar el guiado, existiendo distintos tipos de perfiles dependiendo de la velocidad, el diámetro, la masa, la solución de amortiguación, etc. La parte central de la ruedas se llama cubo. Esta es la parte que se cala en la mangueta del eje. El velo es la zona de la rueda que une la llanta con el cubo, puede ser plano o presentar una prominencia, que disminuye la masa no suspendida, manteniendo o aumentando su resistencia lateral.

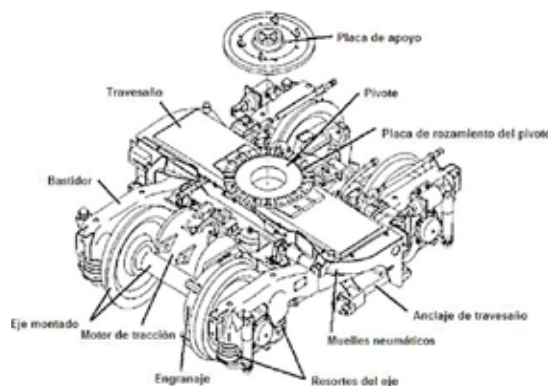


Figura 5. Partes de un bogie.

- **Aparatos de tracción y choque:** los aparatos de tracción transmiten la fuerza de tracción a lo largo de todo el tren. Pueden ser enganches automáticos, cadenas, ganchos, barras, etc. Los

elementos de choques están formados por 2 topes situados en el testero del vehículo, tienen la misión de amortiguar las fuerzas longitudinales de compresión que se producen durante la marcha, tanto en las frenadas como en las paradas o los impactos que reciben los vagones en diferentes situaciones, protegiendo así la estructura de los vehículos y las mercancías que transportan.

- **Canalizaciones:** discurren a lo largo de toda la composición. Las principales son la conducción de aire para el frenado del tren (que acciona las zapatas o los discos de freno de los coches y vagones) y las líneas eléctricas para tracción, gobierno y servicios auxiliares de la composición, tales como por ejemplo climatización o luminaria en los coches de pasajeros.

## 5. Tipos de material móvil remolcado

El material remolcado es el conjunto de vehículos ferroviarios que no aporta tracción, los cuales remolcados por las locomotoras y junto con éstas, forman parte de la comisión de los trenes. El material móvil remolcado para transportar viajeros se denomina “coche”; “vagón”, el destinado a las mercancías y, “furgón”, el utilizado para el transporte de equipajes, paquetería, correo, etc.

En los trenes de viajeros en general, la carga máxima de los vagones es de 2/3 del peso máximo autorizado. Su peso máximo por eje suele ser 20 toneladas y, su número de ejes, cuatro agrupados en dos bogies. Hay una gran variedad de vagones como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 2. Ventajas del material rodante autopropulsado frente al tren convencional.

Tipo	Descripción
Vagones cerrados	Para proteger la mercancía de la intemperie, robos y vandalismo. Hay una gran variedad: de paredes deslizantes, telescopios, etc.
Vagones de bordes	Son unas cajas abiertas por arriba. Para transporte de madera, chatarra, etc.
Plataforma	Sobre la que se apoya la carga, convenientemente sujeta. Son especiales para el transporte de automóviles. Algunos de estos se consideran de velocidad alta por alcanzar los 220 km/h, son aquellos en donde se han implantado las estructuras menos pesadas de aluminio en lugar de las de acero al carbono.
Jaula	Para el transporte de ganado.
Cisterna	Para el transporte de líquidos y mercancías peligrosas.
Porta-contenedores	Son vagones de plataforma que tienen sujeciones para los contenedores. Como es el caso del Ferrocarril Interoceánico de Panamá que une los puertos de Balboa (Panamá) con Cristóbal en la Ciudad de Colón.
Tolvas	Para el transporte de gránulos sólidos como áridos, carbón, minerales, etc.

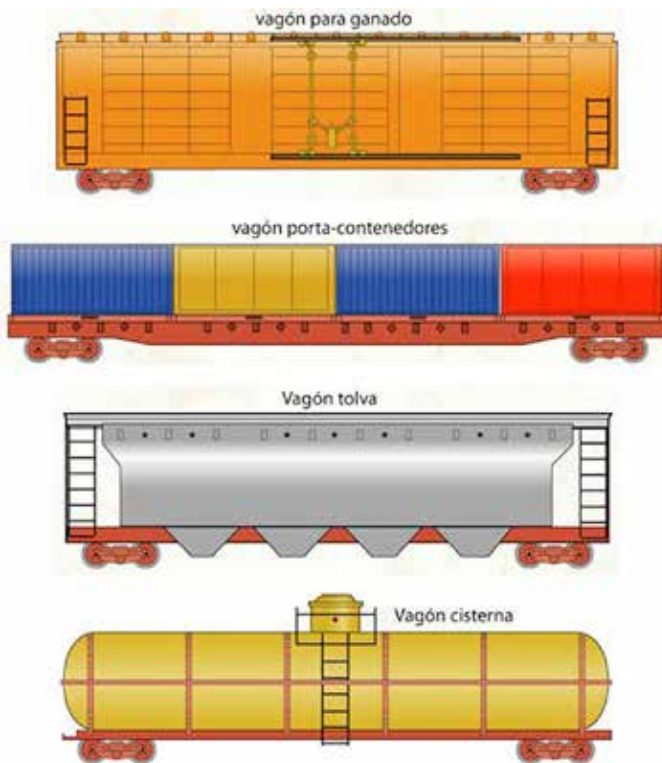


Figura 6. Tipos de vagones.

### Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Juan de Dios Sanz-Bobi y al Ing. Juan Andrés Brunel Vázquez, ambos personal científico del Centro de Investigación en Tecnologías Ferroviarias (CITEF) de la Universidad Politécnica de Madrid, por facilitar el material gráfico (figuras y dibujos técnicos) del presente artículo.

### Referencias

- [1] Calvo, F.J., Lorente Gutiérrez, J. y De Oña López, J. Funcionamiento y Explotación de la Infraestructura Ferroviaria. Grupo editorial Universitario. 2006.
- [2] Comunidad de Madrid. Las infraestructuras de Metro y de Transporte en la Comunidad de Madrid. Periodo 1995-2003. Consejerías de Obras Públicas urbanismo y transportes. 2003
- [3] González y Fuentes, Ingeniería Ferroviaria. Unidad Didáctica. Ingeniería Industrial. UNED. 2006
- [4] Material remolcado. Escuela Técnica Profesional. RENFE. 2008.
- [5] CITEF. FERROCARRILES: 1. INTRODUCCIÓN AL FERROCARRIL. Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. 2008.

# Fusión de imágenes con múltiples puntos de enfoque basado en sensado compresivo

Erick Quezada | Roger Arribasplata

Estudiantes, Universidad Tecnológica de Panamá  
{erick.quezada, roger.arribasplata}@utp.ac.pa

Fernando Merchan

Profesor, Universidad Tecnológica de Panamá  
fernando.merchan@utp.ac.pa

**Tipo de artículo:** original

**Fecha de recepción:** 9 de julio de 2013

**Fecha de aceptación:** 12 de noviembre de 2013

**Resumen:** *en este artículo se presentan resultados en la aplicación del principio del sensado compresivo (SC) al problema de fusión de imágenes con múltiples puntos de enfoque. Se presenta las bases teóricas e implementación de un algoritmo de fusión basado en SC. Adicionalmente, se presenta un estudio comparativo con otros algoritmos de fusión de imágenes que pone en evidencia las propiedades y el potencial del método presentado.*

**Palabras claves:** *procesamiento de imágenes, sensado compresivo, fusión de imágenes.*

**Title:** *Multi-focus image fusion based on compressive sensing.*

**Abstract:** *in this paper we present the application of the principle of compressive sensing in the fusion of multi-focus images. We present the theoretical principles and the implementation of an image fusion algorithm. A comparative study with other image fusion algorithm is presented to point out the properties and advantages of the proposed method.*

**Keywords:** *image processing, compressive sensing, image fusion.*

## 1. Introducción y motivación

El teorema de Shannon y Nyquist nos enseña que la tasa de muestreo necesaria para la reconstrucción exacta de una señal, debe ser superior al doble de su ancho de banda. En muchas aplicaciones de imágenes digitales y video-cámaras, la tasa de Nyquist es tan alta que el número de muestras resultantes causa que la compresión de estas señales sea una necesidad previa al almacenamiento o transmisión; y en otras aplicaciones, tener una alta tasa de muestreo resulta ser muy costosa. Alrededor del año 2006, emergió una teoría alternativa a este teorema propuesta por David L. Donoho y Emmanuel J. Candès, llamada "Sensado Compresivo" [1,2]. El principio del Sensado Compresivo (SC) propone que una señal

o una imagen puede ser reconstruida por un número de medidas/muestras mucho menor de lo que señala el teorema de Shannon y Nyquist. Nosotros basamos nuestro estudio en el procesamiento digital de imágenes, específicamente en técnicas para la fusión de imágenes de múltiples puntos de enfoque utilizando SC [3]. Fusión de imágenes es un proceso que combina información de múltiples imágenes en una imagen fusionada que provee mejor capacidad de interpretación. La imagen fusionada resulta ser mucho más útil para consecuentes aplicaciones de procesamiento de imágenes. Hoy en día muchos algoritmos de fusión han sido propuestos [4]. Un trabajo reciente [3, 5] demuestra la posibilidad de fusionar imágenes con una cantidad menor de muestras de las imágenes originales, si ellas son adquiridas utilizando el principio de SC. Una ventaja clave de este enfoque es que las muestras necesarias para el procesamiento pueden ser recolectadas sin asumir información previa de la imagen que se está observando. Además, SC requiere menos espacio de almacenamiento, a pesar del mayor costo en proceso computacional. Por lo tanto, esta técnica de SC ha sido muy atractiva para aplicaciones de imágenes digitales.

Nuestro objetivo en esta documentación es presentar nuestros primeros estudios de los conceptos de fusión de imágenes con múltiples puntos de enfoque usando sensado compresivo, el cual esperamos que sea útil en todas las técnicas de video-procesamiento y fotografía en general, en áreas de video-vigilancia, procesamiento de imágenes médicas e imágenes satelitales, adquisición de imágenes en cámaras digitales y videocámaras. Esperamos que con esta publicación podamos informar e inspirar a más personas para contribuir con los estudios de procesamiento digital de imágenes y sensado compresivo. A continuación, presentamos una breve reseña de la teoría, conceptos y términos mencionados y utilizados para el desarrollo de nuestros algoritmos de procesamiento. Luego procederemos a presentar aspectos teóricos de SC; presentaremos un método convencional de fusión de imágenes basadas en wavelet, y un algoritmo de fusión basado en SC. Por último comparamos el método de fusión basado en SC con el método convencional de wavelets y con el método de promedio.

## 2. Teoría del sensado compresivo

SC es un paradigma de muestreo que nos permite capturar y representar señales a una tasa de muestreo significativamente menor a la tasa de muestreo de Nyquist tomando ventaja de la estructura esparsa de la señal. Convencionalmente una señal  $x$  muestreada con un número de elementos  $N$  atraviesa por un proceso de compresión en donde la señal resultante tiene un número de elementos menor  $M$ ; es decir  $N \gg M$ . El SC nos enseña que es posible muestrear y comprimir datos simultáneamente, es decir adquiriendo un número de muestras  $K$  donde  $N \gg K > M$ .

