

De sistema mecánico a sistema tecnológico complejo

El caso de los automóviles

Fecha de recepción: 05.03.2012

Fecha de aceptación: 28.05.2012

*Arturo Ángel Lara
Rivero*
Universidad Autónoma
Metropolitana–Xochimilco
alara@correo.xoc.uam.mx

Resumen

La mayoría de los trabajos de investigación relacionados con el sector automotriz se ha concentrado en el análisis de la naturaleza mecánica de los vehículos y, de una manera muy escasa, al estudio de su naturaleza electrónica. Para dar cuenta de las transformaciones profundas ocurridas en las últimas cuatro décadas es necesario integrar en la explicación la manera en que los componentes y los sistemas electrónicos han transformado la naturaleza de los vehículos automotores. El objetivo de este trabajo es analizar la naturaleza de los procesos evolutivos implicados en la transición del vehículo automotor: de un sistema complejo a un sistema complejo adaptable.

Palabras clave: evolución, tecnología, automotriz, redes, electrónico, *software*.

From a mechanical system to a complex technological system. The car case

Abstract

The great majority of the research papers, related to the automotive sector, have mainly focused on the analysis of the mechanical nature of the vehicles and barely on the study of the electronic nature of the new vehicles. To raise the profound changes occurring in the last four decades, it is necessary to explain how the components and the electronic systems have transformed the nature of the automobiles. The aim of this paper is analyze the nature of the evolutionary processes involved in the transition from the car, as a complex system, to a complex adaptive system.

Keywords: evolution, technology, automotive, networks, electronic, software.

Introducción

La investigación relacionada con el sector automotriz se ha concentrado en el análisis de la naturaleza mecánica de los vehículos (Abernathy, 1978; Fujimoto, 1999; Womack, Jones, Roos, 1990; Shimokawa, 2010)¹; pero no en la naturaleza electrónica de los nuevos vehículos, pues se realiza de una manera muy escasa (Nishiguchi, 1994; Klier y Rubenstein, 2008). Para dar cuenta de las transformaciones profundas ocurridas en las últimas cuatro décadas, es necesario integrar en la explicación la manera en que los componentes y los sistemas electrónicos han transformado la naturaleza de los vehículos automotores. Cabe decir que el 90% de la innovación que se produce en la industria automotriz se relaciona con los componentes electrónicos, 80% de los cuales están vinculados al software (Hardung, 2008).

Hasta la década de 1960 un vehículo convencional estaba básicamente conformado por componentes mecánicos; la integración de componentes electrónicos inicia su ascenso en los años setenta. Si se compara un vehículo típico de los años sesenta con los vehículos actuales, las diferencias cuantitativas son significativas, pero las transformaciones cualitativas son más profundas. En promedio, un nuevo vehículo

¹Por supuesto que la lista de trabajos es mucho más extensa y sólo se citan algunos de ellos. Asimismo, es preciso señalar que son muy numerosos los estudios de los automóviles desde la perspectiva de la ingeniería mecánica, eléctrica o electrónica. Este trabajo integra algunas de estos últimos estudios dentro del programa de la teoría de los sistemas complejos adaptables (Holland, 1996).

integra más de 40 unidades de control electrónico, 8 mil metros de cables y más de 10 millones de líneas de código de software (Klier y Rubenstein, 2008). Por esta razón se puede afirmar que el vehículo actual se parece cada vez más a una computadora y cada vez menos a los diseños surgidos a principios del siglo XX. Esta nueva capacidad de los vehículos de procesar información y de adaptarse al ambiente convierte a este sistema complejo en un sistema complejo adaptable.

El objetivo de este trabajo es analizar la naturaleza de los procesos evolutivos implicados en la transición del vehículo automotor, es decir, de un sistema complejo a un sistema complejo adaptable. En la reconstrucción de la trayectoria tecnológica de los automóviles las preguntas centrales que se busca contestar son las siguientes: ¿qué función cumple la existencia de distintos ritmos de cambio tecnológico?, ¿cómo se explica la emergencia de niveles jerárquicos en la evolución de la red de componentes electrónicos?, ¿cuáles son los atributos que permiten caracterizar a los nuevos automóviles como sistemas complejos adaptables?

El trabajo, además de esta introducción, se estructura de la siguiente manera. En primer lugar se sintetizan, de manera breve, las determinantes más importantes que explican el uso de componentes electrónicos en los vehículos. Luego se reconstruye la trayectoria que ha seguido la sustitución de partes mecánicas por componentes electrónicos. Después, y asociado con lo anterior, se describe la emergencia de una densa red de cables y conectores (arneses) que permiten el flujo de información y energía. En seguida, se analizan particularmente dos consecuencias de la convergencia: una mayor demanda de energía y de información; estos elementos permiten dar cuenta de la transformación cualitativa y cuantitativa de los vehículos como consecuencia de dicha convergencia. Posteriormente, se detalla un fenómeno central: la transición de la “integración de componentes” a la “integración de sistemas” y con ello la emergencia de la jerarquía. Finalmente, se analizan algunas de las vías que están utilizando las empresas del sector automotriz para enfrentar la complejidad y la vulnerabilidad de los sistemas electrónicos.

Convergencia del sector automotriz con el sector electrónico

Durante el periodo 1960-1969, las empresas del sector automotriz experimentaron el uso de componentes electrónicos. En 1960, Electric Autolite y Delco-Remy iniciaron el uso de transistores con el propósito de regular la energía eléctrica de los interruptores (*breaker points*). En 1961, Joseph Lucas, Ltd., patentó un sistema de encendido transistorizado que elimina la vieja tecnología de los interruptores. En

1963, Delco introdujo de una manera comercial el sistema de encendido transistorizado en los modelos Pontiac (Abernathy, 1978).

En este periodo resulta difícil la integración de los componentes electrónicos en un vehículo automotor. La industria requiere componentes pequeños, de bajo costo, confiables, resistentes, no sensibles a las altas temperaturas y a la vibración que proviene de los motores de combustión y/o de las condiciones de las carreteras. Los componentes grandes, como los “bulbos al vacío” (*vacuum tube*), son pesados, voluminosos, frágiles y añaden calor al sistema; además, son incapaces de operar en el ambiente hostil de un motor de combustión interna, debido a los gases y los elevados niveles de vibración y temperatura (200°F) del motor (Porter, 1983). Por todo ello, fue necesario mejorar la tecnología de los componentes electrónicos; en consecuencia, se empezó a requerir de nuevos diseños.

Con el desarrollo de los microprocesadores o unidades de control electrónico (ECU, por sus siglas en inglés) se inició una fase comercial acelerada de integración. A principios de la década de 1970, se introdujo el sistema electrónico de inyección de combustible; desde entonces el proceso no se ha detenido: aire acondicionado automático (1971), sistema electrónico de control de frenos (1971), sistema de encendido electrónico (1973), etcétera (Abernathy, 1978).

La integración de los componentes electrónicos en la industria automotriz se produjo como resultado de los siguientes sucesos: I) La intensa competencia al interior del sector automotriz por producir vehículos con atributos novedosos. II) Las exigencias gubernamentales de disminuir los niveles de emisión de contaminantes, lo cual se convierte en un poderoso mecanismo de convergencia; el ejemplo paradigmático es la transición del carburador al sistema electrónico de inyección de combustible (*fuel injection*). III) Las mayores exigencias de seguridad por parte de los usuarios y de los gobiernos de países desarrollados provocan la transformación de diferentes áreas funcionales del vehículo, por ejemplo, las bolsas de aire y el sistema de frenos controlado electrónicamente. IV) Los usuarios demandan vehículos con mayor confort, entretenimiento (CD, TV, ipod) e información (GPS). V) A partir de la crisis energética de inicios de 1970 y del incremento en los precios del petróleo, el mercado se inclinó por vehículos con mayor economía de combustible; esta situación provocó reemplazar el carburador y los sistemas mecánicos (pesados) por sistemas electrónicos. VI) La necesidad de resolver desequilibrios tecnológicos de la vieja tecnología asociada con la mecánica y que sólo el nuevo paradigma de la electrónica puede resolver; por ejemplo, utilizando la anti-

gua tecnología no era posible contar con un sistema de encendido más eficiente y de bajo mantenimiento,² pero el sistema electrónico de encendido sí lo hizo. VII) El incremento en la confiabilidad y la calidad de los componentes electrónicos alientan la incorporación de nuevos y más complejos sistemas que cumplen con un mayor número de funciones. VIII) La madurez de los procesos de manufactura y ensamble de los componentes electrónicos permite diseñar componentes electrónicos altamente específicos al sector automotriz, como es el caso de la producción del sistema electrónico de inyección de combustible, pues requiere maquinaria de alta precisión y confiabilidad para ser producido (Abernathy, 1978; Porter, 1983; Lara, 2000).³

