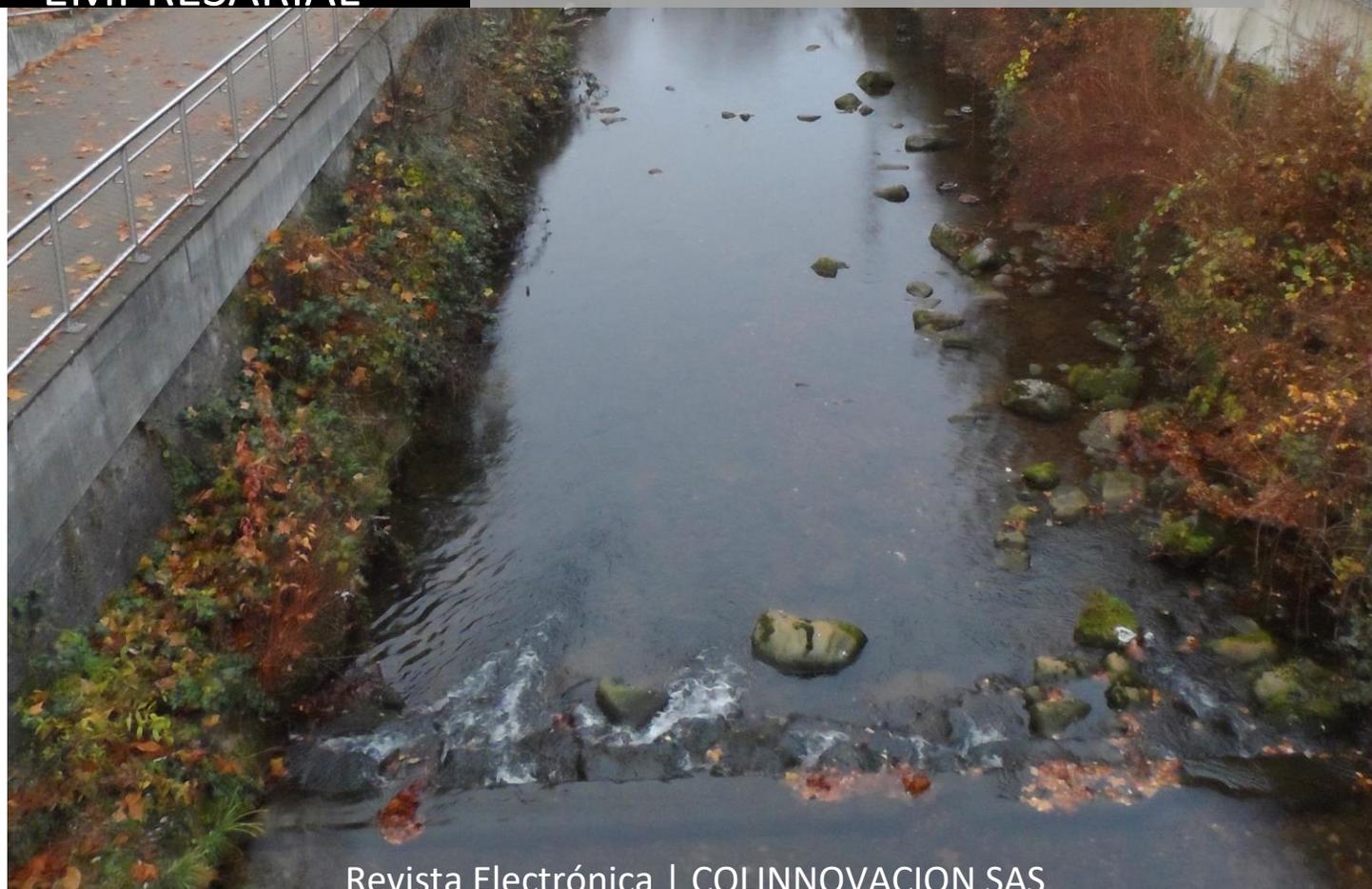




## DESARROLLO TECNOLÓGICO E INNOVACIÓN EMPRESARIAL

La revista electrónica de COLINNOVACION, tiene el compromiso de informar sobre la actualidad de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Colombia.



# 1 Tabla de contenido

DESARROLLO DE PRODUCTO EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ .....	3
FABRICACIÓN DE CARROCERÍAS DE BUSES TIPO BRT EN COLOMBIA PARA TRANSPORTE DE PASAJEROS EN SISTEMAS DE TRANSPORTE MASIVO .....	10
INTEGRACIÓN DE ENERGIAS RENOVABLES A REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EXISTENTES.....	16

INNOVACI

**DIRECTOR**  
Gabriel Alberto Zamudio

**EDITOR**  
Julian Andres Zamudio

**CONSEJO EDITORIAL**  
Hermann Fuquen  
Juan Carlos Salavarría  
Claudia Sánchez



**IMPRESIÓN - WEB**  
COLINNOVACIÓN SAS.

**COMUNICACIÓN**  
colinnovacion@gmail.com  
contacto@colinnovacion.com

Desarrollo Tecnológico e  
Innovación Empresarial  
Edición 8 – Volumen 2  
ISSN 2322-8725

# DESARROLLO DE PRODUCTO EN LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Claudia Sánchez, Consultora en Innovación Tecnológica

**Resumen** — Desarrollar productos es un reto en diferentes escalas para las diferentes industrias. El diseño o rediseño de productos en la industria automotriz, donde se tienen altos niveles de complejidad en cada vehículo, debido a los requerimientos del mercado, los requerimientos ambientales y de seguridad, impactan varios actores en la cadena de valor de este sector, en sus procesos de diseño, de manufactura y en el relacionamiento de los actores vinculados con estas actividades. En el presente artículo se introducen de manera genérica los pasos para el desarrollo de producto automotor, teniendo en cuenta algunos de los desafíos y retos que enfrentan los fabricantes (o ensambladores) del producto final y los desarrolladores de autopartes.

**Palabras Clave** — Industria Automotriz, Desarrollo de Producto, Proveedores de Autopartes, Manufactura

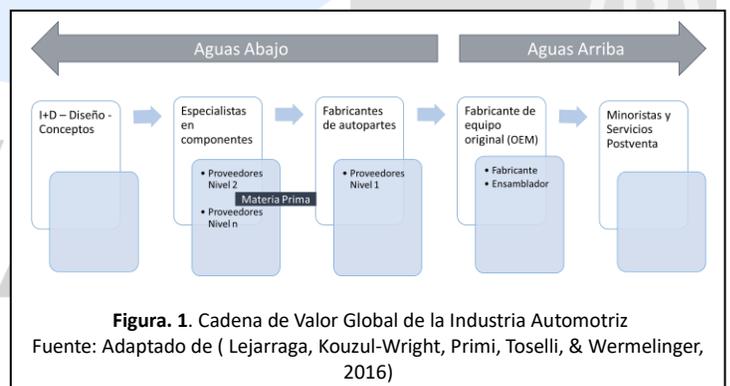
## 1. INTRODUCCIÓN

La industria automotriz está en continuo movimiento: tanto sus productos, como el desarrollo de las cadenas de valor la hacen altamente competitiva. Debido al nivel de inversión en investigación y desarrollo (I+D), durante varios años ha sido clasificado entre los sectores de media alta complejidad tecnológica, ubicándose desde el año 2009 como la segunda industria en incrementar continuamente sus valores de inversión en I+D con respecto a otros sectores productivos (European Commission - Joint Research Centre, 2018), situación ocasionada por la necesidad de generar y usar continuamente conocimiento, tanto para el desarrollo de nuevos productos, como para la optimización de sus procesos. La inversión en I+D del sector automotor reportado entre los años 2013 y 2017, alcanzó más del 15% con respecto a la inversión de las 2500 empresas analizadas anualmente en la Unión Europea (European Commission - Joint Research Centre, 2018). Al hacer un análisis por país entre el nivel de producción y la inversión en I+D de la industria automotriz, se identificó que los países donde se realiza la mayor producción de vehículos, son también los países donde se realiza una mayor inversión en I+D (Sánchez & Pacheco, 2018).

Su valor estratégico es reconocido en las diferentes economías donde se encuentra presente como industria (García, Vial, & Montañez, 2010), debido a que tanto para la fabricación de vehículos, como para el ensamble de los mismos se requiere desarrollo de proveedores con capacidades de diseñar, prototipar, validar y fabricar subproductos desde diferentes sectores (metalme-cánico, vidrio, plástico, electrónico, textil entre otros) con el fin de integrarlos en un solo producto: el automóvil. Por lo tanto, su presencia garantiza la generación de innovación, transferencia de conocimiento y de transformaciones en los procesos del sector manufacturero

(Sánchez & Pacheco, 2018).

La cadena de valor (Ver Figura 1) está conformada por diferentes industrias de manufactura y servicios, entre las que los fabricantes o ensambladores encuentran aliados para el diseño (en algunos casos incluso capacidades de diseño del vehículo completo), el desarrollo, la realización de pruebas, ensamble y subensamble de piezas. Aguas arriba del proceso de ensamble del vehículo, se encuentra la cadena de distribución, integrada principalmente por los concesionarios, en los cuales se realiza tanto la venta de vehículos, así como servicios post-venta, de cara al usuario final (OECD, 2009).



Son muchos los retos que enfrenta la industria de autopartes y vehículos, por cuanto los clientes finales demandan altos niveles de calidad y seguridad en sus productos, mientras los niveles de competencia demandan mejora continua que permita reducir tiempo, costos de fabricación, con el fin de mantenerse competitivo. En este sentido, como se verá en el artículo, cada desarrollo de nuevo vehículo o la modificación en un sistema del

mismo que origine una nueva versión de automóvil, generará un impacto en los integrantes de la cadena aguas abajo, en el desarrollo de prototipos y de productos intermedios, así como en los procesos de manufactura. Cada una de las decisiones de procesos debe evaluarse, buscando asegurar una adecuada fabricación de los productos (Stylidis, Madrid, Wickman, & Söderberg, 2017).

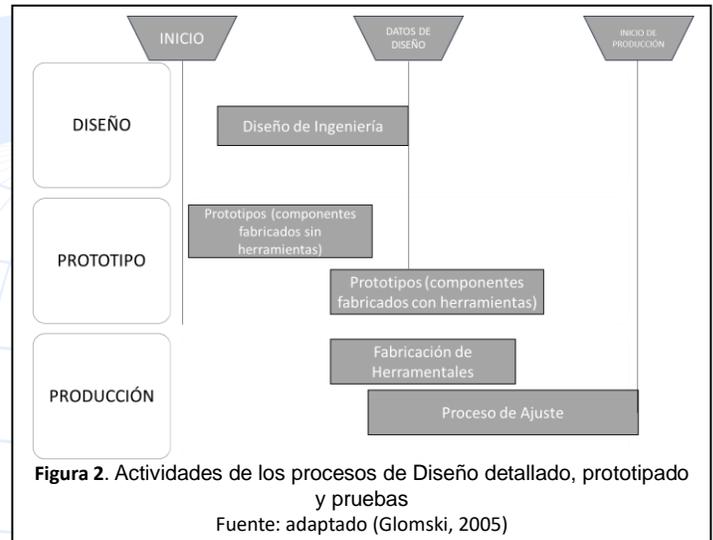
## 2. DESARROLLO DE PRODUCTOS EN EL SECTOR AUTOMOTOR: ESTADO DEL ARTE

El sector automotor desarrolla sus productos cumpliendo varias etapas, entre las que se pueden identificar: planeación, desarrollo de conceptos, diseño de sistemas, diseño de detalle y pruebas y ajustes (Glomski, 2005). Siendo los vehículos productos integrados por sistemas complejos, de acuerdo con los requerimientos funcionales de los mismos, se diseñan los sistemas, subsistemas y piezas, teniendo en cuenta tanto requerimientos geométricos, de materiales, de procesos de fabricación, entre otros.