Una señal  $x$ , considerada como un vector en un sub-espacio de dimensiones finitas de  $R^N$ ,  $x = [x[1] \dots x[N]]$ , es estrictamente o exactamente esparsa si la mayoría de sus elementos son iguales a cero; es decir, si se comprueba que  $\Delta(x) = \{1 \leq i \leq N \mid x[i] \neq 0\}$  es de cardinalidad  $k \ll N$ . Una señal  $k$ -esparsa es aquella para la cual exactamente  $k$  número de elementos tienen un valor distinto de cero.



La experiencia indica que las señales e imágenes naturales son esparsas en algún dominio.

El principio del SC establece que una señal discreta con una representación esparsa en ciertas bases, puede ser recuperada a partir de un número pequeño de proyecciones lineales de dicha señal sobre una base arbitraria (Fourier, wavelets, Gabor, etc); en otras palabras, cuando se habla de una señal esparsa se hace referencia a aquellas que sólo presentan pocos valores distintos de cero en algún dominio de transformada.

### Planteamiento del problema de SC en imágenes

Primero, suponga que representamos una imagen en tonos de grises como una matriz de  $N \times N$  de elementos en el rango de 0 a 255, donde 0 es el color negro, 255 es blanco, y los valores intermedios son los tonos de grises. Esa matriz se puede expresar como un vector  $x \in R^n$  de dimensiones  $n \times 1$ , donde  $n = N \times N$ . Consideremos que este vector es  $k$ -esparso en una base representada por la matriz  $\Psi = [\psi_1 | \psi_2 | \dots | \psi_N]$  de dimensiones  $n \times n$  con los vectores  $\{\psi_i\}$  como columnas. Esto significa que tiene  $k$  número de coeficientes diferentes de cero en esta base. Esto es algo que se observa en las transformadas de imágenes naturales, por ejemplo, la transformada de wavelets. Ahora podemos expresar  $x$  como:

$$x = \Psi\theta \quad (1)$$

donde  $\theta$ , de dimensiones  $n \times 1$ , representa un vector de coeficientes de transformada con solamente un número  $k$  de elementos diferentes de cero, donde  $k$  es menor que  $n$ . Por lo tanto,  $x$  se le puede considerar  $k$ -esparso en la base ortonormal  $\Psi$ . Estudios recientes han demostrado que una señal puede ser reconstruida fielmente con este número relativamente pequeño de muestras [1, 2]. Este muestreo puede ser expresado en el vector de medición  $y \in R^m$ , con  $k < m < n$ , que es obtenido por el siguiente sistema lineal:

$$y = \Phi x = \Phi\Psi\theta \quad (2)$$

donde  $\Phi$  es una matriz de medición de tamaño  $m \times n$ . Contrario a métodos tradicionales de muestreo, las medidas contenidas en  $y$  son suficientes para recuperar  $x$ . La condición para esto es que se verifique una condición de incoherencia entre la base de medición  $\Phi$  y la base de representación  $\Psi$ . Esto significa que las filas de  $\Phi$  no puedan representar de manera esparsa las columnas de  $\Psi$  [1,2].

La fusión de imágenes se logra cuando comparamos y fusionamos los vectores de medidas  $y$  de múltiples imágenes con diferentes puntos de enfoque, para obtener un vector de medición  $y$  resultante, con el cual recuperamos la imagen final fusionada.

Es importante recordar que como  $m \ll n$ , la recuperación de la señal  $x$  a partir de  $y$  resulta imposible por una simple y directa transformada inversa de la Ec. (2). En los trabajos ya mencionados [1, 2] se desarrollan algoritmos de recuperación no lineal que resuelve este problema. Lastimosamente, estos algoritmos pueden exigir muchos recursos computacionales en el proceso.

Con la información de  $m$  (donde  $m \ll n$ ) número de medidas,

nosotros queremos recuperar la señal  $x$ . Esto se puede lograr resolviendo:

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin} \|\theta\|_0 \text{ sujeto a } \Phi\Psi\theta = y \quad (3)$$

La señal  $\hat{x}$  es reconstruida como  $\Psi\hat{\theta}$  donde  $\hat{\theta}$  es el mínimo global del problema de optimización  $l_0$ . Sin embargo, éste es un problema no-convexo altamente combinatorial [7]. Se ha demostrado que es posible obtener resultados similares sustituyendo norma  $l_0$  por la norma  $l_1$ :

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin} \|\theta\|_1 \text{ sujeto a } \Phi\Psi\theta = y \quad (4)$$

Se ha demostrado que cuando  $x$  es lo suficientemente esparsa en  $\Phi$ , la recuperación a través de minimización  $l_1$  es probablemente exacta.

### 3. Fusión de imágenes en el dominio de multiresolución

Cuando estudiamos el tema de fusión de imágenes, observamos que la descomposición en multiresolución ha presentado ventajas significativas en la representación de las señales.

Un esquema de multiresolución descompone la señal o imagen que está siendo analizada en varios componentes, cada uno de los cuales captura la información presente en una escala dada [8]. La noción de resolución o escala está relacionada con la dimensión de los detalles que pueden representarse. Estos conceptos son muy útiles en procesamiento de imágenes por las siguientes razones: 1) los objetos en el mundo real están formados por estructuras a diferentes escalas; 2) el sistema visual humano, procesa la información en multiresolución; 3) reduce la complejidad de los algoritmos. La idea fundamental de estos sistemas consiste en obtener una representación más conveniente (*análisis*) de la señal original sin pérdida de información, de forma que pueda posteriormente reconstruirse (*síntesis*).

La Transformada Discreta de Wavelets (TDW), permite la descomposición de la imagen en diferentes escalas (multiresolución) de coeficientes a la vez que se preserva la información. Podemos observar esquemas de análisis y síntesis en wavelets en la figura 1.

En el contexto de la fusión de imágenes, los coeficientes de wavelets, tanto de aproximación como de detalle, para una escala dada procedente de distintas imágenes pueden combinarse para la obtención de nuevos coeficientes.

Por su diferente significado físico los coeficientes de detalle y aproximación suelen combinarse de manera diferente [8]. Resulta que en las bandas de detalle, la magnitud de los valores de los coeficientes (positivos o negativos) proporciona suficiente información para identificar características relevantes en las imágenes tales como: bordes, líneas o límites de regiones. Es por eso que elegimos los valores máximos de los coeficientes de detalles. Esto se expresa con la regla siguiente:

$$D_F = D_M \text{ con } D_M = \arg \max_{i=1, \dots, I} (|D_i|) \quad (5)$$

donde  $D_F$  son los coeficientes de la imagen fusionada,  $D_M$  es el coeficiente de máximo valor absoluto de las imágenes iniciales o

de entrada, y  $l$  es el total de imágenes iniciales. Los valores de los coeficientes de aproximación son promediados.

Una vez realizada la mezcla de coeficientes se procede a aplicar la Transformada Discreta Inversa de Wavelets (TDIW) para obtener finalmente la imagen fusionada.

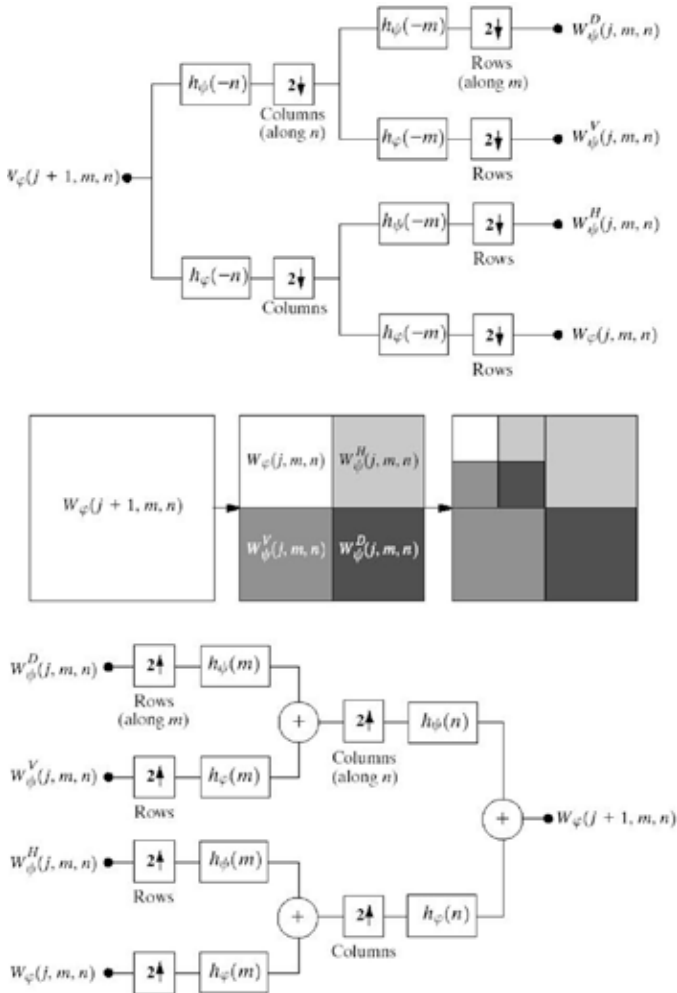


Figura 1. Esquema de descomposición en wavelets: análisis (esquema superior) y síntesis (esquema inferior).

#### 4. Fusión de imágenes en el dominio compresivo

En esta sección, formulamos un algoritmo de fusión de imágenes que usa mediciones compresivas. En éste se aplica un esquema de fusión similar a la usada en el dominio de wavelets en el dominio compresivo. La diferencia es que la fusión es realizada con medidas compresivas, en vez de coeficientes de wavelets. Los pasos básicos del algoritmo se describen a continuación:

#### Algoritmo Fusión de imágenes basadas en SC

- 1) Tomar las medidas compresivas  $Y_i$ ,  $i = 1, \dots, l$  para la imagen de entrada  $i$  usando el patrón de muestreo con la forma de estrella.
- 2) Calcular las muestras fusionadas utilizando la fórmula:  
$$Y_F = Y_M \text{ con } M = \arg, \text{Max}_{i=1, \dots, l} (|Y_i|).$$
- 3) Reconstruir la imagen fusionada de las medidas  $Y_F$  a través del método de variación total.

En la sección 2 vimos que el vector de medición  $y$  es obtenido a partir de proyecciones lineales no adaptativas de la señal  $x$  pasada por un matriz de medición  $\Phi$ . Wan, Achim y colaboradores (2008) propusieron usar como mediciones algunos coeficientes de la transformada de Fourier en dos dimensiones [5]. Estos coeficientes corresponden por un patrón de muestreo de estrella como se muestra en la figura 2.

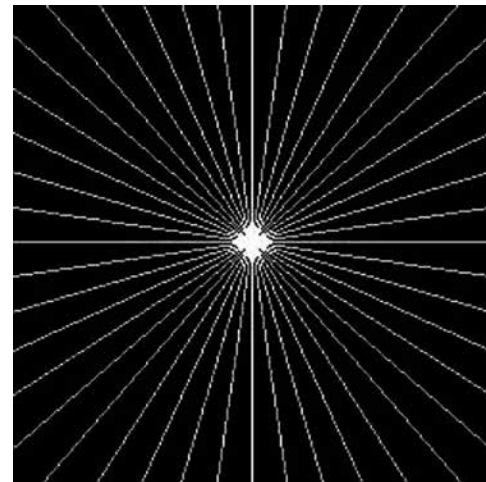


Figura 2. Patrón de Muestreo Estrella.