¿De qué manera esta convergencia ha transformado la estructura de costos de los vehículos? El valor promedio de los componentes electrónicos por vehículo en 1977 fue de 110 dólares, lo que representaba el 5% del costo total de materiales y componentes de un fabricante de vehículos (Leen y Hefferman, 2002). Para el año 2000, el 20% del costo de un vehículo se relacionaba con los componentes electrónicos (Murray, 2009), lo que representó 1 800 dólares (Leen y Hefferman, 2002). Actualmente, en un vehículo promedio los componentes electrónicos contribuyen con más del 40% del costo total (Klier y Rubenstein; 2008). En los vehículos híbridos, el peso de los componentes electrónicos en la estructura de costos es aún mayor: el contenido electrónico (incluyendo la batería y el sistema de control de la batería) tiene un valor de 5 900 a 7 800 dólares; esto es, de 40 a 50% del costo total del vehículo híbrido (Alliance Bernstein, 2006). Sintetizando, la sustitución de componentes mecánicos por componentes electrónicos originó un cambio importante en la estructura de costos del vehículo; a continuación se menciona este proceso.

Sustitución de partes mecánicas por componentes electrónicos

¿Cuáles son las funciones mecánicas que han sido sustituidas por componentes electrónicos? La sustitución de sistemas mecánicos e hidráulicos por componentes eléctrico/electrónicos (E/E) se describe con el término genérico “X-by-wire”. Se ha identificado el reemplazo de más de nueve funciones vinculadas con la acelera-

²El antiguo sistema de encendido breaker-point requería mantenimiento periódico y no siempre se desempeñaba bien a altas velocidades o en ambientes fríos. El sistema de encendido electrónico reemplaza los breaker-points por componentes magnéticos y transistores; así, las deficiencias fueron eliminadas.

³Su producción requiere tolerancias de 1 a 1.5 micrones (Porter, 1983).

ción, frenado, cambio de velocidades, suspensión, integración encendido/alternador, control variable de válvulas, convertidor catalítico, dispositivos eléctricos, así como con otros accesorios eléctricos.

Uno de los primeros sistemas en utilizar unidades de control electrónicos (ECU, por sus siglas en inglés) fue el sistema de frenos ABS en 1978. En 1989 y 1995, se integraron en los vehículos sistemas electrónicos de control de la tracción y programas electrónicos de estabilidad, respectivamente. El primer componente del sistema “X-by-wire” introducido al mercado fue el “acelerador-por-cable” a fines de los noventa y principios del año 2000 (Anwar, 2009).⁴ El sistema de freno electro-hidráulico, como una forma de “frenos-por-cable”, fue introducido en 2000-2001 (Higgins y Koucky, 2002).⁵

De 1978 a mediados del año 2000 se integran en un vehículo nueve subsistemas: ocho combinan sensores, unidades de control electrónico y unidades de control hidráulico; uno —los frenos electromecánicos— combinan sensores, unidades de control electrónico y solenoides (Leen y Hefferman, 2002). Como resultado de este proceso, el número de componentes electrónicos crece de manera acelerada. En promedio, un vehículo utiliza entre 30 y 45 ECU, automóviles de lujo más de 70 (IHS Global Insight, 2009). Actualmente, un vehículo típico de Ford contiene 60 ECU, en tanto que hace 15 años contenía apenas 15 (Barkholz, 2010).

Comparado con el sistema mecánico, el sistema electrónico “X-by-wire” tiene distintas ventajas: es pequeño, ligero y menos costoso, lo que contribuye a liberar espacio para nuevas aplicaciones al disminuir costos y responder a la demanda de mayor eficiencia en el uso del combustible por parte del mercado. De acuerdo con los fabricantes, este sistema es más seguro, sensible y fiable.⁶

Así, el sistema de dirección-por-cable (*steering-by-wire*) sustituye al sistema tradicional de dirección hidráulica, con un motor eléctrico y un controlador electrónico de la tolerancia a fallos. Este sistema ya no es alimentado por el motor, sino por la

⁴A fines de la década de los noventa, Bosch, Continental y TRW introducen un sistema de frenos por cable (Anwar, 2009).

⁵Introducido por Mercedes Benz serie SL, pero removida del vehículo años más tarde debido a problemas (Higgins y Koucky, 2002).

⁶Como se verá más adelante, la seguridad de los nuevos sistemas E/E sobre la que descansa el desempeño de los sistemas “X-by-wire” resulta limitada.

batería, lo cual mejora la eficiencia del combustible y a la vez incrementa la importancia funcional de dicha batería. Éste es el aspecto clave que explica por qué con la adopción de un mayor número de sistemas —X-by-wire—, la batería se ha convertido en un componente cada vez más importante.

Cabe señalar que el uso de componentes E/E aparentemente contribuye a disminuir el peso total de los vehículos, pero en realidad lo incrementa. El sistema de frenado-por-cable es 13 kilogramos más ligero que un sistema de frenos hidráulico (Floerecke, 2007). De 1976 a 1981 efectivamente los vehículos se hacen más ligeros: bajan de 1 814 a 1 451 kilogramos (Kromer y Heywood, 2007);⁷ sin embargo, de 1981 al 2005 el peso de los vehículos vuelve a incrementar en un 28%, es decir, de 1 451 a 1 859 kilogramos (Kromer y Heywood, 2007). El mercado demanda mayor número de funciones —con elevado contenido E/E— que tienen como resultado no deseado el incremento del peso.

El proceso no termina ahí: un vehículo más pesado requiere un mayor volumen de energía. Dependiendo del tipo de conducción, entre el 2% y el 10% del consumo de combustible es causado por la demanda de poder de los componentes E/E (Christ, 2008). En consecuencia, se requiere diseñar sistemas de administración de energía cada vez más sofisticados, lo que implica añadir a los vehículos mayor complejidad, peso y costo. Desde esta perspectiva, la evolución de los sistemas tecnológicos complejos sólo puede ser explicada si se logra reconstruir la naturaleza de los desequilibrios tecnológicos: la mejora en un subsistema produce tensiones en otros subsistemas (Rosemberg, 1982). Una de las primeras implicaciones del proceso de sustitución de partes mecánicas por sistemas E/E es la construcción de una red extensa y compleja que permite el flujo de información y energía.

El vehículo convencional de combustión interna del periodo 1900-1970 se define por su núcleo clave de partes mecánicas relativamente complejas. Un sistema complejo está integrado por entidades interdependientes que interaccionan dentro de una estructura o red y que siguen reglas fijas; esta característica define bastante bien al sistema mecánico de este primer periodo. El vehículo actual es un sistema tecnológico que, mediante microprocesadores, procesa información; si bien es cierto que todavía utiliza un motor de combustión, las funciones esenciales de este sistema dependen de sistemas electrónicos avanzados. La naturaleza profunda

⁷Se estima que una reducción del 10% en el peso del vehículo resulta en un 3 a 4% de mejoramiento en la economía de combustible (California Energy Commission, 1997).

de los vehículos se transforma cuando se integran microprocesadores que tienen la capacidad de procesar información del entorno —mediante sensores y solenoides— para responder o para adaptarse a las condiciones variables del ambiente. Esta transformación cualitativa es característica de la transición de los vehículos de sistemas tecnológicos complejos a sistemas tecnológicos complejos adaptables.

