



Una formación de calidad  
en ingeniería para el futuro

Centro de Convenciones Cartagena de Indias  
15 al 18 de Septiembre de 2015

# EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS SUSTENTABLES EN LA LOGÍSTICA DE OPERACIONES PORTUARIAS

**Sonia Helena Contreras Ortiz, Juan Carlos Martínez Santos, José Luis Villa Ramírez,  
Eugenio Yime**

**Universidad Tecnológica de Bolívar  
Cartagena, Colombia**

**Alfredo Tous Brid**

**Contecar  
Cartagena, Colombia**

## **Resumen**

El sistema portuario de la ciudad de Cartagena es el de mayor movimiento de carga en Colombia y es líder en la región en manejo de contenedores. Se caracteriza por altos niveles de eficiencia y gran competitividad internacional. Aun así, cada vez existe una mayor presión internacional para que los puertos tengan un menor impacto en la huella de carbono de las cadenas logísticas. Este proyecto propone el estudio y diseño de alternativas tecnológicas de energías sustentables y de automatización de la logística de operaciones portuarias, que permitan mejorar la eficiencia y sostenibilidad energética de terminales marítimos de la ciudad de Cartagena. Dentro de los resultados esperados se encuentran: la determinación de la línea base del consumo energético y huella de Carbono de dos de los puertos principales de la ciudad, el estudio de la implementación de la tecnologías de tracto-camiones portuarios con tecnología sustentable articulado a la logística del puerto, la automatización de una grúa RTG semi-automatizada para una operación más eficiente, el estudio de factibilidad de sistemas de generación eléctrica basada en energías sustentables para soporte de la operación portuaria, y un modelo de optimización del transporte de vehículos en el puerto.

**Palabras clave:** puertos; eficiencia energética; control automático

## Abstract

*The port system of the city of Cartagena is the largest cargo movement in Colombia and a leader in the region in container handling. It is characterized by high efficiency and high international competitiveness. Still, every time there is a greater international pressure to ports have less impact on the carbon footprint of logistics chains. This project proposes the study and design of technological alternatives for sustainable energy and automation of port logistics operations, to improve energy efficiency and sustainability of marine terminals in the city of Cartagena. Among the expected results include: the determination of the basis of energy consumption and carbon footprint of two of the main ports of the city line, the study of the implementation of the technologies port tractor trucks with articulated sustainable technology to port logistics, the automation of a semi-automated RTG crane to a more efficient operation, the feasibility study of power generation systems based on sustainable energy to support port operations and an optimization model transport vehicles in the port.*

**Keywords:** ports; energy efficiency; automatic control

## 1. Introducción

El transporte marítimo es responsable del 90% del movimiento de carga mundial por volumen. Su naturaleza lo hace uno de los más eficientes usando solo el 7% del total de energéticos consumidos en operaciones de transporte. Esta eficiencia se ha logrado gracias a avances importantes en el aumento en la capacidad de toneladas transportadas. Aun así, dado el incremento constante del tráfico por vía marítima, se ha hecho necesario abordar cada vez más la eficiencia energética portuaria y la disminución en su impacto ambiental.

Los puertos en nuestro país emplean para su operación fuentes tradicionales de energía como lo son combustibles fósiles y la red eléctrica, lo cual tiene las siguientes consecuencias:

- Alto costo del consumo energético debido principalmente al uso del diésel
- Sensibilidad a los costos de los combustibles fósiles
- Alta emisión de gases efecto invernadero
- Contaminación auditiva en la zona del puerto
- Incremento en la huella de carbono de los productos transportados en contenedores

En consecuencia este proyecto pretende aportar a la pregunta de investigación ¿Cómo hacer más sustentable la operación portuaria desde el punto de vista energético, a través de tecnologías de transporte, logística, automatización, y generación de energía?