Este patrón consiste en líneas blancas que indican la localización de las frecuencias usadas para calcular las medidas compresivas  $y$ . Las frecuencias bajas están concentradas en el origen de sistemas coordenadas (centro de la imagen), y las altas frecuencias se encuentran esparcidas lejos del origen. Una vez obtenida  $y$ , se utiliza un algoritmo de reconstrucción para recuperar la señal original  $x$  [6]. Para lograr esto se utilizó un modelo de recuperación alternativo adaptado a las señales en 2D y en el que se busca obtener la imagen cuyo gradiente sea esparso.

Consideremos que  $x_{ij}$  es el pixel en la  $i$ -ésima fila y la  $j$ -ésima columna de una imagen  $x$ , y definamos los operadores  $D_{(h,ij)} x$  y  $D_{(v,ij)} x$  como sigue:

$$D_{(h;ij)} x = \begin{cases} (x_{(i+1,j)} - x_{(i,j)}) & i < n \\ 0 & i = n \end{cases}$$

$$D_{(v;ij)} x = \begin{cases} (x_{(i+1,j)} - x_{(i,j)}) & j < n \\ 0 & j = n \end{cases} \quad (5)$$

Estos operadores pueden interpretarse como los gradientes discretos verticales y horizontales de una imagen. A partir de estos operadores podemos definir la variación total como la suma de las magnitudes de este gradiente discreto en cada punto:

$$TV(x) := \sum_{ij} \sqrt{(D_{(h;ij)} x)^2 + (D_{(v;ij)} x)^2} \quad (6)$$

Así el algoritmo de recuperación busca la solución que verifique:

$$\min TV(x) \text{ sujeto a } y = \Phi x \quad (7)$$

donde  $y$  son las medidas compresivas obtenidas de la imagen  $x$  definidas por la matriz de medición  $\Phi$ . En nuestra implementación, la matriz  $\Phi$  representa una base parcial de Fourier en 2-D definida por el patrón mostrado en la figura 2 y el vector  $y$  los coeficientes de Fourier correspondientes.

### 5. Resultados y perspectivas

Para ilustrar nuestro estudio proponemos dos colecciones de imágenes de prueba para comparar: las imágenes de relojes estándar, y las imágenes de libros tomadas en nuestro laboratorio. En cada imagen de los relojes, uno de los relojes está en foco, mientras que el otro no. El mismo efecto se observa en las imágenes de libros.

Igualmente hacemos una comparación entre los dos algoritmos mencionados previamente, junto con el método de promedio, para comparar resultados entre un método y otro.

Las imágenes originales tienen una resolución de 512 x 512 píxeles; es decir, 262144 píxeles o elementos en los vectores de imágenes iniciales. Usando el algoritmo con *wavelets*, necesitamos analizar este número de coeficientes para el proceso de fusión. En cambio, utilizando el método de SC el número total de muestras en nuestro vector y de medición es de 91785 mediciones. En otras palabras, este proceso de fusión, trabaja con vectores de medición con tamaño 65% menor que aquellos vectores de coeficientes de *wavelets*.

En la figura 3 mostramos los resultados finales. Primero mostramos los dos pares de imágenes de iniciales (figura 4.a-b). Agregamos un resultado extra para comparación: el método promedio (figura 4.c) que consiste en promediar las dos imágenes. Este método es uno de los menos eficientes y sólo lo usamos como ejemplo de control. En los dos últimos resultados, observamos aquellos que fueron obtenido a través de la descomposición en *wavelets* y usando SC, respectivamente. El método de *wavelets* proporciona un resultado bastante satisfactorio. Sin embargo, los resultados obtenidos por SC presentan mayor contraste. Igualmente presentan mayores detalles en los bordes evitando efectos de difusión que podemos observar en el resultado por *wavelets*. Sin embargo, el resultado por SC presenta algunos artefactos y ruido granular.

Como trabajo futuro se considerará un estudio más extenso con diferentes tipos de imágenes para determinar el potencial del método compresivo en la aplicación de fusión de imágenes digitales. Se estudiarán nuevas reglas y dominios para realizar la fusión, y esperamos desarrollar un algoritmo que presente óptimos resultados que aprovechen de las prometedoras propiedades que brinda sentido compresivo.

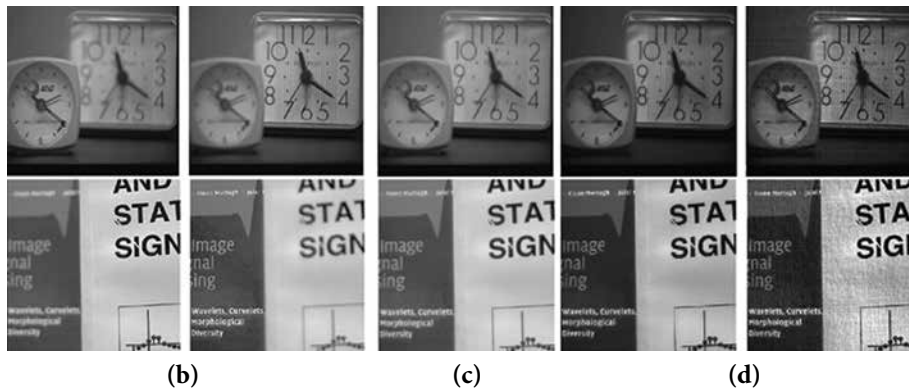


Figura 3. Resultados de fusión de imágenes. (a-b) Imágenes originales. (c) Método por promedio, (d) *wavelets* y (e) SC.

### Referencias

[1] E. Candés, J. Romberg, and T. Tao, "Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 56, No. 2, pp. 489-509, 2006.

[2] David L. Donoho, "Compressed sensing," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, No. 4, pp. 1289-1306, Apr. 2006.

[3] T. Wan, N. Canagarajah, A. Achim, "Compressive Image Fusion," *Proc. IEEE Int. Conf. Image Process*, pp. 1308-1311, 2008.

[4] M. I. Smith, J.P. Heather, "Review of image fusion technology in 2005," *Proceedings on Defense and Security Symposium*, Orlando, FL, March 28–April 1, 2005.

[5] T. Wan, N. Canagarajah, A. Achim, "Compressive Image Fusion," in *Proc. IEEE Int. Conf. Image Process*, pp. 1308-1311, 2008.

[6] E. Candés and J. Romberg,  *$l_1$ -magic: Recovery of sparse signal via convex programming*, code package available at <http://www.l1-magic.org>

[7] J.-L. Starck, F. Murtagh & J. M. Fadili, *Sparse Image and Signal Processing. Wavelets, Curvelets, Morphological Diversity*, Cambridge Univ. Press, 2010.

[8] G. Pajares & J. Cruz, *Visión por computador*, 2ed., Alfaomega Ed., México 2008.



# Seguridad eléctrica eficiente mediante UPS en sistemas hospitalarios

Adda Ureña Solís

Departamento de Mantenimiento | Hospital Nacional  
aurena@hospitalnacional.com

Tipo de artículo: original

Fecha de recepción: 11 de julio de 2013

Fecha de aceptación: 14 de noviembre de 2013

**Resumen:** *la confiabilidad y eficiencia del sistema eléctrico que alimenta a un hospital son características imprescindibles, ya que se utilizan equipos altamente sensibles y con un grado de precisión elevado, por lo que este punto juega un papel vital en este sector. Para asegurar la calidad de energía requerida, es necesario contar con una alimentación que pueda garantizar la continuidad eléctrica absoluta y que sea capaz de hacerle frente a cualquier falla o perturbación que pueda presentarse.*

*En este trabajo se ponen en evidencia los problemas fundamentales que justifican el diseño e instalación de un Sistema de Respaldo de Energía (UPS) eficiente, tomando en cuenta sus actuales y futuras necesidades.*

**Palabras claves:** *eficiencia eléctrica, confiabilidad eléctrica, continuidad eléctrica, seguridad eléctrica, inversor, UPS.*

**Title:** *Efficient Electrical Safety by Means of UPS in Hospital Systems.*

**Abstract:** *the reliability and efficiency of the electrical system that feeds a hospital are essential characteristics, since highly sensitive equipment with a high degree of accuracy are used, so this point plays a vital role in this sector. To ensure the required quality of energy, it is necessary to have a power supply that can guarantee absolute continuity and is able to cope with any fault or disturbance that may arise.*

*In this work, we show the fundamental problems that justify the design and installation of an efficient energy backup system (UPS), taking into account their current and future needs.*

**Keywords:** *electrical continuity, electrical efficiency, electrical reliability, electrical safety, inverter, UPS.*

## 1. Introducción

Normalmente, los hospitales cuentan, en su mayoría, con cargas no lineales, debido a que los equipos utilizan una configuración de diodos esafásicos en la entrada, que generan una corriente distorsionada, tanto en régimen estable como en condiciones de falla [1]. Para lograr en todo momento la continuidad de la forma de onda de la tensión con las características requeridas por la carga y con el mínimo

posible de THDv tanto en el lado de la carga como en la entrada del transformador de alimentación, se pueden usar diferentes dispositivos: uno de los más eficientes es el UPS. La mayoría de los sistemas UPS son diseñados con convertidores de entrada tipo esafásicos, pero estos ocasionan un contenido armónico más elevado comparado con un convertidor dodecafásico (ver expresión (1)). El esquema clásico de un UPS con convertidor dodecafásico se muestra en la Figura 1.

Como se observa en la figura, la entrada del UPS es a través de un transformador trifásico, donde los secundarios están conectados en delta y estrella para lograr que las salidas del transformador estén desfasadas 30° entre ellos. Por lo que, arreglando el valor de la tensión para que en las dos salidas haya el mismo valor, se alimentan los dos convertidores de manera tal que cada uno hace seis conmutaciones en cada período de la tensión de red, es decir, cada 16.66 ms. Se consigue un desfase de 30° desde la entrada del transformador de alimentación, de manera que son vistos como un solo convertidor dodecafásico [2]. Este efecto permite una reducción de armónicos, ya sea en el lado de corriente alterna como en el de corriente directa [2],[3], o sea, hacia las baterías.

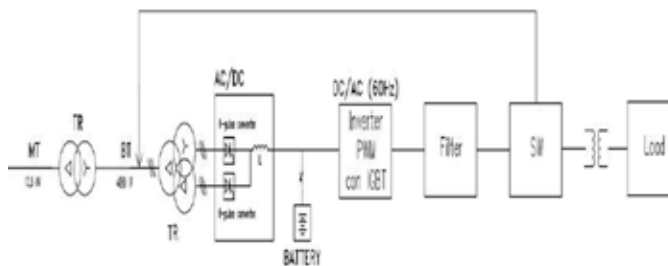


Figura 1. Esquema clásico de un UPS con convertidor dodecafásico.