Al entrar en la siguiente fase de diseño, se enfrentan retos específicos que involucran tanto al ensamblador como a los fabricantes de partes, en pasos que implican analizar la división del vehículo en sistemas, subsistemas y componentes, para realizar el diseño de detalle, pruebas y refinamiento de partes y subensambles, pasos que deben realizarse antes del lanzamiento de fabricación de productos para llegar al mercado. En este proceso, es necesario realizar el diseño de ingeniería, la fabricación de prototipos de partes sin herramientas, proceso del que saldrán datos que permitirán verificación y ajustes del proceso en el fabricante de partes y en el plan del proceso de ensamble del vehículo; posteriormente, se manufacturan prototipos de componentes, esta vez fabricados con herramientas y se ajustan los parámetros de producción, como se puede ver en la Figura 2.

El diseño de detalle de productos complejos se realiza para sistemas, subsistemas y componentes en pasos simultáneos; también se realizarán pruebas paralelamente, en la medida en que cada parte del prototipo es fabricado. Se utiliza como herramienta software de diseño asistido por computador, facilitando el intercambio de información entre equipos de trabajo. Los ajustes al diseño, prototipo y pruebas son procesos iterativos, que van generando nuevos cambios, en la medida en que se analizan los resultados de las pruebas individuales (Ulrich & Eppinger, 2013). La integración y pruebas del sistema complejo, también son iterativas y finalizan únicamente al garantizar el cumplimiento de los requerimientos de diseño, de estándares y de las normativas requeridas. Una vez cumplen con los procesos de verificación, se obtiene la aprobación para iniciar la producción en serie de las piezas y del vehículo (Ibid).

Los primeros prototipos con piezas fabricadas sin herramientas (Fig. 2), se ensamblan en talleres, es decir, fuera de la línea de producción. Posteriormente, los prototipos de partes fabricados con herramientas, serán ensamblados en los primeros prototipos de vehículos que se llevan a línea de producción, donde se ensamblan varios grupos de prototipos mientras se realizan los procesos de validación del ensamble (Glomski, 2005). Se realiza un ajuste de los procesos de producción, de acuerdo con el nivel de cumplimiento identificado en las pruebas (tanto de funcionalidad como de precisión dimensional) realizadas a vehículos y componentes (Ibid).



El diseño de nuevos vehículos o los cambios de los sistemas del vehículo, ocasionados por rediseños de modelos, implican transformaciones tanto en los procesos productivos del fabricante / ensamblador, como en los proveedores de partes originales (OEM), generando cambios en procesos de fabricación, en los herramientas y medios de control requeridos para producción (Glomski, 2005).

En general, el diseño y desarrollo de producto y proceso en este sector, son procesos globales, que son decididos y desarrollados a nivel corporativo de cada compañía automotriz. Sin embargo, a nivel local, a partir de las necesidades de cada mercado, se identifican segmentos y se adaptan modelos partiendo del diseño global y de las necesidades de los segmentos de mercado locales.

El lanzamiento de nuevas versiones de automóviles, como fenómeno reciente, presenta una tendencia de incorporación de tecnologías desarrolladas para vehículos de alta gama, en segmentos menos exclusivos, que demandan mejoras desde el punto de vista técnico en términos de optimización (como en el caso de los motores) o en la apariencia en el cuerpo del vehículo. Estos nuevos requerimientos de producto, generan cambios en diferentes sistemas del vehículo, impactando adicionalmente los procesos de producción de las nuevas versiones, ocasionando demandas de

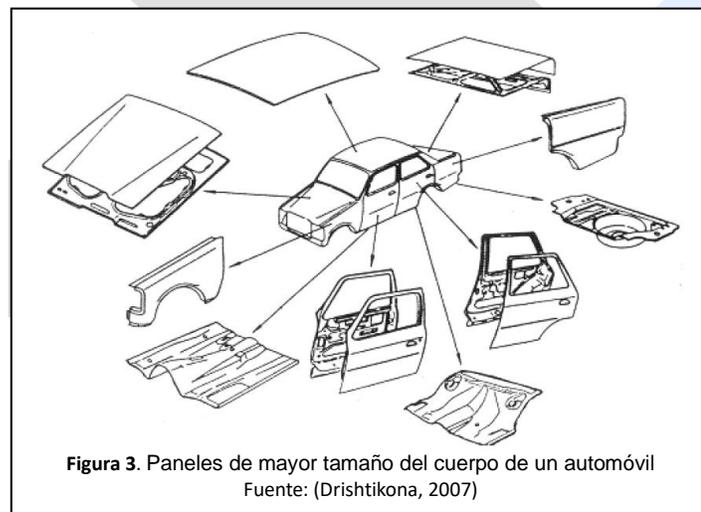
nuevas tecnologías de procesos de manufactura y ensamble.

## 2.1. SISTEMAS QUE INTEGRAN UN AUTOMÓVIL

Cada vehículo puede dividirse en sistemas funcionales, que varían entre sí debido a modificaciones de diseño. Las modificaciones en los sistemas dan lugar a diferentes versiones del vehículo (Lutsey, 2010). Los sistemas funcionales convencionales de un automotor, son clasificados por Lutsey (2010) en:

### 2.1.1 EL CUERPO DEL AUTOMÓVIL (O CUERPO EN BLANCO)

Está integrado por partes y subsistemas como: Bastidor del habitáculo, vigas transversales y laterales, techo, estructura, estructura frontal, estructura del piso inferior, paneles. Lutsey (2010) lo describe como un sistema sensible a la integridad estructural del vehículo, siendo por lo tanto el único sistema que es investigado y sobre el que se realizan diseños a buscar cambios de diseño por disminución de masa. Es adicionalmente el sistema con mayor frecuencia de cambios en su diseño, ocasionados por las tendencias o necesidades del mercado (Jayaram & Mohanraj, 2016). Asociado con el Cuerpo del vehículo se encuentran los cierres, que corresponden a puertas delanteras y traseras y capó (Lutsey, 2010), cuyo esquema puede verse en la Fig. 3. Siendo este uno de los sistemas más complejos desde el diseño hasta la manufactura del vehículo, en su desarrollo se tendrá coordinación de diferentes equipos de trabajo, desde los primeros pasos de diseño del producto, hasta los proveedores de materias primas, herramientas y piezas (Baron & Gerth, 2003).



Se ha identificado también como la parte más costosa, por causa de su proceso de manufactura, en una planta de fabricación. El cambio en el diseño de un automóvil, que modifique su estructura, generará modificaciones de gran impacto en el proceso de manufactura y ensamble. Dar cumplimiento de los requerimientos de

rediseño en este sistema se convierte en un desafío y será un factor determinante en la satisfacción del usuario final, por cuanto la apariencia de un automóvil determina también el deseo de compra del posible cliente (Baron & Gerth, 2003).

### 2.1.2 TREN MOTRIZ

Este sistema, según Lutsey (2010), está compuesto por motor, transmisión, sistema de escape y tanque de combustible. En términos de demanda reciente, el sector se ha visto en la necesidad de optimizar el consumo de combustible y del comportamiento del motor en los vehículos, tanto por razones económicas como de sostenibilidad, generando cambios en las tecnologías (Simmons, 2015). Se han desarrollado modificaciones ocasionadas, por ejemplo, por la reducción del tamaño del motor, con propuestas de cambios que permitan aprovechar tecnologías como inyección directa de gasolina o la incorporación de turbo-cargadores; esta última, utilizada en vehículos de alta gama y desde hace algunos años, está siendo adaptada para su uso en vehículos de menor costo (Leduc, 2003). En algunos casos, para lograr condiciones de funcionamiento, los cambios en este sistema pueden demandar modificaciones o cambios completos del tipo de caja de velocidad (Dalla Nora, 2015).

### 2.1.3 SISTEMAS DE SUSPENSIÓN

En este caso identifican tres componentes principales, con funciones específicas: muelles, que absorben energía generada por las alteraciones que se encuentran en la vía y soportan el peso de vehículo; parachoques que disipan energía y estabilizadores que permiten controlar la trayectoria durante las curvas (Scuracchio, de Lima, & Schön, 2013). Este sistema tiene como función absorber las fuerzas que experimentan los automotores en movimiento; adicionalmente, debe mantener las ruedas en contacto con la carretera, con el fin de garantizar la seguridad y el rendimiento del vehículo (Gillespie, 1992).

El diseño de este sistema, es orientado por los requerimientos funcionales descritos anteriormente, así como por parámetros dinámicos que permitan que la suspensión en servicio pueda ser sometida a diversos niveles y situaciones de carga. Para el diseño o rediseño de este sistema se tienen en cuenta variables como el espacio que ocupa cada una de las piezas del sistema en el vehículo, los procesos de fabricación y montaje que requieren, costo y peso, entre otras (Vivekanandan, Gunaki, Acharya, Gilbert, & Bodake, 2014).

### 2.1.4 OTROS SISTEMAS

En el vehículo se encuentran una serie de piezas y subsistemas relacionados tanto con funcionamiento como con confort, al interior de la cabina del vehículo,

como asientos, tablero de instrumentos, aislamiento, tapicería, airbags, así como sistemas conocidos como misceláneos, que son integrados por el sistema eléctrico, ventanas entre otros (Lutsey, 2010).

## 2.2. IMPACTOS DEL DESARROLLO DE PRODUCTOS EN LA MANUFACTURA

El desarrollo de productos en la industria manufacturera involucra el *concepto de características clave de producto*, desarrollado por Lee et al (1996) según el cual se deben tener en cuenta características originales de diseño del producto, así como los requerimientos del proceso de manufactura que generarán impactos en los atributos clave del producto asociados con forma, función o desempeño, con el fin de identificarlos como parámetros de procesos para su fabricación y ensamble. Por ejemplo, al sugerir cambios geométricos en un producto, se ocasionarán impactos en el concepto de diseño, en los procesos de manufactura de los componentes y en los procesos de ensamble, impactando de esta manera diferentes etapas de producción (Lee & Thornton, 1996).

Tanto las plantas de fabricación/ensamble de vehículos, como los fabricantes de piezas y partes deben realizar cambios en sus procesos de manufactura al desarrollar un nuevo vehículo, así como al introducir cambios en el sistema de un vehículo, que generen nuevas versiones del mismo. Mientras las plantas de ensamble adaptan los recursos físicos para la fabricación de los nuevos productos (herramientales, automatización de procesos de fabricación y ensamblaje, cambio en los procesos de manejo de materiales, equipos para el aseguramiento de la calidad y otros equipos auxiliares) (ElMaraghy H. A., 2012), se generan simultáneamente procesos de interacción para diseño de producto, diseño de procesos (incluyendo herramientas y procesos de aseguramiento de calidad) del personal de ingeniería del ensamblador, con los proveedores de piezas y subensambles.