El resto del documento se encuentra estructurado en la siguiente forma. En la sección 2 se presenta el análisis preliminar del problema a partir de las buenas prácticas

reportadas en el mundo. En la sección 3 se presenta la configuración de las soluciones a estudiar. Finalmente se realiza una corta discusión de los avances preliminares del estudio.

## 2. Análisis preliminar del problema

La operación general de un puerto de contenedores se puede agrupar en tres actividades principales: una primera que consiste en la descarga o subida de contenedores desde los barcos que ingresan o salen del puerto y es realizado por las grúas pórtico, la segunda operación es el traslado de los contenedores dentro de puerto y se realiza con tracto camiones, y la tercera es el apilamiento de los contenedores en el patio a través del uso de RTG (Rubber Tyred Gantry cranes), ver (Zeng & Yang, 2009), (Steenken, Voß, & Stahlbock, 2004), (Economic and Political Weekly, 1968), (Günther & Kim, 2006) para una discusión más amplia. Estas tres actividades básicas intervienen durante las todas las operaciones que se realizan en el puerto, como son la atención de barcos alimentadores de bajo calado o barcos portacontenedores de mayor calado.

En el caso de los puertos colombianos, estos buscan ofrecer a sus clientes exportadores un abanico de destinos, los cuales logran a través de alianzas con líneas navieras grandes. Las líneas navieras utilizan un puerto como punto de intercambio intermodal si éste ofrece ventajas competitivas sobre los puertos circundantes, es por ello que el puerto debe mantenerse competitivo logrando bajos costos de operación, menores tiempos de atención y ofrecer una capacidad de carga saliente para que de esta forma las líneas navieras vean al puerto como un posible *hub* para su mercancía. Desde el punto de vista de una línea naviera, el transporte de carga se basa en barcos de bajo calado que se encargan de transportar la carga desde un puerto *hub* hacia los destinos, y en el trayecto inverso recoger la carga para alimentar a un barco de mayor calado o portacontenedores.

El puerto *hub* concentra la mayor carga y es donde llegan preferiblemente los portacontenedores de mayor calado; el puerto se ve favorecido también si posee una capacidad de carga de salida, pues la línea naviera ve disminuido el uso de los alimentadores. En resumen, el puerto busca ser competitivo para ser atractivo para las líneas navieras y de esta forma poder ofrecerle a sus clientes múltiples destinos para su carga y de paso disminuir los tiempos de traslado de la misma.

Para lograrlo, diferentes puertos en el mundo han implementado acciones que se han convertido en guías de buenas prácticas. Estas acciones incluyen las siguientes:

- *The Port of San Diego Green Port Program*: Este es el programa de puertos verdes del puerto de San Diego, California, desarrollado para alcanzar las metas propuestas en la política de Puertos Verdes de 2008. Su fin principal es obtener beneficios permanentes a nivel ambiental, social y económico por medio de la conservación de los recursos, reducción de residuos y la prevención de la

contaminación ambiental. En el área energética se destacan las siguientes estrategias:

- Desarrollar e implementar un programa que permita monitorear la huella de carbono de las operaciones portuarias para establecer metas encaminadas a mantener o reducir esta huella de carbono.
  - Reducción del consumo energético de las operaciones portuarias por lo menos 170,000 kWh por año.
  - Implementar pequeños proyectos pilotos para evaluar diferentes tecnologías energéticamente eficientes.
  - Desarrollar la caracterización solar de los puertos para determinar los lugares óptimos para la implementación de sistemas de energía solar y estimar los costos de implementación.
  - La instalación de sistemas fotovoltaicos en los edificios administrativos y de servicios generales.
  - Obtener mayores fondos para la realización de otros proyectos con energía solar.
- *International Association of Ports and Harbors - IAPH:* El IAPH definió como programa estratégico para los puertos miembros el programa *IAP Tool Box for Port Clean Air Program*. El programa reconoce como objetivo estratégico a nivel mundial lograr un balance entre la eficiencia y el desarrollo portuario y el cumplimiento con estándares de sostenibilidad y sustentabilidad ambiental, entre las estrategias planteadas se encuentran:
    - Reemplazo de equipos más eficientes
    - Uso de energías más limpias
    - Tecnologías de control de emisiones
    - Automatización
- *World BASC Organization:* La *Business Alliance for Secure Commerce - BASC* es una alianza empresarial internacional que promueve un comercio seguro en cooperación con gobiernos y organismos internacionales. En Colombia, los principales puertos participan en esta alianza debido a los problemas de seguridad asociados a las diferentes modalidades de tráfico. Una de los principales planes del BASC ha sido la prevención. Una de las principales herramientas ha sido la implementación de planes que limiten el acceso a personal no autorizado a carga, lo que ha sido abordado a través de los mecanismos de acceso controlado al puerto. La siguiente etapa es elevar el grado de automatización con el fin de minimizar las probabilidades de contaminación de carga.
- *Asia - Pacific Economic Cooperation: Sharing Best-Practices in Reducing Greenhouse Gas Emissions at Ports.* Esta iniciativa promueve estrategias que implican:
    - Transporte modal

- o Mitigar la congestión de tráfico
- o Actualizar los equipos de manejo de carga hacia equipos más sostenibles ambientalmente.
- o Alimentación de potencia *on-shore*
- o Fuentes de energía renovable

### 3. Configuración de las soluciones

Consecuente con la sección anterior, la mejor forma de ser competitivo es disminuyendo los costos de operación y aumentando la eficiencia de los procesos. En el caso de un puerto de contenedores, esto se traduce en disminución de costos y mayor eficiencia de las tres operaciones antes mencionadas. En el caso de la primera operación, carga o descarga de la mercancía del barco por una grúa pórtico, se ve directamente afectada por el tipo de tecnología utilizada para tal actividad. La actividad de traslado de mercancía a través de patio de contenedores utilizando tracto camiones portuarios es susceptible de mejora en costos si se logra emplear un energético de menor valor.