El contenido de armónicos de corriente generado en un convertidor que trabaja en condiciones ideales, es decir, alimentado con potencia de cortocircuito infinita, se define con la siguiente ecuación:

$$n = kp \pm 1 \text{ con } I_n = I/n \quad (1)$$

donde  $n$  es el orden del armónico,  $k$  es un número entero (1, 2, 3, ...),  $p$  es el número de pulsos de cada período de la tensión e  $I_n$  es la amplitud del armónico de orden  $n$ .

En este caso, si los dos convertidores trabajan de manera correcta, la 5ª y la 7ª armónica (las más elevadas en módulo) desaparecen [3] y la primera armónica en el lado de corriente alterna (a.c.) será la armónica 11ª, la cual se puede reducir en gran medida si se introduce un filtro shunt con una buena eficiencia, logrando también reducir, aunque, en menor medida la armónica 13ª [4] y las sucesivas.

En el lado de corriente directa el convertidor dodecafásico alimenta siempre y controladamente las baterías con un rizo reducido en relación a un convertidor esafásico. La siguiente etapa es un filtro de primer orden (inductor) cuya función es reducir aún más el rizo, aumentando por esta razón la vida útil de las baterías que son un elemento importante para garantizar la autonomía que el UPS pueda brindar a los equipos puesto que realizan las siguientes funciones:

- Eliminan el pequeño residuo del rizo en el lado de corriente directa mejorando la calidad del PWM (*Pulse Width Modulation*) del inversor.
- En función de la cantidad de Amper-hora total, fijan la autonomía necesaria para la carga que alimenta en condiciones de ausencia de energía eléctrica.

La autonomía del UPS tiene que ser suficiente, como mínimo para el tiempo necesario de la operación quirúrgica más larga que se puede afrontar en el hospital. Debido a ello, los tiempos requeridos de autonomía pueden ser considerables; por eso todas las posibilidades deben ser tomadas en cuenta para maximizar la garantía de continuidad absoluta de energía. En condiciones de ausencia de alimentación prolongada, debe existir la posibilidad de cargar la entrada del UPS a través de una planta eléctrica externa, de forma que se garantice una entrada de energía que conlleve a mantener la condición de autonomía para abastecer con seguridad el servicio requerido. Naturalmente, la autonomía de las baterías es proporcional a la carga real del UPS, entonces es mayor cuanto menor es la carga. El Departamento de Mantenimiento del hospital debe contar con un plan de acción en caso de ausencia de energía eléctrica en la entrada, tal como:

**Paso 1 (Maximización de la autonomía):** proceder a desconectar coordinadamente, en forma automática o manual, con un criterio técnico basado en la necesidad médica, las cargas bajo UPS que no sean vitales en este período de tiempo, para aumentar la autonomía establecida de la máquina.

**Paso 2:** en caso de extenderse la ausencia de energía, realizar una interconexión a una planta externa, de forma que el sistema pueda seguir funcionando normalmente con un flujo de entrada continuo.

## 2. Inversor

Tal como hemos visto anteriormente, la eliminación del rizo en el lado de corriente directa permite al inversor trabajar en condiciones óptimas. Este tiene que trabajar con una portadora a frecuencia bastante elevada como en la figuras 2 y 3. Así que la primera armónica de tensión, que se encuentra antes del filtro de salida, es de valor muy elevado [5], por ello este filtrado es indispensable para garantizar una salida óptima hacia la carga, es decir, con THDv insignificante.

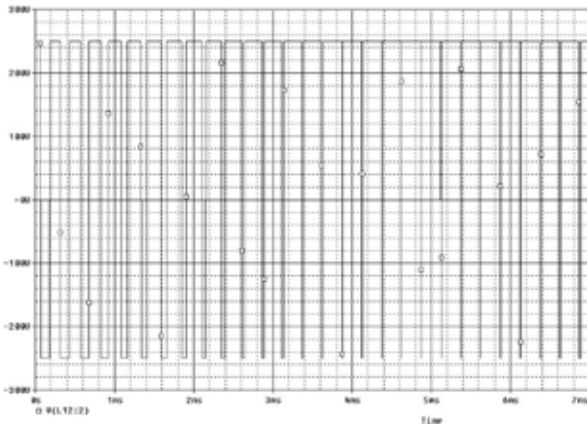


Figura 2. Simulación de la portadora y modulante de un inversor que trabaja en PWM.

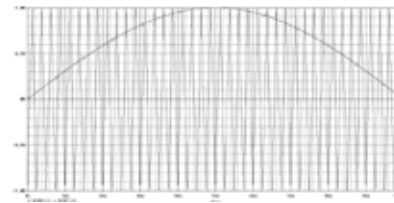


Figura 3. Forma de onda del inversor del UPS modulada con portadora sinusoidal, como aparece en la figura 2.

Arreglando el ciclo de trabajo de la portadora en función de la variabilidad del valor eficaz del voltaje de salida, el voltaje será estable en la carga.

Es oportuno recordar que un inversor a PWM con el cociente  $m_f$ , entre la frecuencia de la portadora y de la modulante  $m_f = f_p/f_1$ , el contenido armónico es del tipo [5]:  $m_f \pm 2 = 31.8\%$ ,  $m_f \pm 4 = 1.85\%$ ,  $2m_f \pm 1 = 18.1\%$ ,  $2m_f \pm 3 = 21.2\%$ ,  $2m_f \pm 5 = 3.3\%$ , etc.

Si la frecuencia de la portadora es 3Khz, la primera armónica de voltaje que se encuentra en el ancho de banda es 2.88Khz.

## 3. UPS modificado

La implementación del UPS utilizado es un poco diferente por las características y necesidades propias del hospital analizado. El esquema diseñado se muestra en la siguiente figura:

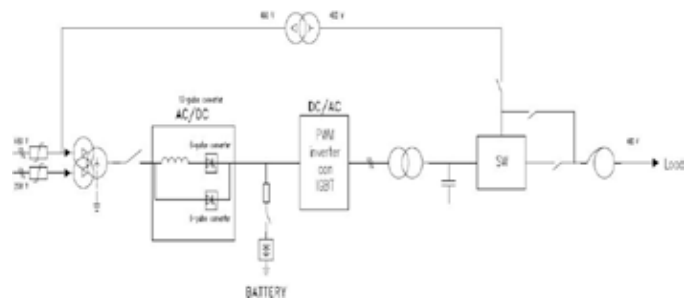


Figura 4. Esquema real con posibilidad de dos alimentaciones para poder garantizar la utilización de plantas externas.

La diferencia más importante con el esquema clásico es que el transformador tiene solo un secundario y dos primarios, lo que permite utilizar, para la alimentación de entrada, dos posibles voltajes, o sea 208 Veff y 480 Veff. Se optó por esta solución para tener una mayor garantía que, en caso de una ausencia de energía por un tiempo prolongado, la unidad puede ser alimentada desde un Grupo Electrógeno que estuviera disponible a cualquiera de los valores de tensión, condición que aumenta la posibilidad de continuidad de alimentación de entrada del UPS, pero se debe tomar en cuenta la compatibilidad de la relación entre la potencia aparente de la misma planta con la potencia aparente del UPS como se describe en [6]. Sin embargo, es de fundamental importancia limitar el THDV entre rangos aceptables ( $THDV \leq 8\%$ ), cuando se alimenta el UPS con una Planta Eléctrica. Si se alimenta el UPS con un transformador los daños generados por una THDV

pueden ser evidentes en un tiempo más o menos largo, pero con una alimentación de planta eléctrica se podría ver una inestabilidad de la regulación del voltaje y el generador podría apagarse [6].

En el esquema de la Figura 4 el desfase de 30° se consigue con el inductor que se encuentra antes de uno de los dos convertidores y el voltaje se arregla con el transformador instalado delante del segundo convertidor. Es importante decir que por razones de las cargas eléctricas fue necesario sobredimensionar los IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) del inversor, de forma que trabajan bien por más de 60 seg. al 150% de su potencia nominal.

Esto es a consecuencia de que en las máquinas para imágenes, el pico de corriente puede ser también de 10 a 15 veces el valor de la corriente de régimen por tiempos comprendidos entre 5 o 6ms [Tabla 1].

Tabla 1. Factores de carga de diferentes equipos.

	Continuous Power Demand (KVa)	Max momentary current (Amp.)	
Angiógrafo	20	228	0.90
Tomógrafo	30	125	0.85
Resonancia Magnética	18	88	0.90
Fluoroscopio	4.6	151	0.73

También en esta condición operativa el voltaje del UPS no tiene que distorsionar y por esto se ha utilizado un auto transformador de salida con una Vcc muy baja (≈1%). La inductancia para filtrar la forma de onda de la Fig. 3 es la reactancia equivalente del transformador que se encuentra antes de los Interruptores (SW); ésta, junto con los capacitores, constituyen un filtro LC que ve una carga con PF≈1, entonces es casi resistiva.

#### 4. Filtro de salida del UPS

La función de transferencia de este filtro está dada por:

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + (\omega LG)^2}} \quad (2)$$

en donde  $\omega_0$  es la frecuencia natural de LC y G la conductancia equivalente de la carga. En función de la portante elevada y de la resistencia equivalente de la carga, el módulo de la función de transferencia se puede reducir, con buena aproximación, de la siguiente manera:

$$|H| \cong \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 = \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \quad (3)$$

Se establece un valor para |H| en un primer momento muy pequeño (lo que equivale a  $\omega_0$  baja), en el ancho de banda que se quiere reducir, o sea, empezando de  $(mf - 2)$ ; entonces si es conocida

L (debida a la potencia de cortocircuito del autotransformador) y el valor de |H|, se puede conocer también la capacidad del filtro. Si la frecuencia de la portante es  $f = 3\text{KHz}$  ( $50^\circ\text{arm.}$ ), si por ejemplo se hace  $f_0 = 8^\circ$  armónica, resulta  $|H| \approx 0.03$ , o sea, la primera armónica del inversor es reducida desde el 31.8% al 0.8%; tal y como se muestra en el gráfico de la Figura 5.

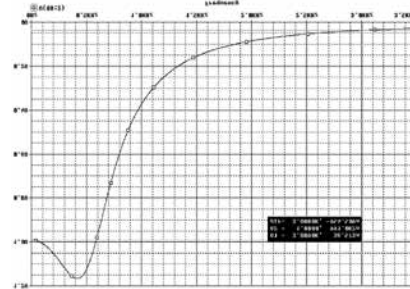


Figura 5. Función de transferencia del filtro de salida del inversor.

En la Figura 6 se puede ver la forma de onda a la salida del inversor, la cual será todavía filtrada por la inductancia de la línea hasta la carga (≈65μH); en esta situación operativa el THDv resulta ≤1%

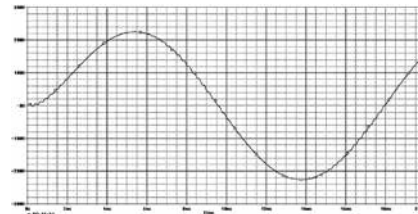


Figura 6. Forma de onda sinusoidal después del filtro a la salida de UPS.