## 3. PROCESOS DE FABRICACIÓN EN LA PLANTA DE ENSAMBLE Y TENDENCIAS EN DESARROLLO DE PRODUCTOS

El proceso de fabricación de un automóvil inicia con el conformado de los paneles del cuerpo del vehículo, los cuales son fabricados con una variedad de prensas (hidráulicas y mecánicas) y sus respectivas matrices de estampación. Para la fabricación de los paneles, se requieren la maquinaria, los herramientas y la materia prima (Omar M. A., 2011). A través de procesos de soldadura, las piezas estampadas del cuerpo del vehículo se unen, dando forma a la cabina. Una vez conformada, la cabina pasa por lavado, pintado y horneado, para posteriormente, iniciar el proceso de instalación del trim en el auto (Omar M. A., 2011). Los procesos de instalación de trim, tienen alta dependencia del talento humano, por cuanto hay muchos procesos no

automatizados que demandan la experticia y conocimiento de los procesos por parte de los operarios, para su adecuada ejecución (Omar M. A., 2011).

En fábricas con altos niveles de producción, tanto los procesos de fabricación de paneles como la soldadura del cuerpo del vehículo se realizan en líneas de producción con alto grado de automatización. En plantas con bajos volúmenes de producción, tanto la fabricación de los paneles, como la soldadura de la cabina, se realizan manualmente o con procesos semiautomatizados, por cuanto la implementación de robots o tecnologías automatizadas puede generar altos costos de producción, que impediría la comercialización de los vehículos.

La competitividad que el mercado demanda de esta industria, ha generado la necesidad de implementar sistemas de manufactura flexibles, garantizando reducción de costos, acortando *lead time*, disminuyendo la cantidad de operaciones de manufactura, así como el nivel de complejidad en la fabricación de un automóvil completo, disminución de retrabajos, de desperdicio de material, e incrementando los niveles de estandarización de la producción. (Omar M. A., 2011).

### 3.1. RETOS EN LA AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS DE BAJOS VOLÚMENES DE PRODUCCIÓN

La introducción de procesos automatizados o robóticos en la fabricación de vehículos puede mejorar la calidad del producto, así como disminuir riesgos de enfermedades profesionales ocasionadas por ejemplo por movimientos repetitivos o posiciones de trabajo con fallas en ergonomía, entre otros beneficios. En países en desarrollo, donde existen plantas de ensamble para bajos niveles de producción, existen restricciones para implementar procesos automatizados, debido a que, por ejemplo, la inversión en cada célula robótica ocasiona altos costos tanto en la compra de los equipos, como en su adaptación en la línea de producción y posterior mantenimiento (Prete, 2014).

La introducción de nuevos vehículos que tengan atributos de producto con mayores niveles de calidad, hará necesaria la implementación de sistemas automatizados para garantizar las condiciones de diseño que exige el mercado. En industrias de media o baja cadencia, la implementación de estos procesos automatizados demandará el diseño y ejecución de planes de acción que permitan disminuir los costos de adquisición y adaptación de procesos automatizados (o robotizados). Por lo tanto, será fundamental realizar un análisis de los equipos que cumplan con los requerimientos del proceso a mediano y largo plazo, así como el planteamiento y ejecución de estrategias de su adaptación a la línea de producción y su operación (Prete, 2014).

### 3.2. PROCESOS DE ENSAMBLE AUTOMATIZADOS PARA CUMPLIR CON DEMANDAS DE NUEVOS DISEÑOS

Algunos de los procesos que han sufrido transformaciones asociadas con automatización en la industria automotriz, son los procesos de soldadura y grafado:

**Soldadura:** este proceso permite unir varias capas de metal. En el caso de la industria automotriz, se usa en una alta proporción la soldadura de punto, cuya unión se produce generando calor y presión en áreas procesadas, sin adición de material. Demanda una combinación precisa de presión, intensidad de corriente y periodo de tiempo de soldado (EWF, 2007), para lograr condiciones de calidad adecuadas de producto. Siendo fundamentales en el ensamble de vehículos, los procesos de soldadura son automatizados con el fin de mejorar la eficiencia de producción (Bogue, 2008).

Este proceso tendrá un alto impacto en la fabricación de vehículos con mayores niveles de calidad percibida, lo que convierte la soldadura en una de las operaciones de manufactura que requerirá mayores niveles de control (Stylidis, Madrid, Wickman, & Söderberg, 2017).

**Grafado:** permite realizar la unión de dos o más láminas de metal, usado en mayor proporción para fabricar los cierres del auto. Se considera un proceso de doblado de metales (Livatyali, Laxhuber, & Altan, 2004), que genera uniones compactas, no tan fuertes como la soldadura de punto (Svensson & Mattiasson, 2002).

El desarrollo de esta operación sin los estándares adecuados, puede afectar la calidad visual, dependiendo de las tolerancias de precisión que pueden obtenerse al ensamblar cierres frontales y laterales (Jayaram & Mohanraj, 2016), lo cual impacta la calidad percibida. Por lo tanto, para lograr productos con mejor calidad percibida, será necesario implementar procesos de grafado con altos niveles de automatización y control.

### 4. IMPACTO DEL DESARROLLO DE PRODUCTO EN LOS PROVEEDORES DE PIEZAS

Los cambios de productos, generados por nuevos requerimientos del cliente, demandan modificaciones de proceso de las empresas fabricantes de vehículos, que para adaptarse rápidamente a los nuevos procesos tecnológicos, requieren trabajo con proveedores de partes y subensambles (Wiendahl, 2007). El ciclo de desarrollo de un producto en la industria automotriz, es complejo, lo que ocasiona la necesidad de externalizar un alto porcentaje del diseño y fabricación en proveedores (Tang & Qian, 2008). En este proceso, el equipo que planea el producto por parte del ensamblador, desarrolla las especificaciones del concepto general del nuevo modelo. Una vez aprobado,

se realiza un plan de detalle, en términos de dimensiones y material para cada parte. Posteriormente, se elaboran los planos de ingeniería de detalle para cada pieza. Para un automóvil de combustión interna completo, se requiere del diseño y desarrollo de entre 1000 y 2500 partes (Womack, Jones, & Roos, 1990).

Tradicionalmente, entre la empresa fabricante (o ensambladora) y el proveedor de piezas originales se presenta una interacción, de la siguiente manera: En el primer paso, el ensamblador entrega al proveedor un set de requerimientos de producción y un número de productos a desarrollar, de acuerdo con el diseño de detalle elaborado internamente (Tang & Qian, 2008). Una vez el ensamblador designa las piezas, los proveedores inician el proceso de fabricación de piezas prototipo. Durante esta fase, se realizan los procesos de iteración del diseño de piezas, pruebas a prototipos por parte del proveedor, pruebas por parte del ensamblador, de manera que se va ajustando el diseño (Womack, Jones, & Roos, 1990). Posterior a las pruebas del proveedor y del ensamblador, este último identifica y formula cambios necesarios en cada pieza a ser realizados internamente y por el proveedor. Durante este proceso, el proveedor realizará cambios en los diseños de las piezas y en sus procesos de fabricación, de manera que garantice la entrega de los productos en las condiciones que demanda el ensamble del producto final. Una vez realizados los cambios y verificadas las variables de los productos, el ensamblador da la aprobación para comenzar la producción en volumen. Finalmente, el proveedor entrega el producto o servicio terminado.

Se ha identificado que involucrar de manera temprana al proveedor (que tiene mayor profundidad y dominio en los procesos para mejorar las piezas), permitiría integrar la creatividad y la innovación de los equipos de ingeniería de las empresas proveedoras en el proceso de desarrollo de nuevos productos, generando beneficios a través de la cooperación y aprovechando las fortalezas de cada parte, facilitando la obtención de ganancias mutuas (Tang & Qian, 2008). Sin embargo, integrar tempranamente al proveedor demanda mejorar condiciones de trabajo entre los equipos, de los niveles de confianza entre las partes y un entendimiento de los beneficios mutuos de un proceso de desarrollo conjunto, desde etapas preliminares a las acostumbradas. En algunos casos, exige un mayor nivel de intercambio de conocimiento (Roper, Hales, Bryson, & Love, 2009), que le permita generar nuevas ideas para producto o proceso, que conduzcan a la innovación.

El desarrollo de productos con mayores niveles de calidad, generalmente requiere del desarrollo de proveedores, lo que permitirá que la cadena de valor alcance mayores niveles de competitividad (Sánchez & Pacheco, 2018).

## 5. CONCLUSIONES

Los automóviles son productos integrados por sistemas complejos. El desarrollo de nuevos productos o de cambios en sistemas de un vehículo, se realiza cumpliendo procesos que demandan integración de equipos de trabajo entre los fabricantes de piezas y subensamblables y la empresa ensambladora (o fabricante). Partiendo de los requerimientos funcionales, cumpliendo una serie de etapas, se elaboran los diferentes diseños contando con restricciones asociadas con requerimientos geométricos, necesidades de materiales, demandas de transformación en los procesos de fabricación, entre otras.

La decisión de lanzar un nuevo producto o generar cambios en los sistemas de un vehículo, por lo general en este sector se da a nivel corporativo. Sin embargo, en cada subsidiaria (fabricantes o ensambladores) se identifican segmentos y se realizan adaptaciones con base en el diseño global y de las necesidades de los segmentos de mercado locales. Tanto las decisiones del corporativo como de las subsidiarias impactarán los procesos de diseño, desarrollo y de fabricación a nivel interno. También generarán un impacto en la identificación y selección de los proveedores de partes, así como en los procesos de diseño y de fabricación de aquellos que sean seleccionados para el desarrollo de cada producto, o del rediseño del sistema del vehículo que requiera modificación.

Las modificaciones en sistemas como el cuerpo del vehículo o el sistema motriz están siendo influenciados por la demanda de automóviles con mejor tecnología, que requieren la incorporación de soluciones que han sido implementadas en vehículos de alta gama. Estos cambios en vehículos de otros segmentos, generan requerimientos, por ejemplo, en la implementación de procesos automatizados o robotizados. En el caso particular de empresas con bajos volúmenes de producción, implementar este tipo de tecnología puede generar altos costos. Por lo tanto, para adoptar nuevos procesos de manufactura automatizados, se requerirá de análisis y selección adecuada de los equipos que cumplan con los requerimientos del proceso, así como plantear estrategias de adaptación a la línea de producción.