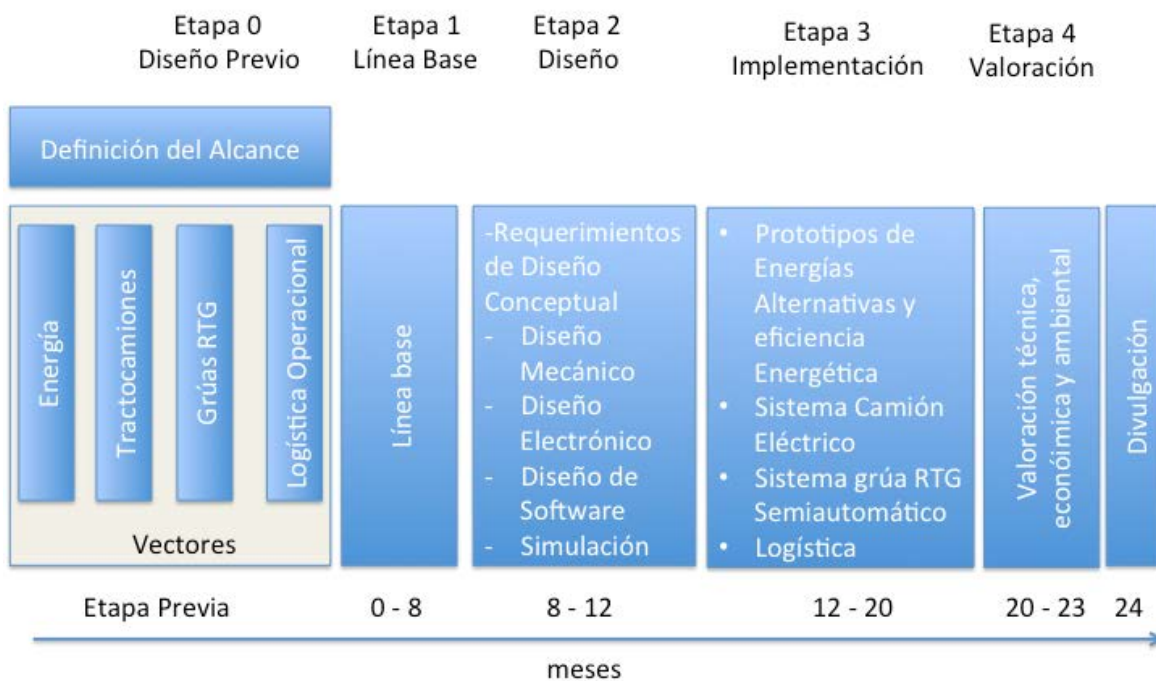


Figura 1. Diseño Metodológico (Elaboración Propia)

Los costos de las operaciones con RTG se pueden reducir si se emplean técnicas de automatización que incrementen la seguridad y faciliten su operación remota. La tendencia mundial en estas líneas es la de utilizar un mayor grado de automatización en RTGs para disminuir costos de operación por operadores manuales y tender hacia el uso de electricidad en la mayoría de las operaciones.

A partir de la información anterior, el diseño metodológico en este estudio ha sido adaptado a partir de la propuesta de Basurko y Mesbahi en (Basurko & Mesbahi, 2012) y de la propuesta de Fotso, Wasgint y Rettberg en (Fotso, Wasgint, & Achim, 2012). En particular, el estudio se ha estructurado en cuatro etapas metodológicas que se resumen en la Figura 1.

En este sentido uno de los aspectos clave a tener en cuenta es cómo el diseño del proyecto permita tener una valoración sistemática de cada una de las tecnologías a probar y que permita obtener una herramienta de decisión para la adopción final de las tecnologías desarrolladas. Para ello, el proyecto planea la metodología descrita en la Figura 2.