#### 5. Filtro del lado de la alimentación

Para calcular los datos necesarios y evaluar la eficiencia del filtro shunt hacia el transformador de alimentación tenemos que:

- El voltaje de cortocircuito del transformador de 300KVA que alimenta el UPS ( $V_{ccTR} \%$ ) se toma como un 5%, entonces la potencia de cortocircuito del transformador que alimenta el UPS es:

$$S_{ccTR} = 300\text{KVA} \times 20 = 6 \text{ MVA}$$

- La media tensión (MT) tiene una corriente de cortocircuito de 5,710A con  $V_{eff} = 13.2 \text{ KV}$ , entonces su potencia de cortocircuito  $S_{ccMT} = 130 \text{ MVA}$ . Conocido este valor se puede aplicar la siguiente ecuación (4) para calcular la impedancia  $Z_{eq}$  vista de la entrada de la UPS a la entrada de la red:

$$Z_{eq} = Z_{TR} + Z_{redMT} = Z_{TR} \left(1 + \frac{Z_{redMT}}{Z_{TR}}\right) \quad (4)$$

La impedancia de cortocircuito es inversamente proporcional a la potencia de cortocircuito, o sea  $S_{cc} = V^2/Z_{eq}$ .

Entonces podemos decir que la impedancia equivalente vista del lado de baja tensión (BT) es:



$$Z_{eq} = Z_{TR} \left( 1 + \frac{S_{ocTR}}{S_{cared}} \right) = Z_{TR}(1.046) \approx Z_{TR}$$

Esto significa que la impedancia vista desde la entrada de el UPS es aproximadamente el valor de la impedancia del transformador. Por lo tanto, ZTR vale:

$$Z_{TR} = \frac{V^2}{S_{ocTR}} = \frac{480^2}{6 \times 10^6} = 3.84 \times 10^{-2} \Omega$$

Este valor se emplea para evaluar su eficiencia y demostrar cómo se reduce el contenido de armónicos de voltaje (THDv) en la red.

El filtro se puede desarrollar haciendo la relación cerca de la primera armónica de corriente que se encuentra generada del convertidor dodecafásico, es decir, la 11° armónica y verificar que hay una reducción también de las componentes armónicas sucesivas (arm. 13°, 23°, 25°...).

El filtro shunt tiene que hacer dos funciones:

- la compensación constante fija del reactivo inductivo de la fundamental de corriente debido a la regulación del convertidor dodecafásico;
- reducir el contenido armónico de corriente y, por ende, del voltaje lado BT. A través de mediciones se evaluó en 45 KVA la potencia reactiva capacitiva para una compensación a un FP (factor de potencia) más o menos de 0.98; esto significa 15 KVA cada fase. El valor de la capacidad se calcula según el esquema de la Figura 1 con la expresión (6).

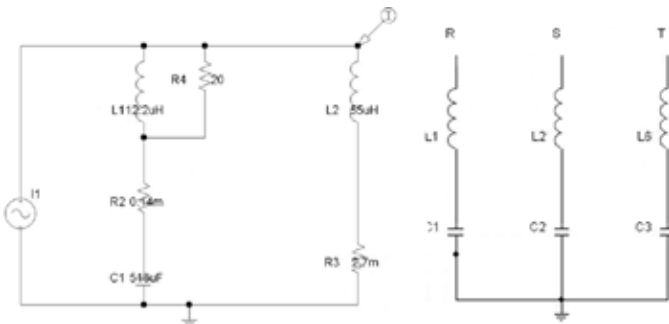


Figura 7. Esquema del filtro conectado a estrella y sin resistencia serie equivalente. En realidad, en bajo voltaje, los condensadores serán conectados en delta.

Si la potencia reactiva capacitiva es de 45 KVA con voltaje 480 V, entonces:

$$(6) \quad \frac{n^2}{n^2 - 1} V^2 \omega C = 45000 \quad \text{o sea } C = 518 \times 10^{-6} \text{ F}$$

en donde  $n$  es el orden de multiplicidad armónica y  $n^2/(n^2 - 1)$  evalúa la sobre-elevación del voltaje en los condensadores del filtro shunt.

El valor de la inductancia se puede calcular con la expresión:

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \quad L = \frac{1}{\omega^2 C} = 122.2 \mu\text{H}$$

para la componente armónica 11° [6].

Se debe también calcular el valor de la resistencia en serie del inductor que sirve para evaluar su calentamiento (pérdida de potencia activa) y la eficiencia del filtro. Por esto, se necesita un inductor que tenga una pequeña resistencia a la frecuencia de la armónica que se debe reducir, o sea, en este caso la componente 11°. En general, para estos inductores contruidos en material magnético, el factor de calidad  $Q = (n\omega L)/(ReqL)$  tiene un orden de magnitud de 30, entonces se puede decir que la ReqL del filtro es 13mΩ por  $n = 11^\circ$  arm.

Ahora los datos se conocen y se puede hacer una simulación para ver su comportamiento y su eficiencia. El esquema utilizado es aquel de la Fig. 8 en donde el paralelo con el inductor L1 aparece una resistencia cuya función es reducir una posible resonancia en paralelo.

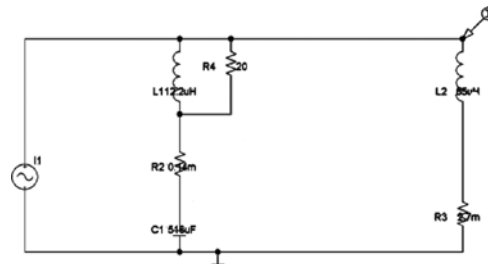


Figura 8. Esquema monofásico utilizado para evaluar la eficiencia del filtro.

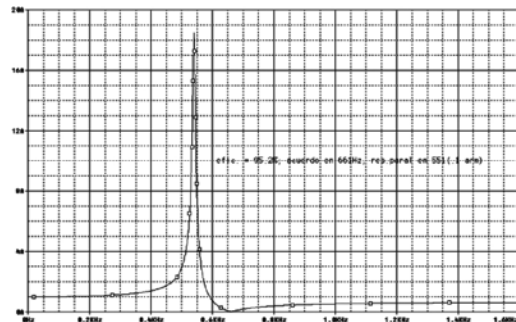


Figura 9. Gráfico en el dominio de la frecuencia.

En la Figura 9 se observa la respuesta en la frecuencia del filtro, con una eficiencia del 95% a la 11° arm. y de 60% a la 13° arm.; también se reducen los armónicos superiores a la 13° arm. La resonancia paralelo se encuentra en  $n = 9.1$ . También se puede observar que se reducen un poco ( $\approx 30\%$ ) las componentes armónicas 23 y 24.

La potencia de la resistencia paralelo al inductor R4 tiene que ser evaluada en el punto de frecuencia donde tiene la máxima amplificación de corriente (frecuencia de resonancia paralelo), entonces es suficiente dar al generador de corriente el valor real de la corriente de 11° arm generada desde el UPS (32.2 Aeff a la potencia nominal) para verificar que, en condiciones de resonancia paralelo, la caída en el inductor es de 300V, equivalente a una potencia sobre el resistor de 3 KW; pero

en condiciones de régimen y fuera de cualquier resonancia, la potencia es menor de 1 W, entonces en condiciones normales de operación, no hay una disipación significativa de energía. Se podría también asumir que a frecuencia mas baja la resonancia paralelo se encontraría a un valor de frecuencia con mayor seguridad. Pero como se puede ver en la Figura 10, se pierde un poco en eficiencia.

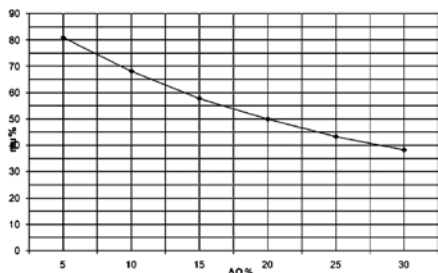


Figura 10. Pérdida de eficiencia del filtro cuando disminuye la frecuencia de resonancia.

Por otro lado, la Norma Std 519 (USA) define los límites de corriente de distorsión (Max THDi) en función de ISC/IL, siendo ISC la corriente de cortocircuito en el PCC (Punto de Conexión Común), e IL la corriente nominal.

Por los datos que tenemos, resulta:

$$\frac{I_{SC}}{I_L} \cong 60$$

y por este valor del TDD (Total Demand Distorsión) aceptable es  $\leq 12\%$ . Entonces, se evaluarán los valores más elevados de corrientes armónicas que se inyectan en la red en la condición operativa de UPS. Recordando la reducción del 11° y 13° arm debido al filtro shunt y tomando como hipótesis de que las corrientes armónicas son calculadas bajo la premisa que el ángulo de sobre posición de los tiristores (overlap) es igual a cero (condición ideal correspondiente a una potencia de cortocircuito infinita).

Los valores calculados son: 11° arm. = 0.55 A, 13° arm. = 3.7 A, 23° arm. = 5.2 A, 25° arm. = 4.8 A. Aplicando la siguiente fórmula:

$$I_{TDD} \times 100 = \frac{\sqrt{\sum I_n^2}}{I_L} = 6.5\% < 12\%$$

se demuestra que la distorsión total de corriente resulta un poco más de la mitad del valor permitido y el THDv  $\leq 1\%$  como se ha dicho antes. Medidas experimentales confirman este dato.

## Conclusiones

La seguridad en los sistemas eléctricos hospitalarios es de fundamental importancia para el diagnóstico médico por imágenes, asegurando la mejor calidad posible de alimentación eléctrica, para evitar los problemas típicos de las redes de baja y media tensión (transitorios, flicker, armónicos, caída total del voltaje). Ya sea por uso en operaciones de cirugía muy sensitivas, se asegura también la continuidad absoluta por el tiempo necesario para dichos procedimientos médicos.

En este artículo se han descrito las características necesarias para un UPS dedicado a esta utilización, poniendo en evidencia los parámetros del sistema UPS-trasformador de forma que se pueda optimizar la salida de la máquina y la compatibilidad UPS vs alimentación eléctrica.

## Agradecimiento

Este documento ha sido concebido con el propósito de mantener una bibliografía especializada técnica para el Hospital Nacional, institución hospitalaria pionera en el uso del sistema eficiente de respaldo UPS en Panamá para protección eléctrica de equipos altamente sensibles y de diagnósticos, a la que agradecemos profundamente la colaboración en todo momento para el desarrollo de este documento.

Igualmente, al Ingeniero Mauro Loggini, experto Profesor de la Universidad Bologna y Ferrara por su valiosa asesoría técnica en temas de eficiencia energética y protección eficiente de sistemas eléctricos.

## Referencias

- [1] "IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters" IEEE 519.
- [2] Albert Kloss, BBC "A Basic Guide to Power Electronics" John Wiley & Sons 1984.
- [3] J.Arrillaga, L.I.Eguiluz, "Armonicos en Sistemas de Potencia" Universidad de Cantabria Electra de Viesgo, 1994.
- [4] D.E.Steeper, R.P. Stratford, "Reactive Compensation and Harmonic Suppression for Industrial Power Systems using Thyristor Converters" IEEE Trans.I.A., vol IA-12 No..3, 1976.
- [5] Ned Mohan, Tore M.Undeland, William P.Robbins "Power Electronics: Converters, applications and Design" John Wiley & Sons 1989.
- [6] Chloride Silectron Consulting "La progettazione dell'alimentazione elettrica con gruppi statici di continuità", seconda edizione 12 febbraio 2002.