La industria automotriz mantiene continuamente procesos de intercambio de conocimiento con sus proveedores, particularmente en procesos de desarrollo de productos. Lo que le permite lanzar bienes con mayores niveles de calidad, mientras se desarrollan las capacidades de sus proveedores.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bogue, R. (2008). DaimlerChrysler installs new robot-based flexible assembly line. *Industrial Robot: An International Journal*, 35(1), 16-18.
- Dalla Nora, M. &. (2015). High load performance and combustion analysis of a four-valve direct injection gasoline engine running in the two-stroke cycle. *Applied Energy*, 159, 117-131.
- Drishtikona, I. (3 de 08 de 2007). <http://drishtikona.com/>. Recuperado el 09 de 12 de 2011, de <http://drishtikona.com/books/automobile-manufacturing/ch5.pdf>: <http://drishtikona.com/>
- ElMaraghy, H. A. (2012). Co-evolution of products and manufacturing capabilities and application in auto-parts assembly. *Flexible services and manufacturing journal*, 24(2), 142-170.
- European Commission - Joint Research Centre. (2018). *The 2018 EU Industrial R&D Investment Scoreboard*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- EFW. (2007). *Spot welding*. Porto Salvo: EWF.
- García, A., Vial, J., & Montañez, M. (2010). *Latinoamérica Situación Automotriz*. Santiago de Chile: BBVA RESEARCH.
- Gillespie, T. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale (PA): SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS.
- Glomski, P. T. (2005). *ACHIEVING WORLD-CLASS PERCEIVED VEHICLE QUALITY THROUGH IMPROVED ENGINEERING AND MANUFACTURING TOOLS*. Master of Science in Mechanical Engineering. Massachusetts (USA): Massachusetts Institute of Technology. Recuperado el 2019
- Jayaram, K., & Mohanraj, J. (2016). Influence of Tolerancing Methods and Aspects of Perceived Quality on Side closures of Luxury Cars. *14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT)*, 160-165.
- Leduc, P. D. (2003). Downsizing of gasoline engine: an efficient way to reduce CO2 emissions. *Oil & gas science and technology*, 58(1), 115-127.
- Lee, D. J., & Thornton, A. C. (1996). The identification and use of key characteristics in the product development process. *The 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference*.
- Livatyali, H., Laxhuber, T., & Altan, T. (2004). Experimental investigation of forming defects in flat surface-convex edge hemming. *Journal of Materials Processing Technology*, 20-27.
- Lutsey, N. P. (2010). *Review of technical literature and trends related to automobile mass-reduction technology*. Davis (USA): UC Davis: Institute of Transportation Studies. Obtenido de <https://escholarship.org/uc/item/9t04t94w>
- OECD. (2009). *RESPONDING TO THE ECONOMIC CRISIS: FOSTERING INDUSTRIAL RESTRUCTURING AND RENEWAL*. Paris: OECD.
- Preti, J. (2014). *PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE ROBÓ CARTESIANO DE BAIXO CUSTO PARA*

MANIPULAÇÃO DE PRODUTOS EM LINHAS DE  
MÉDIA CADÊNCIA. Bauru (Bz): UNESP.

- Roper, S., Hales, C., Bryson, J., & Love, J. (2009). *Measuring sectoral innovation capability in nine areas of the UK economy*. London: NESTA. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/cdcb/8182522cd5117dd87a2dd26c61c668c8aac8.pdf>
- Sánchez, C. M., & Pacheco, H. F. (2018). INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN EN EL SECTOR AUTOMOTOR. *Desarrollo Tecnológico e Innovación Empresarial*, 2(7), 8-17. Recuperado el 2019, de <https://colinnovacion.com/wp-content/uploads/2020/05/INVESTIGACION-DESARROLLO-E-INNOVACION-EN-EL-SECTOR-AUTOMOTOR.pdf>
- Scuracchio, B. G., de Lima, N. B., & Schön, C. G. (2013). Role of residual stresses induced by double peening on fatigue durability of automotive leaf springs. *Materials and Design*, 672-676.
- Simmons, R. S. (2015). A benefit-cost assessment of new vehicle technologies and fuel economy in the US market. *Applied Energy*, 157.
- Stylidis, K., Madrid, J., Wickman, C., & Söderberg, R. (2017). Towards overcoming the boundaries between manufacturing and perceived quality: an example of automotive industry. *50th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 63, 733 - 738. doi:doi:10.1016/j.procir.2017.03.091
- Svensson, M., & Mattiasson, K. (2002). Three-dimensional simulation of hemming with the explicit FE-method. *Journal of Materials Processing Technology*, 142-154.
- Tang, D., & Qian, X. (2008). Product lifecycle management for automotive development focusing on supplier integration. *Computers in Industry*, 59(2-3), 288-295. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compind.2007.07.002>
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2013). *Product Design and Development* (Quinta ed.). México (México): McGrawHill.
- Vivekanandan, N., Gunaki, A., Acharya, C., Gilbert, S., & Bodake, R. (Junio de 2014). DESIGN, ANALYSIS AND SIMULATION OF DOUBLE WISHBONE SUSPENSION SYSTEM. *International Journal of Mechanical Engineering (IJME)*, 2(6), págs. 1-7. Obtenido de <http://ipasj.org/IJME/Volume2Issue6/IJME-2014-06-04-033.pdf>
- Wiendahl, H. E. (2007). Changeable manufacturing: classification, design, operation. *CIRP Annals*, 56(2), 783-809.
- Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). *The Machine that Changed the World*. New York (NY): Simon & Schuster Inc.

INNOVACION®

# FABRICACIÓN DE CARROCERÍAS DE BUSES TIPO BRT EN COLOMBIA PARA TRANSPORTE DE PASAJEROS EN SISTEMAS DE TRANSPORTE MASIVO

**Hermann Fuquen G.**, Consultor en Innovación Tecnológica

**Resumen** — La fabricación de buses articulados y biarticulados para los sistemas de transporte masivo tipo BRT (Bus Rapid Transit), ha sido fundamental para la puesta a punto de sistemas de transporte masivo en distintas ciudades en el mundo. Para el caso colombiano, varias de las empresas fabricantes de estos vehículos recientemente plantearon la transformación de sus procesos productivos con el fin de desarrollar los nuevos buses usando motores de alta eficiencia diésel y de gas natural, que cumplen la normatividad ambiental más exigente como es el estándar europeo Euro VI, logrando disminuir las emisiones de partículas contaminantes en más de un 90% de las generadas por los buses de generación pasada. Es así como las nuevas flotas de transporte de sistemas BRT en distintas ciudades colombianas son renovadas con vehículos que cumplen altos estándares de calidad con bajas emisiones y vehículos fabricados localmente, lo que ha promovido que esta industria se prepare para nuevos retos y se transforme.

**Palabras Clave** — Buses de Transporte Masivo, Desarrollo de Producto, Proveedores de Autopartes, Bus Rapid Transit

## 1. INTRODUCCIÓN

La industria automotriz en Colombia ha desarrollado importantes capacidades, como es el caso de la fabricación de autopartes y ensamble de vehículos automotores de gran tamaño como lo son camiones y buses. Existen varias empresas que ensamblan buses tipo BRT (Bus Rapid Transit) para abastecer el mercado de grandes ciudades como Bogotá, las cuales han creado capacidades para proveer vehículos a otras ciudades colombianas y de países vecinos.

Los nuevos vehículos tipo bus BRT biarticulados y articulados que se venden en Colombia deben cumplir altos estándares de calidad y de alta eficiencia en consumo de combustible con niveles de emisiones limitados preferiblemente a la norma Europea Euro VI. Los nuevos vehículos aseguran su calidad a través de materiales y procesos productivos altamente eficientes y de alto componente tecnológico, por lo que las capacidades de ingeniería del personal de empresas fabricantes y ensambladoras de carrocerías se incrementaron al poder adaptar y mejorar varios procesos y técnicas de fabricación.

La legislación colombiana establece en la ley 1772 del 18 de Julio de 2019 que para el año 2023, los nuevos vehículos diésel que entren al mercado deberán cumplir los estándares establecidos en la norma Euro VI. También se establece que para el año 2035 todos los vehículos con motor diésel en el país deberán cumplir la norma Euro VI.

Al poder realizar la fabricación de estos buses en Colombia, se promueve la sustitución de importaciones de unidades que de otra manera deberían ser importadas,

en una industria de síntesis que genera empleos de calidad directos e indirectos. Por tanto, se desarrollan nuevas soluciones para enfrentar la demanda de buses para los sistemas de transporte masivo de la región, generando capacidades propias en las empresas colombianas que sostendrán las bases para que próximamente puedan adaptar sus procesos de fabricación más fácilmente a la nueva generación de buses eléctricos, los cuales serán el futuro de la movilidad y conllevan un mayor nivel de capacidades tecnológicas para su apropiación.



Las empresas ensambladoras realizan un esfuerzo tecnológico importante en el diseño de carrocerías para la fabricación de éstas utilizando por ejemplo chasis pertenecientes a las empresas Scania y Volvo. El chasis Scania es propulsado por un motor a gas natural y cumple con los niveles de emisiones determinados en la norma europea de emisiones Euro VI. Los chasis Volvo cuentan con motores diésel con tecnología Euro V de fábrica, aunque se le adiciona un catalizador o filtro que

hace que cumplan también con el standard Euro VI.

Por tanto, ambos tipos de vehículos alcanzan altas eficiencias en consumo de combustible y limitan su nivel de emisiones a los requerimientos más exigentes de la norma europea.

Para la fabricación y ensamble de vehículos en Colombia las empresas deben tomar decisiones en sus procesos, los cuales debe evaluarse, buscando asegurar una adecuada fabricación de los productos (Stylidis, Madrid, Wickman, & Söderberg, 2017). Por tanto, las empresas ensambladoras colombianas están implementando sistemas avanzados de control de la producción basados en transferencia de conocimientos de socios internacionales, los cuales permiten un control integral del proceso de producción, brindando mayor visibilidad de todos los trabajadores y un control integral de los procesos basados en sistemas de información versátiles y ejecutados en tiempo real.

## 2. ESTADO DEL ARTE

Los sistemas de tránsito rápido de buses o BRT por sus siglas en inglés (Bus Rapid Transit) ha sido una solución viable para varias ciudades alrededor del mundo, la cual se enfoca en usar buses junto a estaciones de pasajeros, por lo general en vías dedicadas sin tráfico mixto, basado en un plan operativo y tecnológico enfocado en el usuario que sea costo eficiente (Nikitas, 2015). Se trata de emular la infraestructura aplicada en el transporte de pasajeros en tren, donde las estaciones son el punto de carga y descarga de pasajeros (Currie, 2011).

Las aplicaciones de BRT están diseñadas para ser apropiadas en los mercados que atienden, teniendo en cuenta sus entornos físicos, y pueden implementarse de manera incremental en una variedad de configuraciones y tipos. Debido a las ventajas inherentes a la flexibilidad de los autobuses, por ejemplo, a diferencia de los sistemas ferroviarios, el mismo vehículo que funciona como un transportador de línea también puede transformarse en un alimentador local, el BRT también es adecuado para muchas áreas de menor densidad (Cervero R. K., 2011).

Sin embargo, el vasto potencial del BRT podría utilizarse a su ritmo máximo en entornos urbanos congestionados donde los servicios de tránsito masivo adecuados no podrían ser proporcionados a los usuarios por opciones modales más costosas, como el tren ligero o el metro (Nikitas, 2015). Por tanto, los sistemas BRT son una solución de bajo costo de inversión inicial, al compararlos con sistemas ferroviarios, mientras que su costo de operación es moderado (Hidalgo, 2010).

### Buses con Motores Diesel Euro VI

Se introdujeron una serie de disposiciones importantes en la regulación Euro VI que han dado como resultado una mejora significativa en el rendimiento de las emisiones en el mundo real para los motores certificados según estos estándares. Estos incluyen límites de emisión de contaminantes más estrictos y la introducción de ciclos de prueba de certificación que representan mejor las condiciones de conducción del mundo real, incluidos los requisitos de arranque en frío, los requisitos de prueba de conformidad en servicio y los períodos de durabilidad prolongados (Chambliss, 2015).