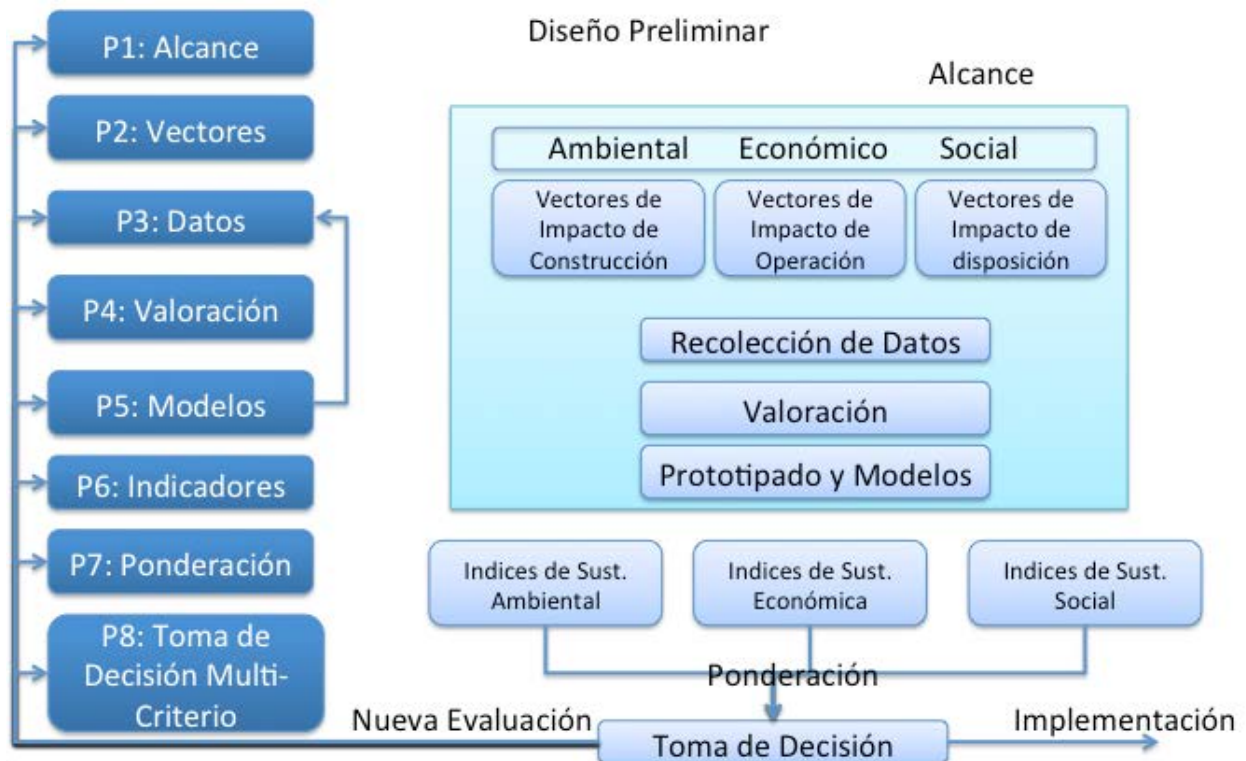


Figura 2. Metodología para la evaluación de soluciones (Elaboración Propia)

Esta propuesta está planteada para ser desarrollada directamente en la Sociedad Portuaria de Cartagena y en Contecar.

La propuesta tiene como aspectos innovadores el desarrollo tecnológico de herramientas de integración de la operación de las grúas y los tractocamiones con un sistema de monitoreo y evaluación energético, así como el desarrollo de un modelo de toma de decisiones para la adopción tecnológica de tecnologías verdes ajustado al caso específico de puertos de contenedores.

La implementación del proyecto contiene las siguientes cuatro etapas:



1. Levantamiento de la línea base y los ciclos de trabajo típicos de la tecnología actual de tracto-camiones y RTGs.
  - Tomando como referencia el puerto administrado por la Sociedad Portuaria de Cartagena, se completará la línea base de consumo energético del puerto y su correspondiente impacto ambiental directo. Esta línea base es necesaria para permitir comparar los indicadores de éxito del proyecto con respecto al ahorro energético y al uso de energías sustentables con una reducción real en la huella de carbono que aporta a los productos transportados por el mismo. Para levantar la línea base, se analizará la información de los datos históricos del consumo energético del puerto. Se emplearán además, instrumentos de medición de variables eléctricas, de emisión de gases y contaminación sonora, para complementar esta información y obtener el panorama del impacto ambiental del puerto. Un objetivo de esta fase es la identificación de proyectos que permitan mejorar el desempeño energético del puerto, teniendo en cuenta que es claro que los equipos portuarios móviles que son el grueso de la generación de gases de escape contaminantes y emisiones sonoras total del puerto.
  - Paralelo a la definición de la línea base, se realizará una caracterización del desempeño solar en el puerto, a través de la instalación de una estación de medición de radiación solar que permitirá ajustar el desempeño real a lo largo del tiempo de observación del proyecto.
  - Con la información anterior se seleccionarán las localizaciones y estaciones mas adecuadas para instalar los sistemas de generación de energía renovable y a su vez proceder con el dimensionamiento y diseño del sistema de energía renovable.
  - Una vez el diseño esté concluido se procederá a implementar el prototipo piloto de energía renovable para cada punto seleccionado.
  - Finalmente se realizará la validación del modelo planteado y se realizarán las estrategias de ajuste para definir las factibilidades finales del modelo de energía alternativa.
  