# Diseño de un sistema híbrido de generación eléctrica a partir de fuentes renovables de energía

## [ Caso de Boca de Lurá ]

**Miguel Him Díaz**

Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria  
Universidad Tecnológica de Panamá  
miguel.him@utp.ac.pa

**Tipo de artículo:** original

**Fecha de recepción:** 17 de julio de 2013

**Fecha de aceptación:** 19 de noviembre de 2013

**Resumen:** este artículo presenta el procedimiento aplicado para el diseño de un sistema híbrido de generación eléctrica. Se detalla el caso de la comunidad de Boca de Lurá, en la provincia de Coclé. Allí se evaluó, diseñó, construyó, instaló y caracterizó un sistema híbrido eólico-solar fotovoltaico de una capacidad de 2.17 kW. Este sistema provee electricidad al Centro Básico Escolar de la comunidad, el cual es un centro de acopio para comunidades aledañas.

**Palabras claves:** comunidad rural, fuentes renovables de energía, sistema eólico, sistema híbrido, sistema solar fotovoltaico.

**Title:** Design of an Hybrid Electric Generation System From Renewable Energy Sources –Case of Boca de Lurá.

**Abstract:** this article presents the procedure applied for the design of a hybrid system of electrical generation. It is detailed the case of the community of Boca de Lurá, in the Coclé province. A photovoltaic wind-solar hybrid system of 2.17 kW was evaluated, designed, built, installed and characterized. This system provides electricity to the School Basic Center of the community, which is a center of gathering for surrounding communities.

**Keywords:** hybrid system, renewable energy sources, rural community, solar photovoltaic system, wind system.

## 1. Introducción

El aumento del costo de los combustibles fósiles y su impacto en nuestro medio ambiente, hace que cada día crezca más la necesidad de impulsar el estudio y la implementación de tecnologías de energías renovables para suplir, al menos, parte de la demanda energética y reducir los efectos de los gases de efecto invernadero.

Según cifras de la Agencia Internacional de la Energía [1], en nuestro planeta hay más de 1.3 billones de personas que no cuentan

con acceso al recurso eléctrico, de los cuales el 84% se encuentran en áreas rurales. En Panamá, según datos del Censo Nacional realizado en el año 2010 [2], hay más de 80,000 viviendas sin electricidad, en su mayoría en áreas rurales. La lejanía de estas comunidades rurales hace difícil la expansión de las redes eléctricas para abastecerles del servicio, por lo que los sistemas aislados de generación eléctrica se presentan como alternativas atractivas.

El laboratorio de Energía del Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI) de la Universidad Tecnológica de Panamá, ha trabajado desde el año 2006 en actividades de I+D+i en el área de energías renovables, con el fin de promover y desarrollar sistemas energéticos que sean tanto económica como técnicamente viables, ayudando así a integrar e impulsar a los sectores más apartados de nuestro país.

Producto de este interés, nace el proyecto llamado “Desarrollo de un Sistema Híbrido de Generación Eléctrica para aplicaciones en Áreas Rurales” patrocinado por la Secretaría Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación (SENACYT) en el año 2009. En este proyecto se desarrolló un sistema híbrido para suplir parte de las necesidades de la comunidad de Boca de Lurá, de la provincia de Coclé. En este artículo se presentarán las generalidades del sistema híbrido y los pasos a seguir para emular el instalado en Boca de Lurá.

## 2. Sistemas de energía renovable y sistemas híbridos

Se considera energía renovable cualquier forma de energía que es reabastecida naturalmente. Entre éstas tenemos la energía proveniente de la luz solar, el viento, la lluvia, las mareas, calor geotérmico y la biomasa. Existen diversas tecnologías de energía renovable, utilizadas para diferentes aplicaciones. En la siguiente tabla se presentan algunas de estas aplicaciones:

**Tabla 1.**  
Tecnologías de energía renovable y aplicaciones [3]

Tecnología	Aplicación	Lugar de aplicación
Solar fotovoltaico	Electricidad residencial e industrial	Mayormente urbano
Sistemas solares caseros	Iluminación	Urbano y rural
Solar térmica	Electricidad residencial e industrial	Mayormente urbano
Secadores solares	Secado de cosechas	Mayormente rural
Turbinas eólicas	Electricidad residencial e industrial	Urbano y rural
Biomasa sólida	Cocina e iluminación	Rural
Hídrico	Iluminación y procesos para industrias pequeñas	Rural

Sin embargo, la utilización de una sola fuente de energía para satisfacer las necesidades de un sistema, produce ciertos inconvenientes, el principal de ellos, la disponibilidad del recurso para su aprovechamiento. Por ejemplo, la energía solar la tenemos en horas de la mañana, lo que



significa que de noche no la podemos aprovechar; el recurso hídrico es mayor en los ríos y lagos en la temporada lluviosa, y escaso en temporada seca. Ante esta situación, resulta complejo diseñar un sistema de generación eléctrica confiable y suficiente para suplir las necesidades de una comunidad. Ante esta situación, los sistemas híbridos de generación eléctrica presentan grandes ventajas.

Un sistema híbrido es aquél que aprovecha dos o más fuentes de energía para suministrar la energía requerida. Un buen diseño de un sistema híbrido busca:

- Garantizar la generación de la energía necesaria.
- Minimizar la dependencia del sistema de almacenamiento.
- Optimizar el aprovechamiento de los recursos energéticos.
- Disminuir los costos del sistema, de la instalación y los costos operativos.

Existen diferentes configuraciones de sistemas híbridos, dependiendo del tipo de fuente y de los tipos de cargas a instalar (ya sea en corriente directa DC, o en corriente alterna AC). A continuación se presentan algunos esquemas de sistemas híbridos de generación eléctrica a partir de fuentes renovables de energía.

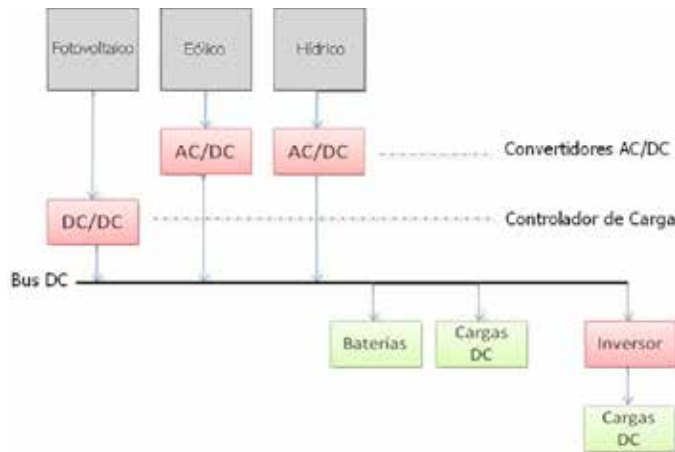


Figura 1. Sistema híbrido para cargas de corriente directa [4].

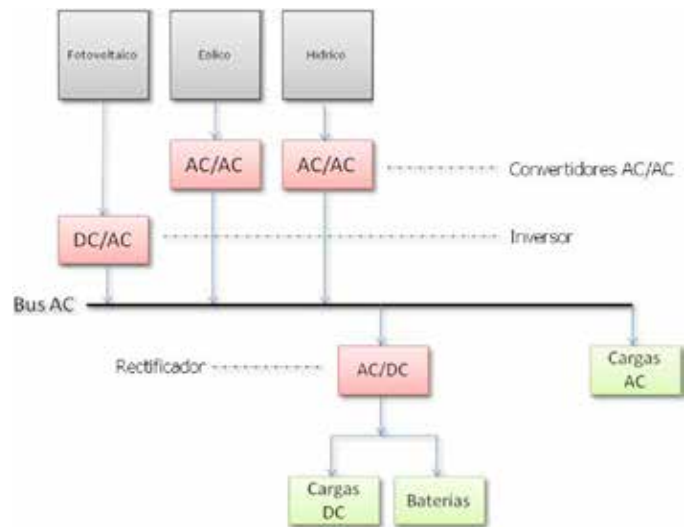


Figura 2. Sistema híbrido para cargas de corriente alterna [4].

Cada sistema tiene sus ventajas, dependiendo del tipo de sistema de generación a utilizar, el uso final y la disponibilidad de materiales para la instalación. Para el caso de Boca de Lurá, se decidió utilizar un tipo de sistema como el mostrado en la Figura 2.

### 3. Cálculo de la carga del sistema

La comunidad de Boca de Lurá se encuentra en una región aislada de la red eléctrica, lo que condujo a realizar una estimación de la demanda requerida y de la capacidad del sistema híbrido a instalar. El sistema híbrido se instaló en el centro básico de la comunidad por ser un centro de acopio para otras comunidades, pero también se contempló que la electrificación de la escuela permitiría, en un futuro, habilitarla para fortalecer la educación: principalmente de los niños de la escuela, pero también del resto de la población.

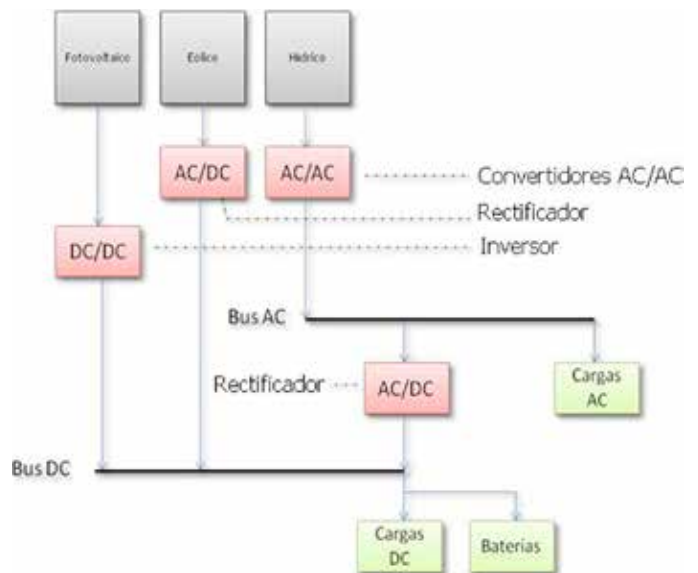


Figura 3. Sistema híbrido para cargas AC y DC [4].

En base a estas consideraciones, se decidió que en la escuela se instalarían luminarias y una toma eléctrica en cada habitación. Estas tomas sirvieron para habilitar un centro de cómputo, el cual fue desarrollado con fondos de la SENACYT por el mismo grupo investigador que desarrolló el proyecto de electrificación en Boca de Lurá.

Se consideró, además, que las luces serían utilizadas por un espacio de ocho horas diaria y los tomacorrientes, por un espacio de dos horas, lo que nos da un promedio de consumo diario aproximado de 2 kWh. La siguiente figura muestra la carga estimada de la escuela.

CIRCUITO	SÍMBOLO	POTENCIA	CANTIDAD	TOTAL
PD CIRCUITO 1	 LUMINARIA	30 W	2	60 W
	 LUMINARIA	50 W	4	200 W
	 TOMA	200 W	3	600 W
PD CIRCUITO 2	 LUMINARIA	50 W	9	450 W
	 TOMA	200 W	2	400 W
CARGA TOTAL				1710 W

Figura 4. Carga estimada para el Centro Escolar Básico de Boca de Lurá [5].

#### 4. Diseño del sistema híbrido

Luego de estimada la carga, se procedió a determinar la capacidad mínima del sistema híbrido. Para esto se requirió considerar: el potencial solar de la región, el potencial eólico de la región, las pérdidas del sistema y la autonomía del sistema.