Es importante destacar que los estándares Euro VI introdujeron un límite de emisión de partículas, que ha exigido el uso de la tecnología más efectiva para controlar las emisiones de PM (material particulado) de los motores diésel contando con filtros avanzados de partículas diesel (DPF) en los diseños de motores diesel Euro VI. La regulación Euro VI también reforzó las medidas contra la manipulación para los sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR) utilizados para controlar las emisiones de NOx (Façanha, 2016)

En la figura 2 se puede apreciar la notable reducción en contaminantes donde por ejemplo se redujo el material particulado (PM) en un 91% y de NOx se presenta una reducción del 94%. La figura 2 evidencia el notable progreso desde los motores Euro III hasta los nuevos Euro VI (Dallmann, 2019).

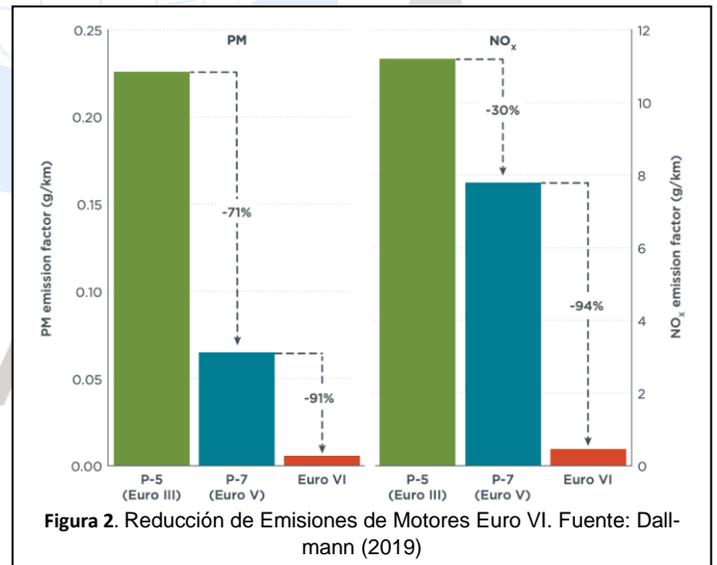


Figura 2. Reducción de Emisiones de Motores Euro VI. Fuente: Dallmann (2019)

Otra ventaja de los motores Euro VI es que la emisión de carbón negro el cual representaba el 75% del material particulado emitido por los viejos motores diésel es reducido en un 99% gracias a la utilización de filtros especiales de material particulado. Por tanto, estos buses según Dallmann (2019) podrán ser utilizados en el cor-

to plazo para alcanzar las metas cercanas de la ley de Sao Paulo.

### 2.1. BUSES CON MOTORES CON USO DE BIOCOMBUSTIBLES

En Brasil al igual que en Colombia, se ha utilizado una mezcla de hasta el 10% de biocombustibles con combustibles fósiles como la gasolina o el diésel. Para el 2023 se espera que la mezcla alcance hasta un 15% de biocombustibles. Los biocombustibles, por definición, tienen cero emisiones de CO<sub>2</sub> en el tubo de escape y, por lo tanto, pueden contribuir significativamente al cumplimiento de la Ley 16.802 de Sao Paulo (Dallmann, 2019).

Sin embargo, las reducciones en las emisiones de CO<sub>2</sub> en el tubo de escape no necesariamente equivalen a impactos al medio ambiente más bajos, en particular porque las reducciones de las emisiones del ciclo de vida del combustible no se tienen en cuenta. Las emisiones aguas arriba de la producción de estos combustibles y las materias primas de las que se derivan pueden ser significativas. Esto es especialmente cierto para los biocombustibles producidos a base de materias primas alimentarias, como el biodiésel de aceite de soja, donde el uso de la tierra cambia la matriz de emisiones que puede superar a las reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> del tubo de escape logradas por las transiciones a estos combustibles (Currie, 2011).

### 2.2. CATALIZADORES Y FILTROS PARA EL CONTROL DE EMISIONES EN VEHÍCULOS DIESEL

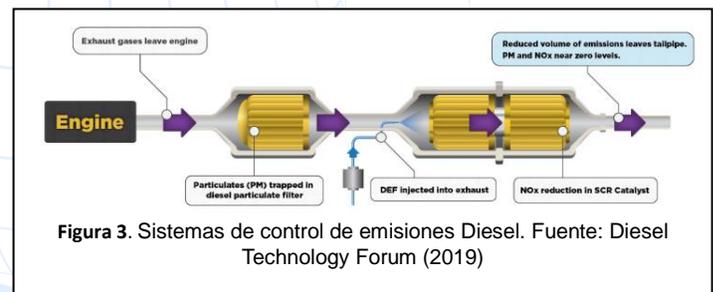
#### 2.2.1. REDUCCIÓN CATALÍTICA SELECTIVA - SCR

La reducción catalítica selectiva o Selective Catalytic Reduction (SCR) es un sistema avanzado de tecnología de control de emisiones activas que inyecta un agente reductor de líquidos a través de un catalizador especial en la corriente de escape de un motor diesel. La fuente reductora suele ser la urea de grado automotriz, también conocida como líquido de escape diésel (DEF). La DEF desencadena una reacción química que convierte los óxidos de nitrógeno en nitrógeno, agua y pequeñas cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), componentes naturales del aire que respiramos, que luego se expulsa a través del tubo de escape del vehículo (Diesel Technology Forum, 2019).

La tecnología SCR está diseñada para permitir que las reacciones de reducción de óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) tengan lugar en una atmósfera oxidante. Se llama "se-

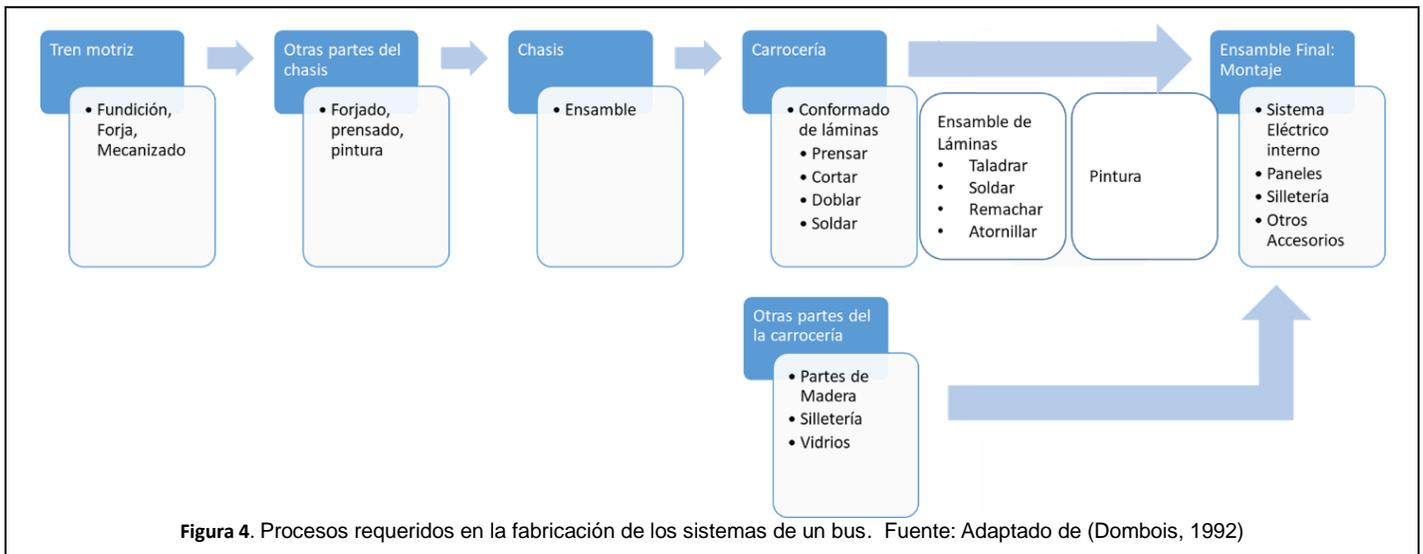
lectivo" porque reduce los niveles de NO<sub>x</sub> al usar amoníaco como reductor dentro de un sistema catalítico. La reacción química se conoce como "reducción" donde la DEF es el agente reductor que reacciona con los NO<sub>x</sub> para convertir los contaminantes en nitrógeno, agua y pequeñas cantidades de CO<sub>2</sub>. La DEF se puede descomponer rápidamente para producir el amoníaco oxidante en la corriente de escape. La tecnología SCR por sí sola puede lograr reducciones de NO<sub>x</sub> de hasta el 90 por ciento (Ibid).

La tecnología SCR es una de las tecnologías más rentables y económicas disponibles para ayudar a reducir las emisiones de los motores diesel. Estos sistemas permiten reducir el material particulado (PM) y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) a niveles cercanos a cero. SCR puede reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> hasta en un 90 por ciento, mientras que al mismo tiempo reduce las emisiones de HC y CO en un 50-90%, y las emisiones de PM en un 30-50%. Los sistemas SCR también se pueden combinar con un filtro de partículas diésel para lograr incluso mayores reducciones de emisiones para el PM. En la industria de camiones comerciales, algunos operadores de camiones equipados con SCR están reportando ganancias de ahorro de combustible del 3-5% (Ibid).



#### 2.2.2. TECNOLOGÍA DE REGENERACIÓN CONTINUA CRT

"CRT": una abreviatura del nombre comercial "Continuously Regenerating Technology", originalmente introducido como "Continuously Regenerating Trap", es una marca registrada de Johnson Matthey, cuyos investigadores describieron por primera vez el uso de NO<sub>2</sub> para la oxidación del hollín (Cooper, 1989). Este tipo de filtro también se conoce como el CR-DPF, que significa "filtro de partículas diesel de regeneración continua" (Ibid). La unidad CRT se compone de un filtro de partículas Diesel el cual puede eliminar virtualmente todas las partículas de hollín (PM) de los gases de escape emitido desde un motor diesel para garantizar el cumplimiento de estándares de emisión muy estrictos. A pesar del límite de emisión real, los filtros de partículas diesel satisfacen las necesidades de los operadores que logrando emisiones de hollín extremadamente bajas (Ibid).



Un filtro de partículas diesel elimina las partículas de hollín de los gases de escape que se producen durante el proceso de combustión que tiene lugar en el motor. Esto se hace dirigiendo el gas de escape a través del llamado sustrato de filtro, una estructura cerámica de poro fino con paredes porosas dentro del filtro. Las partículas de hollín se depositan en las paredes de los canales a medida que el gas de escape pasa a través de la estructura (Schäffner, 2017).

De otra parte, el sistema CRT se compone de un catalizador de oxidación diesel (DOC) debe su nombre a su capacidad para promover la oxidación de los componentes de los gases de escape por el oxígeno, que está presente en grandes cantidades en los gases de escape de motores diesel. Cuando se pasa sobre un catalizador de oxidación, el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos en fase gaseosa (HC), la fracción orgánica de partículas diesel (OF), así como emisiones no reguladas como aldehídos o HAP pueden oxidarse a productos inocuos, por lo tanto, se puede controlar utilizando el DOC. En los sistemas modernos de tratamiento diesel, una función importante del DOC es oxidar el óxido nítrico (NO) al dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), un gas necesario para respaldar el rendimiento de los filtros de partículas diesel y los catalizadores SCR utilizados para la reducción de NO<sub>x</sub>, (Russell, 2011).

