

1. Introducción

En el contexto de la transformación digital de la industria automotriz, la presente memoria de actuación anual detalla el trabajo realizado por el doctorando Adrià Bosch Serra durante el periodo 2024-2025. Esta tesis, titulada: "Integración de arquitecturas IIoT e Inteligencia Artificial en la Industria Automotriz: diseño y validación de sistemas Flexibles, Sostenibles y Centrado en el Humano", se centra en investigar y desarrollar tecnologías que habiliten nuevos sistemas de producción en la planta de Ford Almussafes.

Esta tesis forma parte de los esfuerzos de Ford Almussafes por adaptar la planta a las nuevas tecnologías que habilitan nuevos métodos de validación más eficaces robustos y centrados en el humano. Específicamente esta tesis trata de centrarse en el apartado de validación del producto durante su fabricación.

Los métodos actuales de validación consisten en el testeo de la electrónica del vehículo una vez se ha finalizado el vehículo. Para realizar este testeo se utilizan dispositivos conectados al puerto OBD que utilizando el protocolo UDS comprueba la correcta configuración y funcionamiento de la electrónica del vehículo.

Sin embargo, este enfoque, además de detectar defectos una vez el vehículo está completamente ensamblado —lo que incrementa notablemente el coste y el tiempo de reparación—, no ofrece información sobre el estado del vehículo a lo largo de su proceso de fabricación. Sumado al elevado coste y a la limitada versatilidad de los equipos actuales, surge la necesidad de explorar soluciones que faciliten la monitorización continua y la adaptación ágil de la planta a nuevos requisitos.

Por ello, el objetivo de la presente tesis es investigar sobre tecnologías habilitadoras para nuevos métodos de validación con la filosofía de la industria 5.0, flexible, sostenible y humano centrista. Para ello se trabajan los campos del modelado y de la IIoT para una correcta y robusta automatización de los sistemas de planta.

Esta investigación se lleva a cabo en el departamento de lanzamiento de la planta de Ford Almussafes, alineándose con sus objetivos de explorar y aplicar conceptos y tecnologías innovadoras para las futuras generaciones de vehículos. El entorno de la planta proporciona una plataforma ideal para investigar las tendencias emergentes en la industria y justificar la aplicación práctica de dichas investigaciones en proyectos reales.

2. Trabajo realizado anualidad 2024-2025

Durante este periodo se ha profundizado en la investigación y la implementación del modelado del sistema eléctrico del vehículo, cuyos resultados se presentan a continuación. Asimismo, se ha avanzado en el diseño y la validación de concepto de un nuevo dispositivo de verificación, flexible y de bajo coste, denominado "Simbionte".

2.1. Modelado automático de vehículos

El modelado automático de la arquitectura eléctrica del vehículo persigue, en esencia, estandarizar la captura, el almacenamiento y la explotación de toda la información asociada al cableado y los componentes eléctricos, de modo que los sistemas digitales de

planta —desde automatismos de montaje hasta gemelos digitales— puedan acceder a un único “source of truth”.

Este modelado establece un estandar a la hora de ordenar e imputar la información eléctrica del vehículo en sistemas informáticos, facilitando así el desarrollo de aplicaciones digitales y automatismos futuros. Además, se pretende establecer un único punto “source of truth” para el desarrollo de herramientas digitales que requieran de la información del vehículo. De esta manera se permite reducir notablemente el tiempo y costes de desarrollo de proyectos internos de la planta.

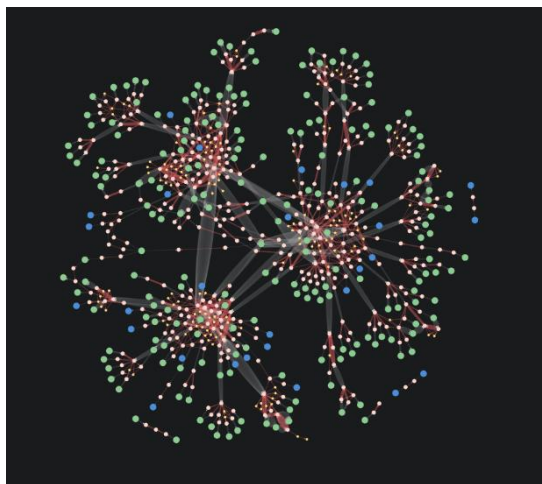
De esta manera se han avanzado tres paquetes de trabajo dentro de esta temática en el desarrollo de la tesis

2.1.1. Investigación del dominio físico

Durante esta anualidad se ha diseñado e implementado el modelado del cableado del vehículo mediante sistemas complejos. Se define un sistema complejo como un conjunto de elementos heterogéneos y dinámicos cuyas interacciones no lineales dan lugar a comportamientos emergentes y adaptativos que no pueden explicarse simplemente a partir de las propiedades de cada componente por separado.

Para conseguir este modelado se han obtenido y digitalizado los documentos de producción relacionados con el cableado del vehículo. Para ello se han utilizado grafos programados mediante python. Se define como un grafo a una estructura matemática $G = (V, E)$ formada por un conjunto de vértices V y un conjunto de aristas E que conectan pares de vértices para modelar relaciones entre objetos. Puede ser dirigido o no dirigido, y opcionalmente ponderado si a cada arista se le asigna un peso.