Consecuencia de la convergencia: expansión de la red de arneses

El uso de dispositivos electrónicos ha conducido a la emergencia de una red extensa, pesada y costosa de arneses (cables y conectores). En particular, la creciente demanda del mercado por sistemas de entretenimiento ha forzado a los fabricantes a introducir cientos de metros adicionales de cables dentro del vehículo. En un vehículo de pasajeros típico el número de cables eléctricos del panel de instrumentos se duplicó de 70, en 1971, a 140, en 1985 (Nishiguchi, 1994). En 1994 el número total de cables eléctricos separados por vehículo es de 1 000 para el Toyota Crow y entre 1 500 a 1 600 para el Toyota Soarere⁸ (Nishiguchi 1994).

Actualmente, un vehículo puede contener más de 1 000 cables separados (Denton, 2004) y tener más de 8 000 metros de cables, comparado con los 45 metros que tenían los vehículos manufacturados en 1955 (Klier y Rubenstein, 2008). Por otro lado, en 1910 un vehículo contenía aproximadamente 30 circuitos; esta cantidad se incrementó en el vehículo de 1970 y de 2000, pues integra 300 y 1 800 circuitos, respectivamente (Rundle, 2002). ¿Cuáles son las consecuencias de la expansión compleja de la red de los arneses? Algunos de los efectos más importantes son los siguientes:

- I. La integración de componentes electrónicos trajo aparejado un mayor volumen de cables y por ende de peso. El cableado es el tercer componente más pesado y caro en un vehículo (IHS Global Insight, 2009).⁹ Los arneses, de una extensión de 4 828 metros, agregan entre 20 y 29 kilogramos al peso del vehículo; en los vehículos de lujo, el peso es mucho mayor (Murray, 2009).¹⁰ Cada 50 kilogramos de cables o 100 watts de poder extra

⁸Modelos de lujo.

⁹En un vehículo promedio el valor de los cables es de 315 dólares y de 757 dólares en un vehículo de lujo (Chew, 2004).

¹⁰De acuerdo con Murray (2009), los fabricantes de automóviles de lujo no quieren hablar del peso de sus vehículos, sólo de que quieren perder peso.

incrementa el consumo de combustible en 0.2 litros por cada 100 kilómetros de recorrido (Leen y Hefferman, 20028). De esta forma, el mayor peso de los arneses afecta una de las fuentes de ventaja competitiva de las empresas: la posibilidad de ofrecer vehículos con mejor rendimiento, es decir, un mayor kilometraje por litro de combustible.

II. Una red E/E en expansión demanda más espacio para los cables y sus conectores asociados. El mayor volumen de los arneses resta espacio y funcionalidad a los vehículos. Dado que el espacio físico dentro del vehículo es finito, los ingenieros están obligados a diseñar arneses en espacios cada vez más reducidos; esta situación incrementa las posibilidades de fricción, electromagnetismo, cortocircuitos, e inestabilidad en el flujo de información y energía. Adicionalmente a estas condiciones internas, está presente la interacción con un ambiente externo variable y extremo: una red más extensa en un espacio limitado crea condiciones crecientes de vulnerabilidad para el sistema. Por otro lado, la complejidad de los arneses conduce a otras dificultades, como el diagnóstico de fallas y la dificultad para casi cualquier modificación de los mismos.

III. Los cables actuales sólo pueden trabajar con menos de 60 volts, lo cual resulta insuficiente para los nuevos vehículos que utilizan “X-by-wire” porque utilizan alto voltaje, como sucede con los vehículos híbridos que trabajan con 600 volts (Wichmann, 2008). Tanto en los vehículos convencionales que utilizan “X-by-wire” como en los vehículos híbridos y eléctricos, se requieren cables con nuevos estándares de aislamiento que disminuyan las posibilidades de contacto-tierra de éstos, lo cual tiene consecuencias críticas para los ocupantes (Reiman y Mannel, 2008). Las empresas requieren establecer nuevas normas y estándares de diseño y fabricación de los cables y conectores.

¿De qué manera las empresas del sector automotriz están enfrentando la creciente complejidad de los arneses? El diseño convencional dominante (un componente electrónico, un cable) utilizado hasta mediados de 1980 resulta totalmente impráctico. Para reducir la complejidad de las grandes cantidades de cables se están construyendo diferentes estrategias:

- a) El diseño del sistema multiplex permite que un mismo cable pueda transmitir distintos paquetes de información, toda vez que por los cables se transporta energía e información. Los fabricantes de vehículos y proveedores reemplazan los cables de cobre por la fibra óptica, lo que les permite trabajar con banda ancha y reducir el peso de los arneses. Otras ventajas de la fibra óptica son su alta capacidad de transmisión, su insensibilidad a la interferencia electromagnética, así como su ligereza y pequeñez (Lara, 2000).¹¹
- b) Transitar a un nuevo sistema eléctrico de 42 volts. El sistema de 12 volts utiliza complejos y pesados arneses, lo cual plantea restricciones a la expansión de nuevos componentes E/E. Un vehículo convencional que trabaja con 12 volts contiene 2 kilómetros de cable con más de 30 kilogramos de peso (Giral-Castillón, 2005). Uno de los grandes beneficios de adoptar el sistema de 42 volts es disminuir la dimensión física de los cables en un tercio de su dimensión actual, así como también la reducción en el tamaño de los conectores (Rundle, 2002); asimismo, reduce el peso y costo de los arneses. Al liberar espacio dentro del vehículo, se facilita el ensamble de los componentes E/E.
- c) Diseñar formas de administración de energía e información relativamente centralizadas vía protocolos de información: *bus*. El uso de sistemas de control centralizado, por ejemplo, permite a BMW reducir en 15 kilogramos el peso de los arneses en el funcionamiento de sus vehículos cuatro puertas (Leen *et al.*, 1999). El uso de protocolos de información —y de ECU asociados— más desarrollados permite diseñar arneses más ligeros, seguros y compactos.

En la evolución de los arneses es posible identificar tres generaciones: la primera, donde la principal y exclusiva función es conducir electricidad. En la segunda se produce cuando la carretera de cables conduce electricidad e información; este sistema se caracteriza por un cable/una señal. Una tercera surge cuando un cable puede transmitir más de una señal (sistemas multiplexos); esta evolución debe

¹¹Las empresas automotrices asiáticas están adoptando el sistema MOS, protocolo de comunicación bus, para escalar a niveles más eficientes de distribuir información sin necesariamente transitar del cobre a la fibra óptica (Sostawa y Schöpp, 2009).

explicarse a través de la magnitud y el ritmo de crecimiento de las funciones, así como con el número de componentes electrónicos asociados a ellas.

Consecuencia de la convergencia: mayor demanda de energía

Durante la primera mitad del siglo XX se incorporó en los vehículos un número reducido de componentes, predominantemente eléctricos. En un principio la batería de 6 volts fue suficiente para alimentar este sistema eléctrico; sin embargo, para enfrentar el creciente número de componentes eléctricos que se añadían en un vehículo, la batería de 12 volts se convirtió en estándar en los años cincuenta (Abernathy, 1978) y en estándar dominante durante los últimos 50 años (Crouch, 2005).

Con la incorporación de componentes electrónicos, a partir de 1970, se estima que la demanda de poder en los vehículos convencionales creció a una tasa del 4% y 5% anual (Klier y Rubenstein, 2008; Leen y Hefferman, 2002).¹² Los nuevos sistemas “X-by-wire” requieren voltaje de 42 volts, y de 240 a 300 volts en los nuevos vehículos híbridos (Anwar, 2009).

En la medida que el consumo de energía eléctrica fue cada vez mayor y se requerían mayores voltajes, el estándar de 12 volts se convirtió en un cuello de botella porque difícilmente puede sostener la demanda de voltajes mayores y diferenciados de una red extensa de componentes E/E. Aunque la presión ha tendido a disminuir como resultado de la eficiencia en el diseño de cables y circuitos, todo indica que la demanda de energía seguirá creciendo (Alliance Bernstein, 2006).