### 2.3. PROCESOS DE FABRICACIÓN DE BUSES

El sector automotor se ha conocido como una industria de síntesis, por cuanto requiere, para el desarrollo de sus productos de la interacción de empresas de diferentes sectores productivos (Sánchez, 2017). En este mismo sentido, la fabricación de un vehículo involucra una serie de procesos de manufactura que van desde la fabricación de los sistemas motrices (motores, ejes, entre otros) que no se fabrica en Colombia, por lo que son partes y sub-ensambles importados, que se integran al chasis de los buses. Por otro lado, se realiza el ensamble

de la carrocería, para lo cual se realizan procesos de manufactura en lámina metálica, entre los cuales se encuentran procesos de corte, doblado, soldadura, armado y pintura. Posteriormente, se realizan los procesos de montaje de partes como piso, sillas, vidrios, sistemas eléctricos, luces, etc. (Dombois, 1992). Un esquema del proceso de fabricación, se puede ver en la Figura 4.

Los fabricantes de carrocerías desarrollan procesos de producción que permiten fabricar partes y componentes, así como realizar el ensamble de las carrocerías, tal como se ve en la Figura 4. Los vehículos están constituidos por piezas estandarizadas, razón por la cual se requiere adicionalmente en el proceso contar con herramientas que permitan la fabricación, ensamble y verificación de las geometrías y características de las partes y ensambles. Para ello, se utilizan moldes, dispositivos, troqueles, sistemas de sujeción, galgas, entre otros elementos en ocasiones fabricados también por la empresa. El número de referencias (partes) diferentes que requieren los vehículos implica la necesidad de especializar máquinas o secciones del proceso por familias de partes en algunas empresas. Adicionalmente, el desarrollo de nuevos vehículos genera la necesidad de realizar cambios de herramental frecuente, en la medida en que cambian los modelos de vehículos que pasan por la línea.

### 2.4. ESTADO DEL ARTE A NIVEL NACIONAL

Con respecto a las temáticas asociadas al presente artículo, se identificó una publicación como resultado de un proyecto financiado por ECOPEPETROL a la Universidad Nacional de Colombia, asociado con la implementación de gas natural comprimido, en un bus articulado del sistema de transporte masivo. Se hace referencia a una serie de pruebas realizadas sobre un bus articulado ensamblado por la empresa Colombiana de Chasises S.A. y carrocería BUSSCAR S.A., con el fin de establecer la viabilidad de implementación de este tipo de combusti-

ble y la tecnología que requiere, en vehículos para sistemas de transporte masivos. Los autores mencionan la realización de pruebas en Bogotá y Cali. Dentro del set de pruebas se realizaron: llenado de tanques, aceleración, velocidad máxima, arranque en pendiente, maniobrabilidad, consumo de combustible en trayecto urbano y flexibilidad – habilidad de giro, de acuerdo con especificaciones como SAE J1491, SAE J1635, SAE J695, SAE J218, SAE J68, y la norma colombiana NTC 4901- 1 Vehículos para el Transporte Urbano de Pasajeros, Parte 1. Como conclusión, se identificó que el vehículo cumplía con los requerimientos establecidos en las normas para su desempeño en transporte público urbano, excepto en su desempeño en Bogotá, donde no logró una velocidad igual o mayor a cuarenta kilómetros por hora (40 km/h) en veintidós segundos con cincuenta centésimas (22,50 seg) que son los requerimientos de la NTC 4901. Adicionalmente, los autores indicaron que no se contaba con aire acondicionado en el vehículo que fue probado, sistema que al implementarse, cambiaría las condiciones de desempeño del vehículo (Mantilla, Galeano, Acevedo, & Duque, 2008).

De acuerdo con la información disponible en la red Scienti, se pudo establecer que con las temáticas “bus rapid transit” y “BRT”, se encontraba una serie de documentos registrados por los investigadores, entre los que se identificaron 34 artículos, 21 trabajos de grado de pregrado, 14 trabajos de maestría, 11 documentos de trabajo y 2 capítulos de libro.

Al hacer un filtro vinculando las mismas palabras clave: “bus rapid transit” “BRT”, con la palabra “gas” o con “diesel” (COLCIENCIAS, 2019), el número de productos se limitó a 5 documentos, en temáticas dirigidas a desarrollo e implementación de los sistemas de transporte usando este tipo de vehículos.

- Road Safety Effects of Bus Rapid Transit BRT Systems a Call for Evidence
- Implementation of the Bus Rapid Transit BRT System in Colombia
- Metodología para la generación de tablas de programación y operación de un Sistema Bus Rapid Transit BRT con corredor compartido para dos rutas
- Estudio de factibilidad técnica para utilizar el carril exclusivo de un sistema BRT Bus Rapid Transit comparado con las motocicletas de la Ciudad De Bucaramanga

Al realizar una búsqueda con las palabras fabricación bus “transporte masivo”, se identificaron 5 productos: 2 artículos, 2 tesis de pregrado y una tesis de maestría.

## 2.5. PROCESOS DE PRODUCCIÓN

Los procesos de producción representan un importante

pilar de transformación para adaptar las capacidades de las empresas ensambladoras a los nuevos productos de buses articulados y biarticulados, por tanto, para alcanzar un mayor nivel de capacidad tecnológica, los equipos de ingeniería de las empresas diseñan el alcance de los nuevos requisitos de la plantas de producción con capacidades propias con nuevos conocimientos incorporados a partir de asesorías de empresas expertas dueñas de los diseños de buses a nivel mundial. Con estas fuentes de conocimiento se define los procesos de diseño para la realización de cambios en diferentes áreas de las empresas, con el fin de dar velocidad en la fabricación, soporte e implementación de mejoras.

Por tanto, se implementan procesos nuevos y eficientes por ejemplo para el doblado de perfiles y marcos de ventana, se deben realizar pruebas y se generan ajustes a los herramientas, a partir de los resultados de las pruebas. También se introduce procesos con corte laser más avanzados, así como mejoras en las áreas de laminación.

El proceso de secado y pintura también se transforma al contar con sistemas de accionamiento automático para la desviación del aire de la fase de pintura a la fase de secado, haciendolos más eficientes y rápidos.

Adicionalmente además de los anteriores y otros procesos productivos impactados para la mejora en el desarrollo de buses BRT, las empresas colombianas de ensamble de buses BRT han iniciado la conformación de áreas de investigación y desarrollo, con el fin de poder solucionar aspectos puntuales de los procesos de ensamble y fabricación de piezas junto a proveedores e iniciar un camino para realizar investigaciones formales para el aumento de la productividad en el mediano plazo.

## 3. CONCLUSIONES

La fabricación y ensamble de buses BRT a nivel local permite mejorar las capacidades industriales en Colombia y disminuir el volumen de vehículos importados generando mayor competitividad y menor dependencia tecnológica. Proyectos que sirven como punto de partida para aumentar sus capacidades y escala industrial, a través de la mejora de sus procesos y capacidades de diseño con el fin de ser capaz de satisfacer la demanda futura en la región.

Al desarrollar este tipo de proyectos, se pueden establecer las bases para que en el mediano plazo la industria nacional se adapte a la fabricación de la nueva generación de buses eléctricos los cuales serán el futuro de la movilidad y conllevan un mayor nivel de capacidades tecnológicas para su apropiación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Cervero, R. K. (2011). Bus rapid transit impacts on land uses and land values in Seoul, Korea. *Transport Policy*, 18(1), 102-116.
- Chambliss, S. &. (2015). Accelerating progress from Euro 4/IV to Euro 6/ VI vehicle emissions standards. *International Council on Clean Transportation*, 1-17.
- COLCIENCIAS. (2019). *Buscador Colciencias*. Retrieved from Sitio Web de COLCIENCIAS: [https://sba.colciencias.gov.co/Buscador\\_Productos/busqueda?q=%22bus%20rapid%20transit%22%20brt%20diesel&pagenum=1&start=0&type=load](https://sba.colciencias.gov.co/Buscador_Productos/busqueda?q=%22bus%20rapid%20transit%22%20brt%20diesel&pagenum=1&start=0&type=load)
- Cooper, B. T. (1989). Role of NO in Diesel Particulate Emission Control. *SAE Technical Paper* 890404. doi:doi:10.4271/890404
- Currie, G. D. (2011). Understanding bus rapid transit route ridership drivers: An empirical study of Australian BRT systems. *Transport Policy*, 18(5), 755-764.
- Dallmann, T. (2019). Climate and Air Pollutant Emissions Benefits of Bus Technology Options in Sao Paulo. *The international council of clean transportation*, 1-47.
- Diesel Technology Forum. (2019, 06 26). *About clean diesel*. Retrieved from What is SCR?: <https://www.dieselforum.org/about-clean-diesel/what-is-scr>
- Dombois, R. (1992). *Trabajadores en el cambio industrial: estudio de una empresa del sector automotriz*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Retrieved 2019, from <http://bdigital.unal.edu.co/1553/>
- Façanha, C. (2016). *Deficiencies in the Brazilian PROCONVE P-7 and the case for P-8 standards*. International Council on Clean Transportation.
- Hidalgo, D. C. (2010). Modernizing public transportation, lessons learned from major bus improvements in Latin America and Asia. *World Resources Institute*.
- Mantilla, J. M., Galeano, C., Acevedo, H., & Duque, C. A. (2008). Implementación de un bus articulado con motor dedicado a gas natural en los sistemas de transporte masivo de Colombia: Estudio Técnico. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 18-32. Retrieved junio 2019, from <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n43/n43a02.pdf>
- Nikitas, A. K. (2015). A worldwide state-of-the-art analysis for bus rapid transit: Looking for the success formula. *Journal of Public Transportation*, 18(1), 3-12.
- Russell, A. E. (2011). Diesel Oxidation Catalysts. *Cat. Rev. - Sci. Eng.*, 53(4), 337-423. doi:doi:10.1080/01614940.2011.596429
- Sánchez, C. M. (2017). Serie de Empresas Innovadoras: GRUPO FANALCA. *COLINNOVACION TE CONECTA*, 3, pp. 1-4. doi:10.13140/RG.2.2.17371.41769
- Schäffner, G. (2017). How does a Diesel Particulate Filter work? *MTU Report*, 1-12.
- Stylidis, K., Madrid, J., Wickman, C., & Söderberg, R. (2017). Towards overcoming the boundaries between manufacturing and perceived quality: an example of automotive industry. *50th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, 63, 733 - 738. doi:doi:10.1016/j.procir.2017.03.091

INNOVACION

# INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES A REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EXISTENTES

[Juan C. Salavarría](#), Consultor en Innovación Tecnológica (COLINNOVACION)

**Resumen** — En el país se encuentran zonas geográficas en donde se presentan una alta probabilidad de inversión en proyectos asociados con generación eléctrica a través de fuentes no convencionales de energía. Estas zonas del país son ricas en radiación solar y viento constante, lo que motiva a las empresas a desarrollar proyectos de generación aprovechando condiciones geográficas y medioambientales. Sin embargo, es fundamental determinar los problemas y retos para la incorporación de dichos proyectos de generación al STN (Sistema de Transmisión Nacional) y determinar las especificaciones técnicas que lo hacen viable.