##### 4.1. Potencial solar de la región

El potencial solar fue estimado en base al mínimo promedio de radiación solar mensual en Boca de Lurá. Este promedio fue obtenido a través del sitio web de Meteorología Superficial y Energía Solar [6] del Programa de Ciencias Aplicadas de la Agencia Estadounidense del Espacio y la Aeronáutica (NASA, por sus siglas en inglés). En este sitio se introdujo la posición geográfica de Boca de Lurá (latitud y longitud) y se utilizó como referencia el promedio de radiación normal directa de los últimos 22 años. Estos resultados indicaron que el potencial promedio de radiación solar es de 4.54 horas pico, lo que quiere decir que un sistema solar fotovoltaico de capacidad de 1kW puede generar, en condiciones estándares de prueba (temperatura de la celda solar de 25°C, radiación solar de 1000W/m<sup>2</sup>, masa de aire 1.5), 4.54kWh de energía eléctrica.

##### 4.2. Potencial eólico de la región

En Panamá no existe un mapa con suficiente información que permita estimar adecuadamente el potencial eólico. Por ello, se utilizó información de la estación meteorológica más cercana a la comunidad de la cual se poseía información, ajustando el potencial a la altura de instalación del generador eólico. Adicionalmente, se determinó la

curva de potencia del generador adquirido, utilizando unos abanicos que forman parte de un futuro túnel de viento del Laboratorio de Energía del CINEMI y el programa MATLAB. Estos resultados fueron agregados al programa Windographer, el cual estimó un promedio de generación eléctrica mensual de 87.88kWh, lo que significa que podría extraerse aproximadamente unos 3kWh diarios.

#### 4.3. Pérdidas del sistema

El sistema fue diseñado con la finalidad de reducir las pérdidas tanto en conversión de la energía como en transmisión. Por ello, el tamaño de los conductores fue seleccionado para que las pérdidas de transmisión no superaran el 5%. El inversor utilizado provee energía eléctrica de buena calidad (onda senoidal) con una eficiencia máxima de 93%. En materia de generación, al momento de la compra, los equipos adquiridos no estaban entre los más eficientes del mercado local, mas sí entre los mejores en materia de costo – capacidad de generación. El generador eólico utilizado provee una eficiencia aproximada de 85% en condiciones nominales y los paneles solares, una eficiencia de 12% en condiciones estándares de prueba.

#### 4.4. Autonomía del sistema

Para garantizar el suministro eléctrico cuando el recurso solar y eólico es limitado, se instaló un banco de baterías de capacidad de 12,000Wh. Considerando el consumo estimado, el sistema posee una autonomía aproximada de seis días. Si bien puede ser considerado que este periodo de autonomía es bastante extenso, también cabe recordar que en la escuela se está instalando un sistema de cómputo, por lo que se espera un mayor consumo eléctrico y por ende, la posible reducción de tiempo de autonomía.

#### 5. Instalación del sistema

Primeramente se dibujaron los planos de instalación (algunos de los cuales se muestran a continuación), los cuales fueron revisados por la Dirección de Ingeniería y Arquitectura (anteriormente Centro de Proyectos) de la Universidad Tecnológica de Panamá. Una vez consideradas las observaciones emitidas por ellos, los planos fueron entregados, a Ingeniería Municipal de Penonomé y al Cuerpo de Bomberos de Penonomé, para su aprobación. Con la aprobación de los planos se procedió a realizar la instalación en Boca de Lurá.

En los planos se presentaron los siguientes detalles:

- Esquema erección de la torre del generador eólico, la cual incluyó el diseño de las cimentaciones de la base de la torre eólica, las cimentaciones de los puntos de anclaje, los cables de soporte, el diámetro y tipo de tuberías, uniones de los diversos accesorios y las líneas de transmisión eléctrica del generador eólico hacia el cuarto de control.
- Esquema de instalación del sistema solar fotovoltaico, donde se muestra la estructura de soporte de los paneles solares, la instalación de los paneles sobre la estructura y su conexión hacia el cuarto de control.
- Esquema de instalación de los sistemas de generación hacia el cuarto de control, con sus respectivos elementos de desconexión y protección.

- Esquema de la instalación eléctrica desde el cuarto de control hacia el panel de distribución y los circuitos ramales ubicados en el centro escolar.

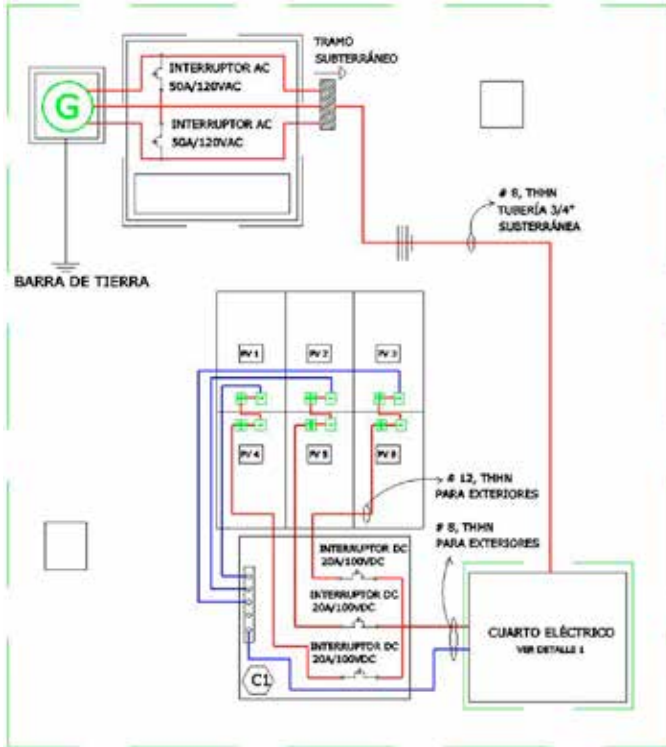


Figura 5. Esquema de conexión de los sistemas eólico y solar fotovoltaico al cuarto de control.

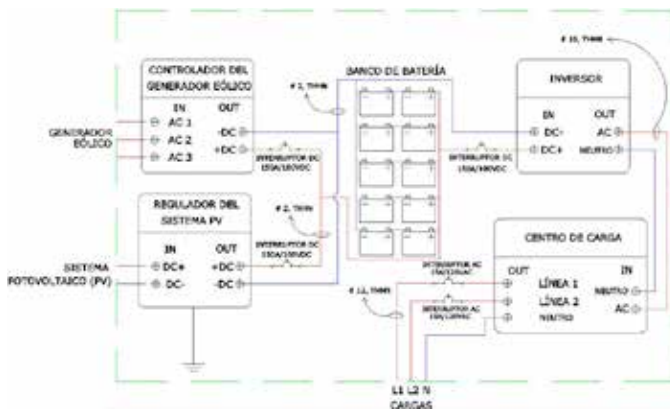


Figura 6. Esquema de conexión en el cuarto de control.

## 6. Capacitación y seguimiento

Finalizada la instalación del sistema híbrido, se realizaron diversas giras de capacitación sobre el uso del sistema. En estas giras se les explicó a los miembros de la comunidad cómo operar el

sistema híbrido, y qué hacer, en caso de encontrar alguna anomalía o falla en el sistema. Adicionalmente, se les entregó un manual impreso con el detalle de las capacitaciones.

Durante esas visitas también se revisó el estado de la instalación: se verificó que las cimentaciones estuvieran en buen estado, que no hubiera corrosión, ni en los cables de soporte ni en la torre eólica; también se verificó que los cables eléctricos no tuvieran ningún daño y que todo el sistema funcionara adecuadamente: los generadores eléctricos, los controladores, el inversor, las baterías, los medios de desconexión, los fusibles, todas las luminarias y los tomacorrientes.

## 7. Conclusiones y comentarios

El procedimiento aplicado para el estudio, diseño e instalación del sistema híbrido en Boca de Lurá demostró ser exitoso. Los potenciales beneficios de este sistema podrán ser apreciados en el futuro, a medida que la comunidad comience a desarrollar actividades con el recurso eléctrico. Es importante darle seguimiento al uso adecuado del sistema, dado que los equipos y componentes de este sistema son costosos y las comunidades rurales suelen no tener recursos económicos para reemplazar estos equipos.

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Secretaría Nacional de Ciencias, Tecnología e Innovación, a quien se le agradece el apoyo y la confianza depositada en este proyecto. También se agradece la colaboración del Centro de Proyectos de la UTP por la revisión de los planos, el transporte brindado por la Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión, y el apoyo logístico, por parte del Ing. Efraín Conte, del Centro Regional de Coclé.

## Referencias

- [1] World Energy Outlook 2011. Energy for all: Financing Access for the poor. Presentado en la conferencia de Energía en Oslo, Noruega, el 10 de octubre de 2011.
- [2] Instituto Nacional de Estadística y Censo. [Online]. Disponible en: [http://estadisticas.contraloria.gob.pa/incec/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=LP2010&MAIN=WebServerMain\\_censos.inl](http://estadisticas.contraloria.gob.pa/incec/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=LP2010&MAIN=WebServerMain_censos.inl)
- [3] Renewables 2007: Global Status Report, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century REN21.
- [4] Desarrollo de un Sistema Híbrido de Generación Eléctrica para Aplicaciones en Áreas Rurales. Informe Técnico y Financiero Etapa 1 - SENACYT. 15 de junio de 2010.
- [5] Desarrollo de un Sistema Híbrido de Generación Eléctrica para Aplicaciones en Áreas Rurales. Informe Técnico y Financiero Etapa 2 - SENACYT. 13 de mayo de 2011.
- [6] Surface meteorology and Solar Energy (release 6.0). [Online]. Disponible en: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>



# La Batalla de las Corrientes: Edison, Tesla y el nacimiento del sistema de potencia

Ronald Y. Barazarte

Universidad Tecnológica de Panamá  
Facultad de Ingeniería Eléctrica  
ronald.barazarte@utp.ac.pa

**Resumen:** existe una importante actividad científica conducente a la modernización del sistema eléctrico de potencia y son muchas las nuevas características requeridas en términos de confiabilidad, eficiencia e integración de energías renovables. Sin embargo, es imposible desarrollar las tecnologías necesarias para la evolución del sistema eléctrico sin conocer la historia de su evolución, que ha dado como resultado la arquitectura de sistemas de potencia y distribución eléctrica que tenemos hoy día. Este artículo presenta una reseña histórica de la evolución de los sistemas de suministro eléctrico, hasta llegar al sistema de potencia moderno. Se introducen los eventos más relevantes que dieron forma al sistema eléctrico de corriente alterna, así como los personajes involucrados en este proceso. El artículo inicia con los esfuerzos de Edison para mejorar la bombilla y sus consecuentes desarrollos en sistemas de distribución eléctrica de corriente alterna mediante la Edison General Electric Company. Luego se introduce la figura de Nikola Tesla y su involucramiento con Edison en sistemas DC. También se mencionan las acciones incurridas por Westinghouse en el sector eléctrico, y que originaron la competencia entre las compañías promotoras de sistemas DC y AC. En ese punto, se presentan los eventos ocurridos durante el periodo conocido como la guerra de las corrientes, los cuales concluyen con las demostraciones exitosas de Westinghouse del sistema de distribución en AC, especialmente en la feria mundial de Chicago de 1893.