En 1990, un grupo de empresas del sector automotriz buscó transitar al uso de 42 volts (Crouch, 2005); sin embargo, este nuevo estándar no prosperó porque el sistema eléctrico de 12 volts se volvió más eficiente (Truett, 2004) y porque los costos de cambio resultaron elevados. No es factible para una sola empresa asumir los costos del cambio, puesto que se requieren crear nuevos estándares que implican un gran y costoso rediseño de los componentes eléctricos. La migración de 12V a 42V puede implicar el rediseño total de las partes eléctricas o el rediseño parcial de las partes eléctricas a través del establecimiento de un sistema multivoltaje, el cual

¹²Este dato, sin embargo, puede ser conservador, puesto que solo la computadora de viaje de un vehículo consume 2kw (Miller, 1996).

puede estar alimentado por una batería o por la coexistencia de distintas baterías con distintos voltajes. Existen varias posibilidades de transición tecnológica con ventajas y desventajas. La adopción de un nuevo sistema eléctrico no es sólo un problema de costos o de conocimiento científico y técnico, sino también de coordinación y cooperación entre los fabricantes y proveedores del sector automotriz.¹³

Consecuencia de la convergencia: procesamiento de información

En 1969, el Apolo 11 empleó un poco más de 150 Kbytes de memoria para ir a la luna; treinta años después un vehículo convencional puede demandar 500 Kbytes sólo para el funcionamiento del reproductor de disco compacto (Powers, 2001). La capacidad de cómputo de los microprocesadores utilizados por los vehículos convencionales ha crecido exponencialmente: en 1997 era alrededor de un millón de transistores; los vehículos actuales tienen treinta millones de transistores (Lipman, 2004). De igual forma, en años recientes el monto de memoria asociado a cada microprocesador se ha incrementado rápidamente de 256 Kbytes, en 1996-1997, a 2 Mbytes o más (Powers, 2001).

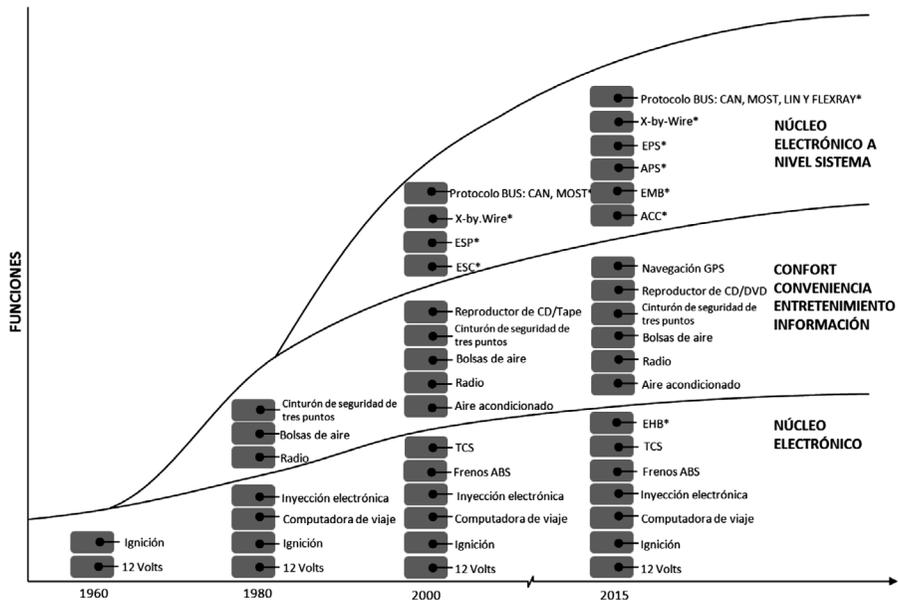
La capacidad de procesar información de los componentes electrónicos se produce con base en una jerarquía. En el nivel más alto se encuentra el “núcleo electrónico” del vehículo; esta categoría de componentes electrónicos claves son responsables de controlar o mejorar las funciones básicas del vehículo como aceleración, frenado, dirección, etc. En un segundo nivel se encuentra el núcleo electrónico a nivel de sistema donde distinguimos dos categorías: por un lado los sistemas electrónicos que proveen servicios de comunicación entre sistemas, ejemplos de ello son los protocolos de comunicación *bus* (software) utilizados para el flujo de información entre unidades de control electrónicos (ECU); por otro, los sistemas electrónicos que utilizan formas sofisticadas de coordinar ECU, sensores y actuadores para la realización de una función específica como los sistemas “X-by-wire”, los programas de estabilidad electrónica, entre otros.¹⁴ En el nivel más bajo de la jerarquía se encuentran los “productos electrónicos” que no desempeñan funciones básicas y

¹³Existen dos bloques de empresas impulsando esta transición. Uno, organizado en 1996, el Consortium and Advanced Automotive Electrical / Electronic Components and Systems, en el que participan Daimler, Honda, Mitsubishi Electric, Nissan, Toyota, Yazaki, entre otros. El otro grupo europeo es liderado por Daimler.

¹⁴En la sección De la integración de componentes a la integración de sistemas: surgimiento de la jerarquía se examina con mayor detenimiento la importancia del núcleo electrónico en el nivel de sistemas.

que sólo proveen beneficios a los conductores en términos de confort, conveniencia, entretenimiento e información (ver figura 1).

Figura 1
Innovación y evolución de las funciones electrónicas en un automóvil



Notas: ABS - Sistema de Frenos Antibloqueo; ESP - Programa Electrónico de Estabilidad; TCS - Sistema de Control de Tracción; EHB - Frenos Electro Hidráulicos; ESC - Control Electrónico de Estabilidad; CAC - Control de Navegación Adaptable; EPS - Sistema Dirección Electrónica; EMB - Frenos Electro Mecánicos; APS - Dirección Asistida; X-by-Wire Incluye: Conducción-por-Cable, Dirección-por-Cable, Frenos-por-Cable, Transmisión-por-Cable y Suspensión-por-Cable; CAN - Controlador de Área de Red; LIN - Red de Interconexión Local; MOST - Medios de Comunicación orientada a transporte de sistemas; FLEXRAY - Protocolo de comunicación BUS.
* En desarrollo.

Fuente: Elaboración propia a partir de Bauer (2007), Ingraham (1957), Paret (2007), Jones (2011), Mcintosh (2012), Rendle (1991), Freescale (2004), Bernstein (1988), Oxer y Blemings (2009), Rundle (2002), Brauer (2002) y Trevett (2002).

El cerebro del “núcleo electrónico” son las unidades de control electrónico (ECU) que son pequeñas computadoras,¹⁵ conectadas a sensores y solenoides, que controlan uno o más sistemas eléctricos o subsistemas de un vehículo;¹⁶ asimismo,

¹⁵El costo de un ECU varía de 10 a 15 dólares (Hansen Report, 2009).

¹⁶Existen distintos tipos de ECU asociados al módulo de control electrónico del motor, al módulo del sistema de propulsión, al módulo de control de la transmisión, al módulo del control del frenado, al módulo de control central, al módulo de tiempo central, al módulo electrónico general, al módulo de control del chasis, al módulo de control de la suspensión y al módulo de control.

colectan, guardan y presentan la información —recolectada a través de sensores incrustados en componentes claves— sobre el desempeño de los vehículos como velocidad, presión del aceite, temperatura del motor, distancia recorrida, etc. Basados en esa información los ECU determinan las condiciones óptimas para que el solenoide opere funciones específicas, como regular el flujo de aire (calor dentro del vehículo). Cabe señalar que un automóvil de mediano tamaño utiliza alrededor 40 ECU (Klauda y Lauff, 2008).

La computadora más poderosa es la unidad de control electrónico del motor (ignition ECU), la cual maneja distintas funciones como inyección de combustible, tiempo de la ignición, control de velocidad de ralentí, tiempo de encendido, etc. Los módulos de control del motor procesan arriba de 250 millones de instrucciones por segundo (MIPS), las cuales contienen más de 20 000 parámetros funcionales requeridos para administrar las complejas y críticas tareas del funcionamiento del motor (Klauda y Lauff, 2008). Por su parte, el módulo de control del sistema de propulsión actual demanda 550 veces más de memoria que los primeros sistemas de propulsión, que podían efectuar sólo 2 000 operaciones por segundo (Bogden, 2004). Lo anterior nos indica que la capacidad de procesamiento de información ha crecido de manera exponencial.