2. Proponer un tipo de tracto-camiones y un sistema para la automatización de un RTG basados en tecnologías sustentables que satisfagan las necesidades proyectadas del puerto.
  - Evaluar las tecnologías disponibles en el mercado de motores híbridos y/o eléctricos que puedan reemplazar de manera viable tanto técnica como económicamente un tracto-camión portuario basado en motor diesel, sin afectar el número de operaciones diarias. Este estudio arrojará las tecnología con mayor viabilidad acorde con las necesidades de la Sociedad Portuaria. Una vez definida esta parte del estudio, se procederá a realizar las pruebas con la tecnología escogida desde el punto de vista de eficiencia operacional y eficiencia energética, comparado con el desempeño de un equipo tractocamión con motor diessel.
  - Evaluar tecnologías de sensores y controladores para realizar la automatización de las operaciones en puerto de un RTG. Con respecto a los sensores, van a considerarse cámaras de video, sensores de balanceo, de dirección automática y marcadores en las bahías de los patios, entre otros. Se realizará el diseño del prototipo del sistema de automatización y se implementará sobre un RTG de operación manual. El RTG será instrumentada con sensores, se empleará un controlador para implementar los algoritmos de visión artificial y automatización, y

las salidas del controlador serán acopladas a los actuadores del RTG. La automatización en el RTG busca mejorar su operación a través de la generación de trayectorias óptimas que hagan que los equipos se mantengan en sus puntos de máxima eficiencia. En consecuencia, se obtienen beneficios como aumento de la productividad, reducción del impacto ambiental e incremento en la seguridad. Adicionalmente, se implementara un sistema para la operación manual en forma remota del RTG para ser empleado en las tareas de levantamiento y colocación de contenedores en los tractocamiones portuarios. El modo de operación manual a distancia tiene el objetivo de garantizar la seguridad de los conductores de los tractocamiones. Como se describió anteriormente, para el desarrollo de los prototipos se requiere de la adquisición de dispositivos eléctricos y electrónicos como sensores, baterías e instrumentos de medición, los cuales son necesarios para evaluar la factibilidad técnica de la implementación.

3. **Optimización de la Logística Portuaria, bajo las Nuevas Condiciones de Trabajo:** Una parte importante de la eficiencia y seguridad operacional del puerto es la optimización de movimientos de equipos móviles, en vista que es a través del aprovechamiento de estos recursos, que se logran alcanzar los niveles de servicio que le permiten ser considerado como un puerto competitivo por sus clientes. . Actualmente el puerto ha sido ajustado en la práctica para soportar todo el movimiento requerido teniendo en cuenta un bajo nivel de automatización en los equipos móviles. Para garantizar los niveles de servicio logístico y alcanzar este propósito se requiere:
- Conocer los niveles de servicio logístico actuales del desempeño del puerto, así como los mecanismos logísticos de aprovechamiento de recursos, de tal forma que sea posible validar los mismos a través de un modelo de simulación de eventos discretos.
  - Establecer a través de este modelo de simulación, los niveles efectivos actuales de desempeño y establecer las potenciales oportunidades de mejora en cuanto al aprovechamiento de la capacidad.
  - Incorporar al modelo de simulación previo, las tecnologías desarrolladas y seleccionadas en las demás etapas de este proyecto, de tal manera que sea posible evaluar el impacto que tendrían en el nivel de servicio global del puerto.
  - En función de los resultados previamente obtenidos, identificar los puntos críticos para realizar un rediseño de la logística, que permita alcanzar nuevamente los niveles de servicio a los que tradicionalmente se encontraba operando el sistema.
  - A través de modelos de optimización, rediseñar puntualmente los aspectos críticos del aprovechamiento de los recursos identificados previamente, de tal manera que se logre alcanzar los niveles de servicio deseados de la logística de operación del puerto.
  - Evaluar la robustez de los diseños obtenidos a través de la incorporación de los mismos en el modelo de simulación, de tal forma que sea posible establecer su impacto en los niveles de servicio globales y la verificación de la consecución de las metas previstas.