**Palabras Clave** — FNCER, Fuentes no Convencionales de Energía, Energía Eólica, Energía Solar Fotovoltaica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Colombia en la actualidad enfrenta grandes retos para lograr la integración de sistemas de fuentes no convencionales de energía como la generación eólica y solar a gran escala. Por tanto, se hace necesario realizar investigaciones de carácter tanto técnico como tecnológico que permitan identificar desde los impactos económicos que tendría la implementación de este tipo de proyectos para las empresas, al igual que los mecanismos de integración de este tipo de generación al sistema de transmisión nacional (STN) ya que por su naturaleza requerirán de medios de almacenamiento y de transmisión que no han sido aún utilizados en gran escala en Colombia, por lo que definir metodologías para lograr integrarlas al STN es de vital importancia para lograr el éxito en este tipo de esquemas de generación.

La naturaleza de las fuentes de energía no convencional es caracterizada por inyecciones fluctuantes de potencia, en un sistema de transmisión que puede ser controlada o mitigada con nuevas tecnologías asociadas, como, por ejemplo, el almacenamiento de energía. A su vez, el desarrollo de parques eólicos o granjas solares de gran escala se ve afectado por factores de impacto técnico, ambiental y social que requieren ser analizados.

Uno de los retos que se presentan se centra en que las fuentes de energía renovable han incrementado su participación de manera exponencial en los mercados eléctricos mundiales, es por eso que los sistemas convencionales de generación, transmisión y distribución, y los esquemas de mercado locales enfrentan nuevos retos para ser más eficiente su operación, desarrollo y pla-

neación. Las experiencias internacionales demuestran que a través de diversos estudios y reportes elaborados por centros de investigación, agencias estatales, consultores independientes e investigadores como por ejemplo la IEA (International Energy Agency) que reflejan lo que en años recientes se ha constituido en toda una línea de investigación y estudio alrededor de los aspectos que requieren ser abordados al momento en que inicia la concepción de este tipo de proyectos (IDB, 2012).

Los impactos estudiados sugieren la necesidad de aplicar cambios a las prácticas operacionales, introducir nuevos mecanismos de mercado y realizar inversiones en infraestructura con nuevos sistemas y esquemas organizacionales (UPME, 2016).

El desarrollo de un proyecto de generación de energía no convencional y su respectiva interconexión al SNT (Sistema de Transmisión Nacional), como se muestra en la figura 1, debe tener en cuenta los impactos asociados a la operación y al desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica en sistemas de transmisión de AT (alta tensión) y la transmisión en HVDC / HVAC (High Voltage Direct Current / High Voltage Alternate Current) para la conexión y optimización de la operación de generación. Este tipo de proyectos deben evaluar lo siguiente (Zahedi, 2011):

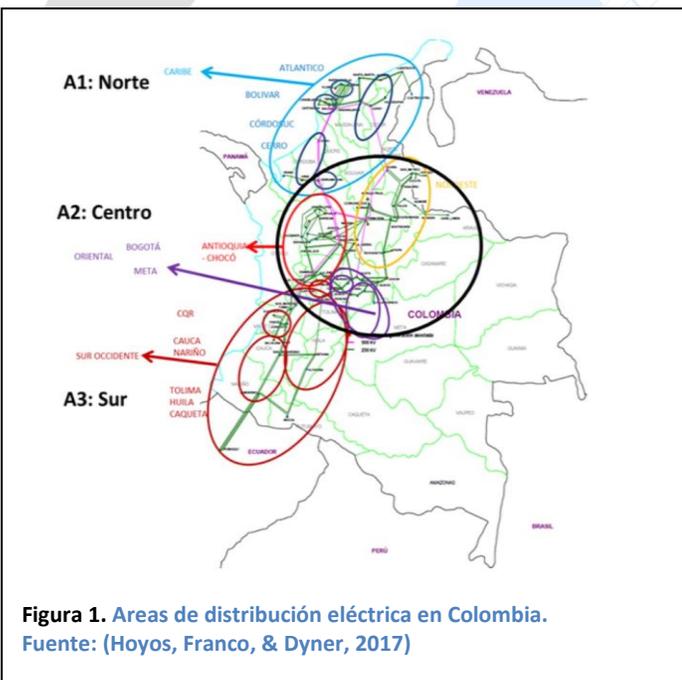
- Alternativas de conexión de parques eólicos y granjas solares entre 300 a 400 MW y los impactos de estabilidad del sistema interconectado nacional (SIN), (ver Figura 1), por la integración este tipo de proyectos en el sistema colombiano usando tecnologías de conexión HVAC (líneas de transmisión AC convencionales de alta

tensión) y HVDC.

- Impactos en capacidad de transmisión y estabilidad, se originan al ubicar grandes equipos de almacenamiento de energía eléctrica en sistemas de transmisión, lo que permite disminuir la variabilidad de la potencia generada y aportada por el generador al SIN.

- Determinar las tecnologías de almacenamiento de energía que permitan aprovechar el recurso con el fin de reconocer los posibles beneficios de la incorporación de los sistemas de almacenamiento en redes de transmisión.

- Evaluación inicial de los impactos ambientales de orden mayor de la utilización de las tecnologías de transmisión y de almacenamiento de energía en AT (Alta Tensión), que permitan viabilizar el proyecto



El siguiente artículo hace una introducción a los modelos usados para la implementación de fuentes no convencionales de energía al SNT, analizando los beneficios e impactos de su implementación

## 2. MODELOS de PLANEACIÓN DE LA OPERACIÓN DE GENERACIÓN

Los modelos de planeación son usados para analizar cómo evoluciona y cómo se comporta la sostenibilidad del sistema energético. Son generalmente modelos Bottom-up, que a partir de un conjunto de tecnologías de generación e información de demanda determinan el costo/beneficio de las alternativas de planeación y con-

tribuyen a alcanzar eficiencia en términos de política y estrategia energética. (Bhattacharyya & Timilsina, 2010).

Cada modelo es más una herramienta que una solución estándar y permite representar la complejidad del sistema eléctrico y de generación, donde se puede considerar la operación agregada o individual de las plantas, analizando el horizonte de la operación y las restricciones técnicas del sistema para adecuarse a los límites del costo de la inversión. A continuación, se resumen algunos de los modelos más populares usados en el planeamiento de la expansión y operación generación:

MARKAL y TIMES con la participación de diferentes laboratorios y grupos de investigación y auspiciado por la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) es una familia de herramientas que permiten evaluar el progreso de un sistema energético sobre un periodo de 40 a 50 años (Loulou, Goldstein, & Noble, 2004). TIMES es un modelo de generación basado en programación lineal que permite minimizar los costos del sistema y cuya optimización incluye toda la cadena del proceso de generación (Loulou, Goldstein, & Noble, 2004).

MADONE es desarrollado por Electricité de France (EDF) y evalúa el sistema eléctrico europeo por completo: Es un modelo multi-energético (varias fuentes de energía) que puede tratar con la variabilidad y la incertidumbre en la oferta y demanda de energía. El modelo Continental, también desarrollado por EDF, hace simulaciones sobre el despacho de energía para sistemas hidro-térmicos, incluyendo los costos de inversión en generación, los precios de la energía y la remuneración de los agentes (Burtin & Silva, 2015).

WASP, desarrollado para la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés), es un modelo usado para determinar la expansión óptima de generación considerando los requerimientos de confiabilidad del sistema (IAEA, 1985). Este modelo fue tradicionalmente empleado en sistemas con alta componente térmica.

LEAP/OSeMOSYS, permite calcular los escenarios de expansión de la operación y de la transmisión bajo un esquema de menor costo de inversión y operación usando un modelo de despacho (Bhattacharyya & Timilsina, 2010).

SUPER OLADE, modela la expansión de la generación y transmisión eléctrica de un sistema hidro-térmico interconectado a mediano y largo plazo, lo que permite una optimización del costo de la inversión, minimizando el riesgo de pérdidas de energía (Schaeffer, y otros, 2014).

OPTGEM es un modelo para la planificación de la expansión de la generación e interconexiones energéticas. El

objetivo de este modelo es determinar el esquema de inversión de mínimo costo (suma de los costos de inversión más el valor esperado de los costos de operación) destinado a la construcción de nuevas plantas de generación y líneas de interconexión entre sistemas. (ETESA, 2009).

### 3. BENEFICIOS DE LA INTEGRACIÓN DE FUENTES RENOVABLES

Es necesario identificar los beneficios que se obtienen de la integración de fuentes no convencionales de energía a redes de energía consolidadas en los sistemas de transmisión locales. Diversas fuentes como como (Zahedi, 2011), (IDB, 2012) & (IRENA, 2016) plantean beneficios a nivel macro como los de política de Estado como son: la seguridad energética, el logro de beneficios ambientales, la mitigación del cambio climático, la reducción de la contaminación del aire y mejoramiento de la salud pública, la generación de empleo. Esto lleva a los países a plantear una estrategia que lleve a su industria energética a ser base de crecimiento económico.

El Centro de Investigación en Energía de Holanda - Energy Research Centre of the Netherlands - (ECN, 2014) establece las características que van a ser impactadas en mayor medida al momento de hacer una integración a una red eléctrica, se debe considerar que estas dependen de factores particulares a cada sistema y cada caso:

- Factores de carga y los niveles de penetración involucrados.
- Perfiles de generación de las fuentes variables integradas.
- Curvas de carga y su correlación con la generación a partir de diferentes fuentes.
- La magnitud de la demanda pico.
- La mezcla de generación.
- El tamaño del área geográfica considerada y del área de balanceo en donde se realice el proyecto.
- Las conexiones de transmisión entre regiones / países.
- El diseño mismo de las redes de distribución.

En cuanto a los niveles de penetración de fuentes de energía no convencionales a la red, autores como (Georgilakis, 2006), (ECN, 2014), (IEA, 2014) & (Ueckerdt, Hirth, Luderer, & Edenhofer, 2014) coinciden en establecer una especie de regla general empírica, indicando que a niveles bajos de penetración en términos de la generación anual del sistema (del orden de 2%, 3%) no suelen evidenciarse mayores impactos (caso del escenario supuesto por (UPME-BID, 2015) para Colombia), mientras que los efectos empiezan a notarse con niveles de penetración superiores en el orden de 5% a 10% y progresivamente van cobrando mayor relevancia cuan-

do se alcanzan órdenes de penetración del 30% o 40% que son los máximos observados al día de hoy a nivel internacional (en promedio anual, no pico) Ibid.).

Es importante comentar que en el año 2015 el país con mayor índice de penetración en materia de la participación de renovables variables en su producción de energía eléctrica fue Dinamarca con un 42% de su electricidad generada a partir de energía eólica (The Guardian, 2016).