La tendencia en la industria automotriz es hacia la producción de ECU, en la que un software sofisticado se incrusta en un hardware de propósito especial. Este software incrustado, que se utiliza en vehículos motorizados, aviones y misiles, entre otros (Lee, 2002; Ebert, 2009),¹⁷ busca el máximo desempeño simultáneo tanto del software como del hardware. Los ECU con software incrustado se diseñan para que los sistemas interactúen con el mundo y para utilizarse en operaciones en “tiempo real”. Esta clase de dispositivos inteligentes explica también la transformación de los vehículos actuales en sistema complejos adaptables.

Sin embargo, no todos los sistemas de procesamiento de información de un vehículo se desempeñan en tiempo real. En un vehículo existen tres diferentes clases de requerimientos de información, conocidas como Clase A, Clase B, y Clase C. (Bonnik, 2001):

¹⁷No existe un diseño dominante de sistemas operativos que trabajen en tiempo real. Existe una población numerosa de diseños, por ejemplo, LynxOS, VxWorks, Linux, OpenWrt, PikeOS, eCos, BeRTOS, ThreadX, Windows CE, Fusion RTOS, Nucleus RTOS, RTEMS, Integrity, QNX and OSE.

- Clase A: Transmisión de información de velocidad baja (10 000 bits/s), usada para el cableado del cuerpo del automóvil como las lámparas exteriores, etcétera.
- Clase B: Transmisión de información de velocidad media (entre 100 000 bits/s a 125 000 bits/s), usada por los vehículos en los controles de velocidad, de emisiones, etcétera.
- Clase C: Transmisión de información de velocidad alta en tiempo real (125 000 bits/s a 1 000 000 bits/s o más), usada por el freno-por-cable, por el control de estabilidad y por la tracción.

La tendencia hacia procesos computacionales de alto nivel (requerimientos de clase C) son cada vez más importantes sobre todo en el funcionamiento de los sistemas “X-by-wire”, particularmente en los sistemas de seguridad, y de determinados subsistemas E/E de los vehículos híbridos y eléctricos que se desempeñan en tiempo real.

Este estudio de los procesos de cambio asociados a las nuevas capacidades de procesamiento de información permite representar uno de los fenómenos centrales que explican la transformación de los vehículos convencionales en sistemas complejos adaptables. La pregunta que se debe contestar en la siguiente sección es cómo explicar y vincular la diversidad de componentes con la emergencia de la jerarquía y con las nuevas capacidades de adaptación del sistema.

De la integración de componentes a la integración de sistemas: surgimiento de la jerarquía

Lo que permite la transformación de un vehículo convencional en un sistema complejo adaptable son las unidades de control electrónicos (ECU). En el proceso evolutivo de los ECU se pueden identificar cuatro distintos momentos y generaciones.

Una primera generación se produce a través de la integración de ECU de manera aislada. Desde 1970 hasta mediados de 2000, conforme se requieren integrar nuevas funciones E/E, se agregan al vehículo ECU débilmente interconectados. Esta generación desempeña una sola función, por ejemplo, la inserción aislada del control electrónico de los frenos (sistema ABS).¹⁸ De esta manera va creciendo

¹⁸Se integra en 1970 (Anwar, 2009)

un sistema tecnológico sobrecargado de ECU independientes —y de cables también—, pero con débil o nula interconexión entre ellos. Actualmente, al menos 80 ECU coexisten de manera independiente en un vehículo (Bauer, 2007). Este fenómeno evolutivo caracteriza a toda la gama de vehículos del sector automotriz. Uno de los problemas que impiden la evolución sostenida del sistema E/E en un vehículo se relaciona con la coexistencia de una diversidad de softwares (ver figura 2, inciso a).

La segunda generación de ECU evoluciona hacia niveles mayores de conectividad cuando se construyen interfaces (*buses*) que permiten la comunicación entre ellos, por ejemplo, ECU especializados en distintas funciones del motor (ver figura 2, inciso b). La necesidad de sistemas sofisticados de comunicación entre diferentes ECU ha convertido al software en la columna vertebral de los vehículos. Los protocolos de comunicación más comunes en el sector automotriz son: *Controller Area Network* (CAN)¹⁹, *Local Interconnect Network* (LIN), MOST, SAE J1850 y *FlexRay* (Lovati, 2009).

Aunque los protocolos de comunicación han alcanzado cierto grado de madurez en términos de implementación, el incremento de funciones dentro de un vehículo requiere agregar un número cada vez mayor de ellos. Evidentemente existen distintas vías para administrar esta población numerosa y heterogénea de protocolos de comunicación.²⁰ La estandarización permitiría desarrollar en un menor tiempo el software de un vehículo, así como facilitar el reuso (e intercambiabilidad) de los módulos de software entre los diferentes modelos, con la consecuencia de disminuir costos y simplificar el proceso de integración de nuevas funciones. Sin duda, existen problemas sustantivos que difícilmente un agente de manera individual podría asumir aisladamente y sin conflicto.²¹

Así, Toyota y Nissan crearon JASPAR (Japan Automotive Software Platform and Architecture).²² Uno de sus objetivos centrales es reducir el costo de desarrollo y

¹⁹El protocolo CAN fue desarrollado a principios de 1990. La primera empresa en integrar CAN en el chasis de un vehículo fue Opel en 2004 (IHS Global, 2009).

²⁰Por ejemplo, la iniciativa HIS propuesta por los desarrolladores de software, o el AUTOSAR (Automotive Open System Architecture) propuesta por una sociedad de desarrolladores que tienen como objetivo estandarizar las interfaces del software, así como diseñar el software de manera modular.

²¹El proceso de estandarización puede ser visto por los proveedores como una amenaza a su estabilidad porque les permitiría a las empresas ensambladoras cambiar fácilmente de proveedor. Desde esta perspectiva, esta opción parece la menos viable.

²²Otros miembros claves son Honda, Denso y ToyotaTusho Electronics.

mejorar la calidad del software del sistema electrónico de los automóviles; una vía para alcanzar esta meta es transitar a arquitectura modular de software y a la estandarización que permita la reutilización del software. De acuerdo con el ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón, se estima que la industria automotriz japonesa gasta en desarrollo de software aproximadamente 100 billones de yenes (903 millones de dólares) (Hofman, 2004); esto es diez veces más de lo que se gastaba hace 10 años y se espera que para 2014 este monto se triplique, es decir, un trillón de yenes (9.1 billones de dólares) (Hofman, 2004). En esta misma carrera de cooperación se crea AUTOSAR, en la que participan empresas europeas, norteamericanas y japonesas.²³

Una tercera generación emerge cuando los ECU son capaces de controlar y administrar un número reducido de funciones. Esta generación integra funciones que muestran requerimientos similares, constituyendo así un dominio más elevado de ECU relacionados (ver figura 2, inciso c). De esta manera, se abren las posibilidades de diseñar de manera modular sistemas cada vez más importantes de la arquitectura del vehículo. Por ejemplo, el sistema de seguridad 7-Series de BMW tiene como objetivo lograr la respuesta en tiempo real de 13 ECU, asociadas a distintas funciones: disparo de bolsas de aire, tensión de los cinturones de seguridad, activar los apoyos de cabeza y el sistema de seguridad pasivo (IHS Global Insight, 2009).²⁴ Asimismo, el sistema de “conducción-por-cable” integra cinco sistemas: prevención de colisiones, control de cruceo adaptable, dirección frontal adaptable, control de estabilidad y advertencia de las condiciones del camino.

En la medida que se integran más subsistemas electrónicos vinculados con distintas funciones críticas —frenado, dirección, suspensión, etc.—, también se integran protocolos de comunicación de alta velocidad capaces de responder en tiempo real: requerimiento clase C. Un vehículo mediano cuenta con 30 ECU, en tanto que un vehículo de lujo tiene 80 ECU, que cubren una amplia variedad de funciones (IHS Global Insight, 2009). Para responder a esta demanda, un vehículo requiere entre 4 y 5 *bus* CAN (IHS Global Insight, 2009).