4. Evaluar y seleccionar la mejor oferta tecnológica para tractocamiones y automatización de los RTGs de acuerdo con los requerimientos logísticos del puerto, análisis de ciclo de vida, su desempeño dinámico-energético y termo-económico y su impacto social.
- En esta fase se estudiara de manera integral las tecnologías seleccionadas para tractocamiones y automatización de las RTGs con la infraestructura, logísticas e insumos necesaria para operación de las mismas.

#### 4. Discusión

Disminuir el impacto de los puertos en las cadenas logísticas desde el punto de vista de sustentabilidad ambiental se ha vuelto un imperativo para la competitividad de los puertos. Colombia enfrenta una fuerte competencia en la región Caribe que la obliga a estar a la vanguardia en las tecnologías de operación portuaria. Por otra parte, los costos de inversión, y la variabilidad en el costo de los energéticos requiere una planificación adecuada, que incluye la construcción de históricos detallados, una tarea de vigilancia tecnológica continua y una evaluación rigurosa y continua de las tecnologías existentes. La construcción de las líneas base y el diseño de adecuados indicadores de desempeño constituyen la primera tarea de este estudio que permita tomar decisiones tecnológicas a futuro.

#### 5. Agradecimiento

Este proyecto ha recibido el apoyo de la Gobernación de Bolívar, la Sociedad Portuaria Regional Cartagena y Contecar.

#### 6. Bibliografía

- Basurko, O., & Mesbahi, E. (2012). Methodology for the sustainability assessment of marine technologies. *Journal of Cleaner Production* , 1-10.
- Fotso, A., Wasgint, R., & Achim, R. (2012). State of the Art for Mechatronic Design Concepts. 8th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (págs. 232-240). Suzhou, China: IEEE.
- Zeng, Q., & Yang, Z. (2009). Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container. *Computers & Operations Research* , 1935--1944.
- Steenken, D., Voß, S., & Stahlbock, R. (2004). Container terminal operation and operations research – a classification and literature review. *Operations Research Spectrum* , 3-49.
- Economic and Political Weekly. (1968). The Container Revolution. *Economic and Political Weekly* , 437.
- Günther, H.-O., & Kim, K.-H. (2006). Container terminals and terminal operations. *Operation Research Spectrum* , 437 -445.

## Sobre los autores

- **Sonia Helena Contreras Ortiz:** Ingeniera Electrónica, Máster en Electrónica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Doctor en Filosofía de Universidad de Connecticut, USA. Profesor Asociado. [scontrer@unitecnologica.edu.co](mailto:scontrer@unitecnologica.edu.co)
- **Juan Carlos Martínez Santos,** Ingeniero Electrónico y Magister en Potencia Eléctrica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. PhD de *Northeastern University,* Boston, USA. Profesor Asociado. [jcmartinezs@unitecnologica.edu.co](mailto:jcmartinezs@unitecnologica.edu.co)
- **Alfredo Tous Brid:** Ingeniero Electricista, Jefe de la División de Equipos Portuarios de la Sociedad Portuaria Regional Cartagena y del Puerto de Contenedores de Cartagena. [atous@contecar.com.co](mailto:atous@contecar.com.co)
- **José Luis Villa Ramírez** es Ing. Electrónico de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Magíster en Ing. Electrónica y de Computación de la Universidad de los Andes y Doctor en Ingeniería de la Universidad de los Andes, y Docteur en Automatique de la Universidad de Nantes (Francia). Su área de trabajo es el modelamiento y control de procesos industriales. Desde el año 2004 se encuentra vinculado a la Universidad Tecnológica de Bolívar. Profesor Titular. [jvilla@unitecnologica.edu.co](mailto:jvilla@unitecnologica.edu.co)
- **Eugenio Yime:** Ingeniero Mecánico de la Universidad del Norte, con Maestría en Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes y Doctorado en Robótica de la Universidad Politécnica de Madrid. Profesor Asociado. [eyime@unitecnologica.edu.co](mailto:eyime@unitecnologica.edu.co)

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2015 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)