### 4. IMPACTOS DE LA INTEGRACIÓN DE FUENTES RENOVABLES

A su vez, los impactos de la integración de fuentes no renovables de energía a los que hace referencia la literatura en este campo de investigación, pueden clasificarse en cuatro categorías, las cuales se enumeran a continuación (ECN, 2014):

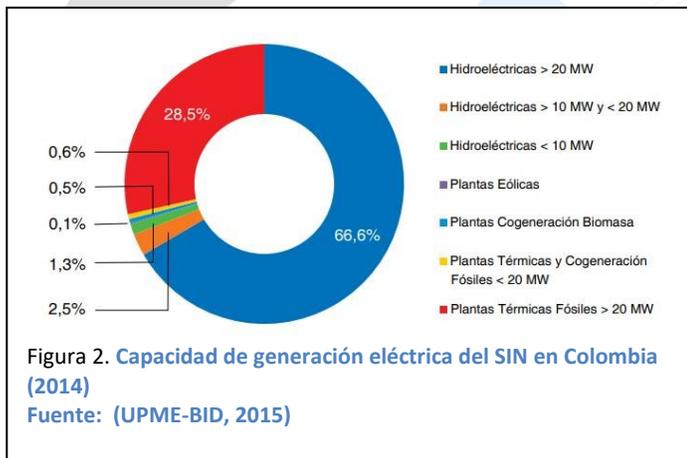
1. Impactos sobre el balance / control de frecuencia del sistema: categoría en la que se tienen en cuenta los costos asociados a la necesidad de incrementar el nivel de reserva energética y estabilidad del sistema, al igual que los costos ocasionados por la disminución de la potencia y el ciclo de generación exigido a plantas por los centros de despacho existentes, a su vez se tiene en cuenta la operación de estos equipos a un nivel de menor eficiencia y menor costo-efectividad.
2. Impactos sobre la red del sistema: se hace referencia tanto a redes de transmisión, como redes de distribución, cubriendo la necesidad de tener nuevas líneas para acceder a las zonas donde se cuenta con el recurso, lo mismo que de repotenciar o reforzar líneas existentes para atender nuevas exigencias operacionales. En este frente se pueden presentar igualmente beneficios en términos de reducción de pérdidas y desplazamiento en el tiempo de expansión de redes en el caso de sistemas de generación distribuida (IEA - RETD, 2014).
3. Impactos sobre la expansión y suficiencia del sistema: en esta categoría se contempla la disminución en el uso de plantas convencionales, dando lugar al llamado Utilisation Effect (el cual se centra en tecnologías que pueden conducir a formas nuevas y potencialmente más eficientes de utilizar la electricidad), y la necesidad de mantener plantas térmicas para darle seguridad o estabilidad al sistema.
4. Impactos sobre el mercado mayorista y sus precios: donde se incluyen en manera proporcional los efectos sobre los ingresos, la rentabilidad y la competitividad de las empresas generadoras, contando tanto a los que incluyen como a los que no incluyen las energías renovables entre sus portafolios.

Muchos de estos impactos se pueden mitigar con una

buena predicción de la energía disponible y diseño de los parques eólicos o plantas solares. Otras requieren ajustes a los esquemas de operación, expansión y manejo de los mercados.

## 5. MODELAMIENTO DE PLANTAS DE GENERACIÓN CON FUENTES VARIABLES

Se debe tener en cuenta como punto de partida las series debidamente caracterizadas de los recursos naturales utilizados para la producción de electricidad. Se hace necesario el modelamiento energético de las plantas que generan esa transformación energética a través de tecnologías hoy en día ampliamente desarrolladas como son aerogeneradores convencionales y paneles solares fotovoltaicos. En la siguiente figura, se puede observar la distribución por fuente de la mezcla energética en el país.



De manera general, se puede hablar de tres tipos de modelamiento que son utilizados en los estudios de planeamiento e integración de las energías renovables y que corresponden a: i) modelos de reducción de la demanda, ii) equivalentes hidro-térmicos, y iii) modelos independientes.

En el primer caso, se hace una modelación de la producción energética de las fuentes de energía renovable modificando la demanda horaria en función de dicha producción. Para esto, se define un perfil de producción horaria con base en el comportamiento del recurso (teniendo en cuenta condiciones climáticas promedio) y se reduce en esa misma medida la cantidad de energía demandada por el sistema. Pese a la facilidad de su utilización, esta alternativa de modelamiento presenta serios inconvenientes al momento de considerar la intermitencia y la incertidumbre en el comportamiento de los recursos renovables, ya que se deben tener en cuenta pronósticos de demanda semanales o mensuales, los cuales presentan deficiencias en la toma de datos.

El modelamiento bajo este principio considera que la

reducción en demanda se producirá con certeza y no hay manera de incorporar la probabilidad de una producción diferente, implicando adicionalmente distorsiones en la estimación del precio de la energía al no ser posible asumir tarifas de consumo y generación distintas entre sí para la generación distribuida. Adicionalmente, en análisis locales en los que la energía producida por los recursos renovables pueda superar la demanda, este enfoque presenta el problema de la aparición de bloques de demanda negativos (Carvacho Villanueva, 2011). Por los inconvenientes mencionados, el uso de esta alternativa de modelamiento resulta poco apropiado (Logan, Neil, & Taylor, 1994).

El segundo caso, en países como Colombia y Chile en los que se utiliza software específicamente diseñado para sistemas eminentemente hídricos y térmicos (como son el MPODE y el PLP - Modelo de Operación Económica de Largo Plazo de un Sistema Eléctrico), se ha hecho referencia al modelamiento de las energías renovables utilizando equivalentes hidro-térmicos, buscando la representación de la producción de energía de plantas eólicas y solares a partir de plantas hídricas equivalentes.

Esta alternativa cobra sentido en la medida en que una planta hídrica (a filo de agua) genera su energía según el comportamiento inmediato de una serie de caudales, de manera comparable a como sucede con un aerogenerador o un panel solar (a partir de una serie de velocidades de viento, o una serie de radiación solar, respectivamente). Luego, las metodologías de modelamiento utilizando esta alternativa consisten en hallar los caudales hídricos equivalentes que en conjunto con una planta filo de agua de determinadas especificaciones, mejor recrean la generación eléctrica producida a partir de la serie de viento o radiación solar y la planta de interés modelada (UPME, 2016) (Carvacho Villanueva, 2011).

Este tipo de modelamiento hidráulico para las energías renovables variables permite tener en cuenta la estocasticidad del recurso, y no presenta inconvenientes con relación a la formación de precios. A su vez, las dificultades que pueden resultar en su uso, están relacionadas con el detalle de modelamiento de tal generación que al ser transformada a una representación hídrica puede presentar pérdidas de información que afectan la precisión de los análisis, relacionadas con las aproximaciones utilizadas para representar la no linealidad de la curva de potencia de los aerogeneradores.

Para finalizar, la tercera alternativa de modelamiento consiste en usar modelos independientes de manera directa para cada fuente de generación renovable, que a partir de la información sobre el recurso permitan calcular la producción energética más probable. Se suelen calcular promedios de la producción en intervalos de tiempo, pero existen técnicas que permiten modificar los modelos para caracterizar de la mejor manera posible la generación de las fuentes en función de la resolu-

ción temporal seleccionada y de la información de recursos disponible. Por su mayor grado de precisión, es la alternativa de modelamiento que permite identificar y obtener el mayor detalle de información sobre las características, la producción y el comportamiento de la planta de generación a modelar (Carvacho Villanueva, 2011).

## 6. CONCLUSIONES

Adaptar el sistema eléctrico colombiano a un nuevo modelo de funcionamiento por medio de tecnologías de generación de energía con fuentes renovables, implica un desafío que debe ser estudiado, ya que el sistema colombiano es un sistema convencional que basa su generación en plantas hidroeléctricas y plantas térmicas (Ver figura 2), cuya participación en el despacho depende principalmente de los ciclos hidrológicos estacionales y fenómenos climáticos que los altera.

La matriz energética de Colombia es altamente dependiente de la energía hidroeléctrica, lo cual constituye una amenaza para la seguridad energética, tal como lo ha demostrado el impacto del fenómeno del Niño durante las últimas décadas. Además de estos factores, la previsible escasez de gas natural, sumada a los cambios en los patrones de precipitación producto del cambio climático, podría contribuir a los riesgos en materia de seguridad energética (BID, 2017)

El país, al momento de aprovechar el amplio potencial de generación eólica y solar disponible a través del desarrollo de grandes parques eólicos y granjas solares (UPME-BID, 2015), deberá invertir en el desarrollo de nuevas líneas de transmisión para distribuir esa energía y de refuerzos que garanticen la estabilidad del sistema, para esto, es esencial indagar en el modelo de generación para el país más apropiado, que permita un desarrollo del sector eléctrico con un enfoque de sostenibilidad y eficiencia largo plazo para el país.

INNOVACION

## BIBLIOGRAFÍA

- Bhattacharyya, S. C., & Timilsina, G. R. (2010). A review of energy system models. *International Journal of Energy Sector Management*, 494-518.
- Burtin, A., & Silva, V. (2015). *Technical and Economic Analysis of the European Electricity System with 60% RES*. EDF Research and Development Division.
- Carvacho Villanueva, J. (2011). *Integración de generación eólica en estudios de coordinación hidrotérmica de mediano/largo plazo*. Santiago de Chile.
- ECN. (2014). *Cost and revenue related impacts of integrating electricity from variable renewable energy into the power system - A review of recent literature*.
- ETESA. (2009). *Metodología del Modelo Optgen y Metodología del Modelo SDDP*.
- Georgilakis, P. S. (2006). *Technical challenges associated with the integration of wind power into power systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 852-863.
- Hoyos, S., Franco, C., & Dyner, I. (2017). Integración de fuentes no convencionales de energía renovable al mercado eléctrico y su impacto sobre el precio. *Ingeniería y Ciencia - EAFIT*, 115,146.
- IAEA. (1985). *Expansion Planning for Electrical Generating Systems: A Guidebook*. *Technical Reports Series*. International Atomic Energy Agency. Obtenido de [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS1/TRS2\\_41\\_Web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS1/TRS2_41_Web.pdf)
- IDB. (2012). *Societal benefits from renewable energy in Latin America and the Caribbean*. Technical Note: No. IDB-TN-623.
- IEA - RETD. (2014). *Residential Prosumers - Drivers and Policy Options (Re-Prosumers)*.
- IEA. (2014). *Grid Integration of Renewables: Executive Summary*.
- IRENA. (2016). *Renewable energy benefits: measuring the economics*.
- Logan, D., Neil, C., & Taylor, A. (1994). *Modeling Renewable Energy Resources in Integrated Resource Planning*. Boulder, Colorado: National Renewable Energy Laboratory. NREL.
- Loulou, R., Goldstein, G., & Noble, K. (2004). *Documentation for the MARKAL Family of Models*. Energy Technology Systems Analysis Programme.
- Schaeffer, R., Szklo, A., Lucena, A., Soria, R., González, E., Rathmann, R., & Chávez, M. (2014). *Manual de planificación energética*. OLADE Project.
- The Guardian. (16 de enero de 2016). *Denmark broke world record for wind power in 2015*. Obtenido de <http://www.theguardian.com/environment/2016/jan/18/denmark-broke-world-record-for-wind-power-in-2015>
- Ueckerdt, F., Hirth, L., Luderer, G., & Edenhofer, O. (2014). *System LCOE: What are the costs of variable renewables?* Potsdam-Institute for Climate Impact Research.
- UPME. (2016). *Plan de expansión de referencia. Generación - Transmisión 2015-2029*.
- UPME-BID. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*.
- Zahedi, A. (2011). *A review of drivers, benefits, and challenges in integrating renewable energy sources into electricity grid*. Queensland, Australia: School of Engineering and Physical Sciences, James Cook University.

INNOVACION



(57)+1 6725048  
(57) 315 796 6545



Carrera 20 No 184 - 48 Local 4  
Bogotá D.C., Colombia.



gzamudio@colinnovacion.com  
contacto@colinnovacion.com



[www.colinnovacion.com](http://www.colinnovacion.com)