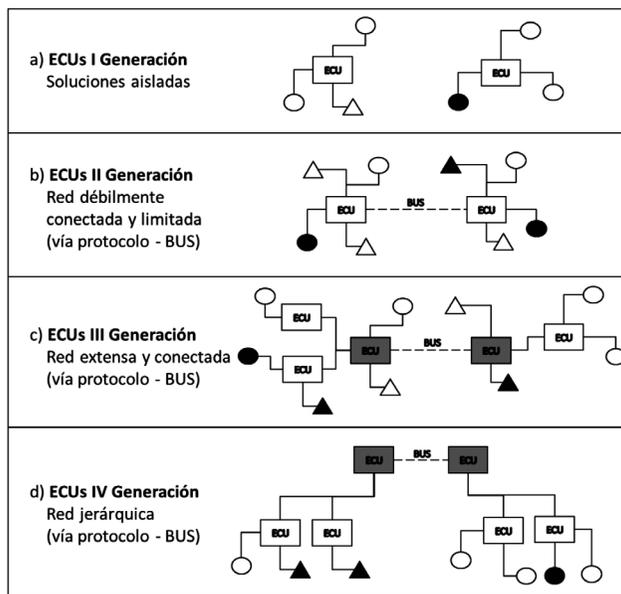
²³Los miembros claves son BMW, Bosch, Continental, DaimlerCrysler, Ford, PSA Peugeot Citroen, Siemens, Toyota y Volkswagen.

²⁴BMW desarrollo este protocolo en conjunto con Motorola, Infineon y Elmos.

Aunque la implementación de protocolos de comunicación (*buses*²⁵) ha reducido de manera significativa la complejidad de los arneses, la arquitectura de red de un vehículo común de mediana dimensión ha alcanzado un estado en el que lidiar con su nivel de complejidad es casi imposible.

En este contexto de necesidades surgen ECU de cuarta generación que pueden combinar múltiples funciones en un solo ECU, con lo que se disminuye el número de ECU. La meta de las empresas del sector automotriz es reducir de 40 a 20 ECU (Murray, 2009; Viehmann, 2009). Así, se busca esta reducción de ECU a través de otros más poderosos. Conforme se integra en los vehículos eléctricos e híbridos un número cada vez más grande de ECU se requiere construirlos más sofisticados y especializados, lo que explica la emergencia de un sistema jerárquico (ver figura 2, inciso d).

Figura 2
Niveles de la red de ECU



ECU: Unidad de Control Electrónico
BUS: Protocolo de comunicación BUS

Fuente: Elaboración propia a partir de Mischo *et al.* (2008).

²⁵Un protocolo de comunicación bus de un vehículo es una red de comunicación especializada que permite la interconexión de los componentes electrónicos. Debe asegurar una distribución de información segura, a bajo costo y en el menor tiempo.

Todas estas condiciones de refinamiento de los ECU permiten escalar a nuevas formas de integración de componentes electrónicos. Desde inicios de 2000 se transita de la integración de innovaciones que implican un componente/una función a una integración de innovaciones que demandan la interacción de diferentes componentes y sistemas: dirección asistida electrónicamente (EPS), dirección asistida adaptable (APS), sistema de seguridad predictivo (PSS), etc. Éstos son sistemas que requieren la interacción de diferentes componentes y subsistemas E/E.

Por lo anterior, las empresas están enfrentándose a la demanda de integración de una red densa y compleja de sistemas E/E. En la medida que las funciones de un vehículo se vinculan cada vez más entre sí, la actividad de innovación migra de la innovación aislada o autónoma a una innovación en un nivel de sistemas. Mientras que en el pasado un dispositivo servía para una función exclusiva, la tendencia es que actualmente sirva para más de un propósito. El objetivo de los nuevos sistemas es transitar a formas de integración de funciones y comunicaciones más complejas.

Desde el punto de vista de la emergencia de la jerarquía dentro de este sistema complejo, ¿cuáles son las implicaciones de la expansión del núcleo electrónico de funciones críticas que exigen procesar información en tiempo real?

Vías para enfrentar la complejidad y la vulnerabilidad de los sistemas E/E

Se podría pensar que los vehículos se están convirtiendo en computadoras sobre ruedas, pero esta afirmación resulta engañosa, pues existen diferencias cualitativas en la manera como una computadora personal y la computadora de un vehículo interactúan con los agentes y el medio ambiente. A diferencia de una computadora, algunos de los sistemas electrónicos de un vehículo interactúan en “tiempo real”, por una parte, con el ambiente inestable y complejo (cambio en temperatura, humedad, vibración, fricción, etc.) y, por otra, con el conductor. En ambas situaciones la seguridad de los ocupantes, del bien material (vehículo) y del medio ambiente pueden ponerse en situaciones críticas o peligrosas. Los radares láser, los sensores ultrasónicos y las cámaras asociados a los modernos sistemas de seguridad (pasiva y activa) producen grandes volúmenes de información que deben ser procesados, de manera rápida, robusta y confiable. En la medida en que los sistemas de seguridad de un vehículo deben interactuar con el usuario en tiempo real, la demanda de poder de cómputo es cada vez mayor. Estas exigencias no ocurren de la misma manera en el desempeño de una computadora.

Otra diferencia es que la computadora funciona con voltajes muy pequeños, mientras que un vehículo trabaja con alto voltaje y por ello no puede permitir el contacto-tierra de los cables, dada la amenaza mortal que representa para la vida y la seguridad de los ocupantes (Potdevin, 2009; Reiman y Mannel, 2008). Asimismo, una computadora personal tiene una capacidad de procesamiento de información concentrada en un espacio definido y restringido (módulo), en tanto que un vehículo no tiene una computadora, sino múltiples computadoras pequeñas distribuidas en todo el sistema, por lo que el sistema de cómputo de los nuevos vehículos es más parecido al que utiliza un avión que al de una computadora personal.

Esta situación plantea altísimas exigencias a los diseñadores y fabricantes sobre la calidad y robustez de los sistemas electrónicos, en particular sobre las formas de gobierno de fallos y de la vulnerabilidad del sistema. Se están sustituyendo partes mecánicas —que habían venido funcionando de manera segura y confiable— por componentes electrónicos que pueden ser muy vulnerables; esto genera incertidumbre en relación con su desempeño, pues este sistema resulta ser muy nuevo e inmaduro en comparación con los sistemas mecánicos. Sin embargo, la intensificación de la competencia ha provocado que las empresas introduzcan, en algunos casos, innovaciones todavía no maduras (Bauer, 2007).

Para enfrentar la vulnerabilidad de los sistemas electrónicos se tienen diferentes soluciones: 1) Redundancia física: utilizar dos o más componentes electrónicos paralelos que procesen las mismas señales; el sistema de manejo-por-cable (drive-by-wire), que trabaja en condiciones de “tiempo real”, contiene sensores, solenoides, microprocesadores, arneses y canales de comunicación redundantes que permiten enfrentar situaciones de fallo. 2) Redundancia analítica: incrementar la capacidad de procesamiento de información y autorregulación de los sistemas electrónicos; a partir del conocimiento más profundo del sistema se pueden crear modelos matemáticos que permitan diagnosticar y resolver los problemas, por ejemplo, incorporar ECU con software sofisticados, en particular algoritmos rápidos y robustos para detectar y regular fallos, falsas alarmas, inestabilidad o caos en el sistema; de esta manera un vehículo se parece cada vez menos a una computadora y cada vez más a un avión.

Para lidiar con la incertidumbre, la vía de la redundancia física y/o la redundancia analítica son soluciones que implican costos adicionales y el incremento de la complejidad de los vehículos. Cada sistema extra (software y/o hardware) que se agregue a un vehículo incrementa la probabilidad de que diferentes sistemas inte-

ractúen de manera caótica o que produzcan inestabilidad. En un vehículo de lujo el 25% de los defectos electrónicos están asociados al software de los ECU y 25% a la red (Huhn y Schaper, 2006).

Desde esta perspectiva, se puede entender por qué han crecido exponencialmente los llamados a reparaciones (*recalls*) por parte de las empresas del sector automotriz. Para el caso de los Estados Unidos, se efectuaron 50 llamados en 1960; para 2008 este número ascendió a aproximadamente a 800. En 2010, sólo en los Estados Unidos fueron retirados del mercado 20 millones de vehículos para su reparación (Bae y Benítez-Silva, 2011). Una de las causas de este crecimiento se asocia a la complejidad de los nuevos vehículos y a la construcción de reglas de seguridad estrictas por parte de diferentes agencias gubernamentales (Peters, 2005). Los errores y fallos en el software cuestan a la economía de los EEUU aproximadamente 59 mil millones de dólares al año (National Institute of Standards and Technology, 2002).