**Palabras claves:** corriente alterna, corriente directa, guerra de las corrientes, suministro eléctrico.

**Title:** War of Currents: Edison, Tesla, and the Birth of the Power System.

**Abstract:** there is an important scientific activity conducive to the modernization of the electric power system and there are many new features required in terms of reliability, efficiency and integration of renewable energies. However, it is impossible to develop the technologies necessary for the development of the electrical system without knowing the history of its evolution, which has led the architecture of power and electrical distribution systems that we have today. This article presents a brief history of the evolution of the electric supply systems, up to the modern power system. Significant events that shaped the AC electrical system, as well as the characters involved in this process are presented. The article begins with Edison's

efforts to improve the light bulb and its consequential developments in electrical distribution systems of alternating current by the Edison General Electric Company. Then, the figure of Nikola Tesla is introduced and his involvement with Edison in DC systems. Also, actions incurred by Westinghouse in the electricity sector are mentioned, which gave rise to the competition between companies promoting DC and AC systems. At that point, events that occurred during the period known as the war of currents are presented, which concluded with the successful demonstrations of Westinghouse's distribution system in AC, especially in the Chicago World's Fair of 1893.

**Keywords:** alternating current, direct current, war of currents, electric supply.

## Introducción

El sistema de potencia acaba de cumplir 130 años y durante ese periodo se ha convertido en uno de los pilares de la sociedad moderna. Nuestra vida gira en torno al uso de dispositivos que se alimentan con esta energía. Y hoy en día, la mayoría de nosotros ni siquiera piensa en cómo esa energía es generada y de dónde viene. Pero no siempre fue así.

A principios de 1800, todavía las grandes ciudades utilizaban lámparas de gas para iluminar sus calles y sus casas. Obviamente hoy pensamos en lo inconveniente que esto sería, sin embargo en 1800 no existía otro método para iluminarse. Esto es, hasta la aparición de la tecnología de iluminación por arco, en 1808, la cual rápidamente tomó el negocio de iluminación externa. Sin embargo esta tecnología no era apropiada para iluminación interior, por lo que se continuó la búsqueda de una alternativa.

## La bombilla y el primer sistema de potencia

Thomas Alva Edison estuvo trabajando, hacia finales de los años 1870, en un remplazo para la tecnología de iluminación por arco. En 1879 Edison tuvo éxito en construir un bombillo incandescente con un filamento sólido, el cual le permitía iluminar eléctricamente el interior de los edificios. Y, aunque para algunos, el bombillo de filamento sea solamente una mejora incremental sobre otra tecnología de iluminación eléctrica, fue el dispositivo que estimuló la aparición de un sistema de distribución eléctrica.

Edison, que era un visionario, estructuró inmediatamente una compañía alrededor del invento de la bombilla. Esta compañía se dedicó a mejorar la duración de la bombilla y a desarrollar las tecnologías necesarias para su comercialización. Esto incluyó accesorios eléctricos tales como tomacorrientes, medidores y fusibles eléctricos y un sistema de transmisión de potencia en corriente directa. Todo esto fue desarrollado por la Edison General Electric Company y sus subsidiarias.

Se realizaron varias instalaciones temporales de prueba para este sistema y finalmente el primer sistema eléctrico de Edison fue instalado en el área de Bajo Manhattan en Nueva York. Este sistema es conocido por el nombre de su estación generadora, Pearl Street Station, e inició operaciones el 4 de septiembre de 1882. El sistema era en corriente

continua, a 100 voltios y utilizaba dos conductores de cobre, que debido al bajo voltaje, eran bastante grandes. La generación provenía de una pequeña planta capaz de alimentar una región dentro de un radio de una a dos millas de la planta, debido a las pérdidas.

Muchas otras instalaciones del sistema de potencia de Edison siguieron en otras áreas urbanas y afluentes a lo largo de los Estados Unidos. En gran parte el éxito del sistema de Edison consistió en una estratégica decisión de ubicar el primer sistema en un área con un alto número de inversionistas (Bajo Manhattan) que luego respaldaron financieramente el crecimiento de la Edison General Electric Company. Además, Edison se benefició que la tecnología de transmisión en corriente alterna aún no estaba lista para competir, pero esto cambiaría muy pronto con la llegada de Tesla y el ascenso de la Westinghouse Electric.

### El viaje de Nikola Tesla

Nikola Tesla había estado trabajando en un nuevo concepto para transmisión y uso de la energía eléctrica que lo había llevado a entender la generación de campos magnéticos con corrientes polifásicas alternas. Aunque muchos reconocían que su trabajo era brillante, no lograba conseguir apoyo financiero en Europa para poder avanzar su trabajo. Entonces, impresionado por el trabajo de Edison y sus esfuerzos para implementar sistemas de distribución eléctrica y reducir sus pérdidas, decidió viajar a los Estados Unidos para conocerlo y conseguir su apoyo para continuar su trabajo en sistemas CA polifásicos.

En 1884, Tesla hace el viaje a los Estados Unidos y conoce a Edison. Sin embargo, aunque Edison estuvo impresionado por el genio de Tesla, no mostró interés en su concepto de CA y lo contrató para ayudar en las mejoras necesarias a los dispositivos del sistema DC, especialmente, a mejorar la eficiencia de los generadores DC que se estaban utilizando.

Eventualmente, Tesla renunció a su trabajo para la Edison General Electric Company, debido a múltiples causas. Algunos indican que la razón principal de su renuncia es que al terminar su trabajo con los generadores DC, Edison no le pagó a Tesla el dinero acordado por el trabajo. Otros sugieren que su renuncia se debió a una creciente frustración de Tesla de no trabajar en su tecnología, la cual él sabía que era la solución más óptima al problema de transmisión eléctrica. De cualquier forma, Tesla decidió renunciar y retomar su trabajo en corriente alterna polifásica.

### Westinghouse, el gran empresario

George Westinghouse, el industrialista que había desarrollado un imperio basado en su invento del freno de aire para ferrocarriles, también se interesó en transmisión eléctrica. En 1885, adquirió las patentes de transmisión eléctrica en corriente alterna que habían desarrollado Gaulard (Francia) y Gibbs (Gran Bretaña) en 1881. Inmediatamente se fundó la Westinghouse Electric, para avanzar la tecnología recién adquirida al punto de poder comercializarla.

La primera dificultad que enfrentó el equipo de Westinghouse, fue el problema de regulación de voltaje en el sistema de Gaulard y Gibbs. Debido a que las cargas estaban conectadas en serie al secundario

del transformador en el sistema de distribución, el voltaje del sistema era altamente sensitivo a la carga. Se le asignó a William Stanley resolver este problema, y su solución, que consistió en modificaciones al transformador utilizado para la conexión de las cargas en paralelo, es el principio utilizado hasta hoy en día.

En 1886, se instaló, de manera temporal, el primer sistema de la compañía Westinghouse en Lawrenceville, Pennsylvania. Más tarde, ese mismo año, luego de terminar las pruebas en Lawrenceville, se instaló el primer sistema permanente en CA en Buffalo, New York.

### El encuentro de Tesla y Westinghouse

Por su parte, Tesla había estado trabajando en su sistema polifásico de corriente alterna. Para el año de 1887 Tesla registró varias patentes para el sistema de distribución de CA polifásico, motores polifásicos de CA, generadores y transformadores. En total sumaban siete patentes. En 1888 luego de ver una exposición sobre sistemas polifásicos de Tesla, Westinghouse decidió comprar sus patentes y lo contrata para desarrollar la siguiente generación de sistemas de potencia. El resultado de este trabajo, es el sistema de potencia moderno.

Alrededor de este mismo tiempo, los promotores del sistema de distribución en corriente directa habían comenzado a criticar duramente el sistema CA. Uno de los principales argumentos en su contra era que no existía un medidor de corriente alterna. Sin embargo, hacia finales de 1888 Shallenberger inventó el medidor de inducción, un medidor para potencia AC que utilizaba un disco magnético, lo cual eliminó este argumento en contra de la corriente alterna y fortaleció aún más su desarrollo.

### La guerra, la silla eléctrica y los proyectos de CA

Al agotarse los argumentos técnicos válidos en contra de los desarrollos en CA, Edison recurrió a argumentar que la CA era peligrosa. El más importante vocero de esta teoría no era Edison si no un asociado de él, Harold P. Brown. Brown se dedicó a hacer campaña sobre los peligros del uso de corriente alterna, ejecutando animales públicamente usando esta corriente, desde 1888 hasta 1890. En 1890 se construyó la primera silla eléctrica con apoyo de Brown, y con un generador eléctrico de Westinghouse que obtuvo clandestinamente. Este y otros esfuerzos publicitarios buscaban desacreditar la transmisión en CA para preservar los intereses comerciales de la Edison General Electric Company en transmisión en CD.

Durante este mismo periodo, los promotores de CA se concentraron en perfeccionar su tecnología y realizar proyectos que demostrarán sus capacidades. Por ejemplo, en 1891 Westinghouse Electric construyó una línea monofásica de 3kV y 3 millas de largo desde la Central Hidroeléctrica Ames hasta la mina Gold King en Telluride, Colorado. La misma alimentaba un motor síncrono de 100HP que operaba en la mina. Las condiciones se dieron para este proyecto, ya que no había madera disponible en la región y el transporte de carbón para producir vapor en el sitio era muy costoso, por lo que era necesario traer la electricidad de otro lugar. El proyecto sirvió para demostrar la viabilidad técnica y económica de la transmisión en CA a largas distancias.



Nikola Tesla y Tomás Alva Edison.

### General Electric y el retiro de Edison

En 1892, debido a los grandes avances logrados en CA, la Thomson-Houston, quienes habían hecho algunos desarrollos en CA y la Edison General Electric Company se fusionaron para formar General Electric Company, hoy GE. Inmediatamente, esta compañía entró al negocio CA pues el mercado en CD estaba desapareciendo. Edison fue nombrado director de la nueva compañía, pero renunció poco después y se distanció de la potencia eléctrica para dedicarse a otros fines científicos.

### El fin de la guerra y la Feria Mundial de Chicago

Finalmente, para el año 1892, se perfeccionó el motor y sistema de transmisión polifásico de Tesla. El mismo fue demostrado en 1893 en la Feria Mundial de Chicago e inmediatamente se inició el proyecto de la Central Eléctrica de Niagara Falls junto con la línea de transmisión polifásica CA que la conectaba con Buffalo, New York el cual entró en operación en 1886. Este proyecto coronó la victoria de la corriente alterna sobre la corriente directa, al menos durante los primeros 130 años.

### Referencias

- [1] C. L. Sulzberger, "Triumph of ac, from Pearl Street to Niagara," IEEE Power and Energy Magazine, vol. XX, pp. 64-67, May./Jun. 2003.
- [2] C. L. Sulzberger, "Triumph of ac, part 2, the battle of the currents," IEEE Power and Energy Magazine, vol. XX, pp. 70-73, Jul./Ago. 2003.
- [3] Tesla vs. Edison, ABB, <http://www.abb.com/cawp/seitp202/7bd450b76e55ef03c12579de002ebc71.aspx>
- [4] War of Currents, Wikipedia, the free encyclopedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/War\\_of\\_currents](http://en.wikipedia.org/wiki/War_of_currents), citado 19 de Septiembre de 2012