¿Cómo administrar la red de interacciones, interrelaciones y mecanismos de control de los sistemas electrónicos que trabajan de manera independiente, pero que deben organizarse en tiempo real para asegurar un objetivo común? Cuando se integran sistemas electrónicos y en consecuencia se reconfigura la arquitectura del automóvil es necesario conformar nuevas jerarquías y un lenguaje común. La necesidad de encontrar una arquitectura tecnológica óptima que reduzca las distintas formas de vulnerabilidad de los sistemas electrónicos exige una elevada capacidad económica, organizacional y tecnológica por parte de las empresas ensambladoras y proveedoras. Este trabajo permite identificar algunas de las posibilidades de responder a estas exigencias.

Conclusiones

En la reconstrucción de la trayectoria tecnológica de los automóviles, ¿qué función cumple la existencia de distintos ritmos de cambio tecnológico? Una característica de los sistemas complejos se relaciona con el hecho de que el ritmo del cambio tecnológico de sus componentes es heterogéneo. Un componente con una baja tasa de innovación puede, en un contexto de interdependencia, provocar formas de interacción ineficientes. Las diferencias en el ritmo de la tasa de innovación conducen a la emergencia de problemas críticos o desequilibrios tecnológicos, tanto en el nivel de componentes como en el nivel de sistema, lo cual puede obstaculizar la evolución del sistema tecnológico.

Las empresas están construyendo estrategias de solución que les permitan enfrentar la creciente complejidad, disminuir el número y la diversidad de desequilibrios tecnológicos, así como avanzar en los procesos de innovación. Todas estas fuerzas contradictorias han conducido a un ritmo acelerado de innovación del diseño y manufactura de los ECU, sensores, solenoides y arneses, así como a la administración del volumen de energía e información asociados a una red cada vez más extensa e interdependiente. La información disponible sobre la evolución del sector automotriz indica que estamos frente a un proceso volátil e inestable de transición tecnológica caracterizado por grados de incertidumbre sustanciales.

En la evolución de la red de componentes electrónicos, ¿cómo se explica la emergencia de niveles jerárquicos? Conforme madura la tecnología y crecen las presiones competitivas, los fabricantes van agregando ECU de manera independiente, masiva y desorganizada; los primeros sólo se limitan a una sola función. Este proceso genera una red de ECU desconectada, sin una estructura jerárquica que permita el gobierno del flujo de energía e información en el sistema. Distintos caminos en el cambio tecnológico y tasas de innovación heterogéneas modifican la composición y jerarquía del sistema tecnológico. Es necesario, por ende, coordinar las tendencias convergentes/divergentes de las diferentes trayectorias tecnológicas, así como los diferentes ritmos de evolución. No existe un orden espontáneo dentro de ningún sistema tecnológico complejo; este orden es más bien el resultado de factores de naturaleza estructural y estratégica.

La transición de los procesos de innovación de componentes electrónicos individuales a sistemas electrónicos plantea a los diseñadores de automóviles la construcción de una jerarquía robusta de ECU. No es posible transitar a funciones más complejas de integración de subsistemas electrónicos, eléctricos y mecánicos sin una coordinación y administración robusta. La red del flujo de información de un vehículo moderno es administrada por dispositivos cada vez más inteligentes que utilizan protocolos de comunicación —software— sofisticado. Estamos en una fase en la que se están estableciendo posibilidades complejas de conectar componentes y funciones. El futuro está abierto y las empresas están explorando formas novedosas de integración de su red de componentes E/E. Por ello, las empresas del sector automotriz están comprometidas en una carrera tecnológica intensa por desarrollar sistemas tecnológicos que permitan la comunicación jerárquica entre una población numerosa de ECU.

¿Cuáles son los atributos que permiten caracterizar a los automóviles como sistemas complejos adaptables? Se puede considerar la existencia de tres momentos en la evolución de la complejidad de los vehículos automotores: de 1900 a 1970 el vehículo automotor es un sistema complejo mecánico, constituido por un gran número de partes que interactúan entre sí siguiendo reglas fijas de comportamiento; un segundo momento de 1971 a mediados de 1990 cuando emerge la complejidad de dispositivos electrónicos individuales que no interactúan entre sí; finalmente, con la adopción de los sistemas “X-by-wire” a inicios del año 2000 se inicia la transición hacia la complejidad electrónica en el nivel de sistema: dispositivos que utilizan reglas de manera flexible y que les permiten representar el mundo, interactuar y adaptarse al ambiente en tiempo real de manera no-predecible, lineal o mecánica. Desde esta perspectiva se puede señalar que los automóviles se han transformado en sistemas complejos adaptables.

Referencias

- Abernathy, W. (1978). *The productivity dilemma: Roadblock to innovation in the automobile industry*. Baltimore: The John Hopkins University Press.
- Alliance Bernstein (2006). Ending oil’s stranglehold on transportation and the economy. Disponible en: http://www.bernstein.com/CmsObjectPC/pdfs/B39433_HybridsBlackbook.pdf
- Anwar, S. (2009). Drive by wire systems: Impact on vehicle safety and performance. En H. Guo. *Automotive informatics and communicative systems: Principles in vehicular networks and data exchange*. New York: Institute for Infocom Research-Singapore Hershey.
- Automobile.com (2012). Toyota and Nissan join forces to standardize automotive electronic software. Disponible en: <http://www.automobile.com/toyota-and-nissan-join-forces-to-standardize-automotive-electronic-software.html>
- Bae, Y. y H. Benítez-Silva (2011). Do vehicle recalls reduce the number of accidents? The case of the U.S. car market. Disponible en: <http://www.ms.cc.sunysb.edu/~hbenitezsilv/recall.pdf>

- Barkholz, D. (2010). Fixing cars' brains saves ford millions. Disponible en: <http://bx.businessweek.com/plm/view?url=http%3A%2F%2Fmoreover.com%2Fclick%2Fhere.pl%3Fr2807722434%26f%3D9791>
- Bauer, P. (2007). How electronics is changing the automotive industry: from component suppliers' to system partners. En B. Gottschalk y R. Kalmbach (eds.). *Mastering automotive challenges*. London/Philadelphia: Kogan Page: 270-289.
- Bernstein, M. (1988). A self-starter that gave us the self starter. *Smithsonian* 19 (4): 125.
- Bogden, D. (2004). Electronics controls for the 21st century powertrain. *Auto Electronics*. I October. Disponible en: http://autoelectronics.com/mag/electronic_controls_st/
- Bonnick, A. (2001). *Automotive computer controlled systems diagnostic tools and techniques*. Oxford: Butterworth-Heinemann Linacre House.
- Brauer, K. (2002). Why Drive-by-Wire?. Disponible en: <http://www.edmunds.com/news/innovations/articles/43033/article.html>
- California Energy Commission (1997). *Transportation technology status report*. California: Staff Report.
- Chew, E. (2004). Demands on electrical systems intensify. *Automotive News*. Disponible en: <http://www.highbeam.com/doc/1G1-112588776.html>
- Christ, Th. (2008). Braking energy regeneration in the electric onboard network. *ATZelektronik* 4: 4-9.
- Crouch, D. (2005). Battery technology for automotive applications. En A. Emadi (ed.). *Handbook of automotive power electronics and motor drives*. New York: Taylor & Francis Group: 677-688.
- Denton, T. (2004). *Automobile electrical and electronic systems*. New York: Routledge.

- Ebert, C. y C. Jones (2009). *Embedded Software: Facts, Figures, and Future*. IEEE Computer Society Press. Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1550393.1550433>
- Emadi, A. (ed.) (2005). *Handbook of automotive power electronics and motor drives*. New York: Taylor & Francis Group.
- Floercke, K. (2007). Siemens VDO to Offer Electronic Brakes by 2010. *Automotive News* 16: 43. Disponible en: http://goliath.ecnext.com/coms2/gi_0199-6451221/Siemens-VDO-to-offer-electronic.html
- Flores, J. y F. Novelo (2000). *Innovación industrial, desarrollo rural e integración internacional*. México: Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco.
- Freescale (2004). Electrohydraulic Braking Freescale Semiconductor, Inc. Disponible en: http://www.freescale.com/files/shared/doc/selector_guide/SG2007.pdf
- Fujimoto, T. (1999). *The evolution of a manufacturing system at Toyota*. Oxford: Oxford University Press.
- Giral-Castillón, R., L. Martínez-Salamero y J. Maixé-Altés (2005). Conventional cars. En A. Emadi (ed.). *Handbook of automotive power electronics and motor drives*. Florida: Taylor & Francis Group, 3-20.
- Gottschalk, B. y R. Kalmbach (eds.) (2007). *Mastering automotive challenges*. London/Philadelphia: Kogan Page.
- Guo, H. (2009). *Automotive informatics and communicative systems: Principles in vehicular networks and data Exchange*. New York: Institute for Infocom Research- Singapore Hershey.
- Hansen Report (2009). The Hansen Ron automotive electronics 22 (7), september. Disponible en: <http://www.hansenreport.com>
- Higgins, A. y S. Koucky (2002). Mercedes pumps “fly by wire” brakes in new SL roadster. *Machine Design* 74 (9): 26.

- Hofman, T. (2004). Honda to team up with Toyota and Nissan on electronics software standardization. Disponible en: <http://www.auto123.com/en/news/honda-to-team-up-with-toyota-and-nissan-on-electronics-software-standardization?artid=30167>.
- Holland, J. (1996). *Hidden order: How adaptations builds complexity*. New York: Perseus Books Group.
- Honda Motors (2012). Analog to digital: A three-year detour leads to the goal. Disponible en: <http://world.honda.com/history/challenge/1981navigationsystem/text/09.html>
- Huhn, W. and M. Schaper (2006) Getting better software into manufactured products: The problems of embedded software are rooted in the legacies of hardware development. Disponible en: http://www.mckinseyquarterly.com/Getting_better_software_into_manufactured_products_1746
- IHS Global Insight (2009). Resistance is futile – electronics are on the rise: Electronic control units and communication protocols. *IHS Global Insight, Inc* 26: 24.
- Ingraham, J. C. (1957). Automobiles: races; everybody manages to win something at the daytona beach contests. *The New York Times*.
- Jones, N. (2011). Advanced Electro-Mechanical Braking System Delphi's Brake-by-Wire concept. Disponible en: <http://www.tttech-automotive.com/fileadmin/content/pdf/TTTech-Delphi-Casestudy-Brake-by-Wire.pdf>
- Klauda, M. y U. Lauff (2008). Function and software development for ECU. *ATZelektronik* 4: 10-15.
- Klier, T. y J. Rubenstein (2008). *Who really made your car? Restructuring and geographic change in the auto industry*. Michigan: W.E. Upjohn Institute for Employment Research.
- Kromer, M. y J. Heywood (2007). Electric powertrains: Opportunities and challenges in the u.s. light-duty vehicle fleet. *LFEE* 2007-03 RP.

- Krüger, A., B. Hardung y T. Kolzow y (2008) Reuse of software in distributed embedded automotive systems. En N. Navet y F. Simonot-Lion (eds.). *Automotive embedded systems handbook*. New York: Taylor & Francis Group: 8:1-8:19.
- Lara, A. (2000). Complejidad y desequilibrio tecnológico: Notas sobre la historia de la convergencia del sector automotriz–sector electrónico. En J. Flores y F. Novelo. *Innovación industrial, desarrollo rural e integración internacional*. México: Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco: 213-237.
- Lee, E. A. (2002). Embedded Software. *Advances in Computers* 56: 55-95.
- Leen, G., D. Hefferman y A. Dunne (1999). Digital networks in the automotive vehicle. *IEE Computer and Control Eng. J.*, december: 257-266.
- y D. Hefferman (2002). Expanding automotive electronic systems. *Computer* january, 35: 88-93. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.187.9206&rep=rep1&type=pdf>
- Lipman, J. (2004). Silicon Fuels the Automotive Industry. Disponible en: <http://www.eetimes.com/design/automotive-design/4017879/Silicon-Fuels-the-Automotive-Industry>
- Lovati, S. (2009). An overview of automotive buses. Disponible en: <http://dev.emcelettronica.com/overview-automotive-buses>
- Mcintosh, J. (2012). Automotive glossary woman on wheels. Disponible en: <http://jilmcintosh.typepad.com/jil/automotive-glossary.html>
- Miller, J. (1996) Multiple Voltage Electrical Power Distribution Systems for Automotive Applications. *Proc. 31st Intersociety Energy Conversion Conf.* New Jersey: IEEE Press, 1930-1937. También disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel3%2F4058%2F11981%2F00553407.pdf%3Farnumber%3D553407&authDecision=-203>
- Mischo, S., R. Kornhaas, I. Krauter, U. Kersken y R. Schöttle (2008). E/E Architectures at the Crossroads. *ATZelektronik Worldwide* 3 (5): 10-13.

- Murray, Ch. J. (2009). Automakers aim to simplify electrical architectures. Disponible en: http://www.designnews.com/article/316784-Automakers_Aim_to_Simplify_Electrical_Architectures.php
- National Institute of Standards and Technology (2002). Software errors cost U.S. economy \$59.5 billion annually; National Institute of Standards and Technology published october 2002. Disponible en: <http://www.ashireporter.org/articles/articles.aspx?id=740>
- Navet, N. y F. Simonot-Lion (eds.) (2008). *Automotive embedded systems handbook*. New York: Taylor & Francis Group.
- Nishiguchi, T. (1994). *Strategic industrial sourcing: The japanese advantage*. Oxford: Oxford University Press.
- Oxer, J. y H. Blemings (2009). *Practical Arduino: Cool Projects for Open Source Hardware*. New York: Apress.
- Page, S. (2011). *Diversity and complexity*. New Jersey: Princeton University Press.
- Paret, D. (2007). *Multiplexed networks for embedded systems: CAN, LIN, Flexray, Safe-by-Wire*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Porter, M. (1983). *Cases in competitive strategy*. New York: The Free Press.
- Potdevin, H. (2009). Insulation Monitoring in High Voltage Systems for Hybrid and Electric Vehicles. *ATZelektronik Worldwide* 4 (6): 28-31.
- Powers, W. (2001). Environmental challenges, consumer opportunities. Disponible en: http://www.auto.com/travcity99/wpowers_aug5.htm.
- Reimann, W. y R. Männel (2008). Influence of vehicle electrical energy on fuel consumption. *ATZelektronik Worldwide* 3 (1): 4-9.
- Rendle, S. (1991). Fiat tipo owners workshop manual 1988 to 1991. Disponible en: <http://www.carsfromitaly.net/ fiat/index.html>

- Rosemberg, N. (1982) *Inside the black box: Technology and economics*. New York: Cambridge University Press.
- Rundle, R. (2002). The coming 42-volt electrical system electrical rebuilder's exchange. Disponible en: <http://www.docstoc.com/docs/42187675/The-Coming-42-Volt-Electrical-System>.
- Shimokawa, K. (2010) *Japan and the global automotive industry*. New York: Cambridge University Press.
- Sostawa, B. y H. Schöpp (2009). Most 50 adopted in Asia. *ATZ Elektronik Worldwide* 4 (4): 40-43.
- The Volvo Owners Club (2009). Volvo's three-point safety belt turns 50. Disponible en: http://www.volvoclub.org.uk/press/releases/2009/seat_belt_50.shtml
- Trevett, N. R. (2002). X-by-Wire, new technologies for 42V bus automobile of the future South Carolina. Disponible en: http://www.me.sc.edu/research/ARG/honors_thesis.pdf
- Truett, R. (2004). Electronics boom puts heavier workload on alternators. *AutomotiveNews* August 9: 36B.
- Viehmann, M. (2009). Power management classification - energy-related modular system of the future. *ATZ Elektronik Worldwide* 4 (4): 28-33.
- Wichmann, H. (2008). Lightweight construction criteria in wiring harnesses. *ATZ Elektronik Worldwide* 3 (4): 42-46.
- Womack, P., D. Jones y D. Roos (1990). *The machine that changed the world*. New York: Rawson Associates.