De esta manera se ha diseñado un grafo donde los nodos son los diferentes elementos del cableado como conectores, componentes o masas y las aristas son los cables y conexiones que unen los diversos elementos.

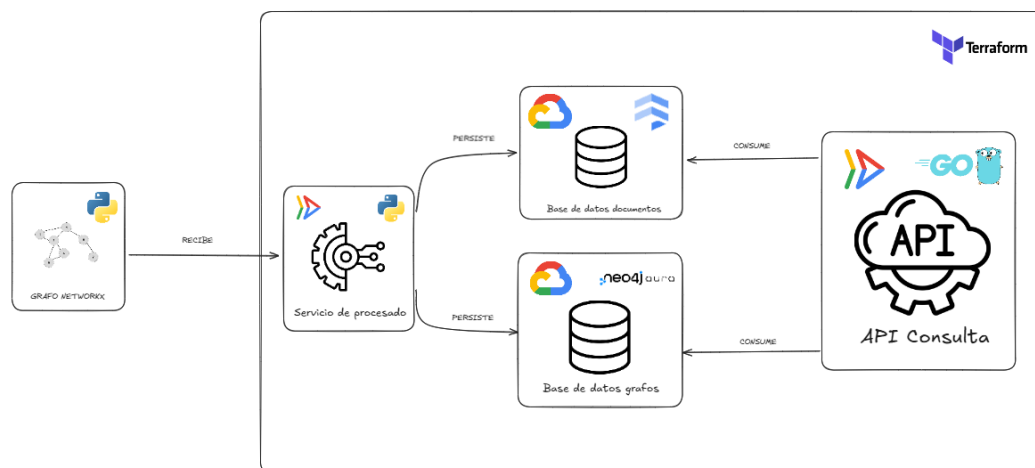


Esta arquitectura ha permitido modelar el cableado ordenando la información y estableciendo un estandar. De esta manera se ha habilitado la introducción de conceptos propios de la compañía como circuitos o minors. Por lo tanto, es posible obtener un

modelo detallado de cada uno de los vehículos fabricados en la planta, incluyendo sus múltiples opciones de personalización.

2.1.2. Base de datos de los componentes eléctricos del vehículo

Utilizando como base el modelado propuesto por el doctorando, se está dirigiendo el proyecto de desarrollo de una base de datos de fácil acceso con toda la información del vehículo. El objetivo de este proyecto es reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones digitales futuras además de proporcionar una “source of truth” fiable y actualizada.

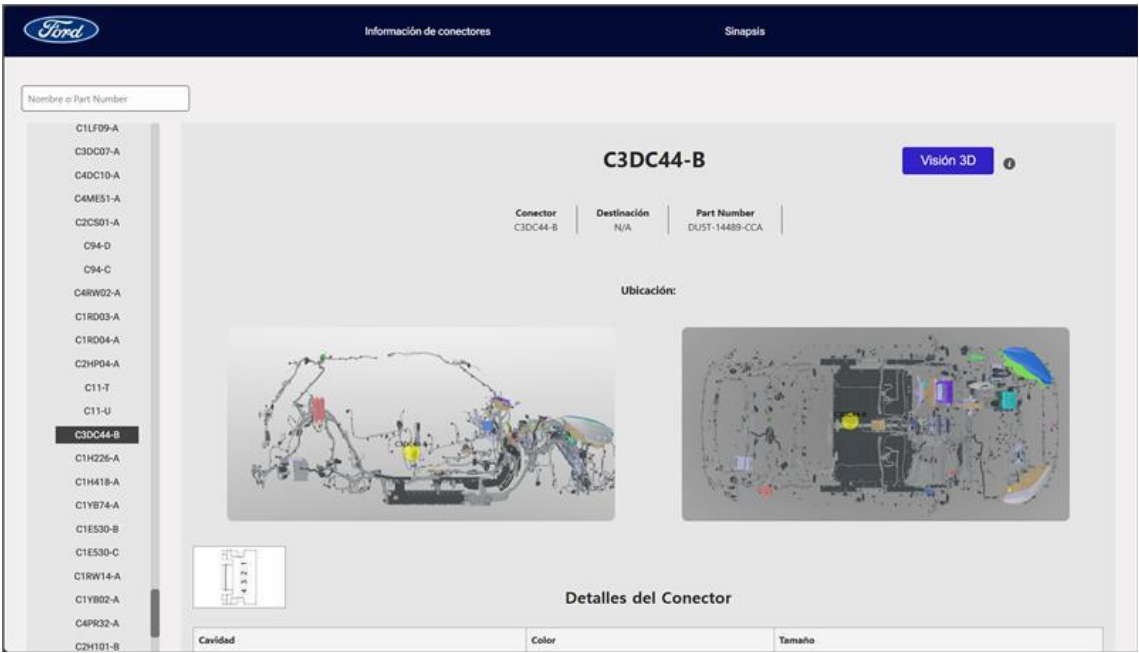


Para poder reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones digitales se establece una estructura de datos orientada a programación. De esta manera, se reduce notablemente el tiempo y recursos invertido por parte de los programadores en estructurar y obtener la información del vehículo. Se estima que estas tareas suponen el 50% del tiempo de desarrollo de aplicaciones software.

2.1.3. Visualización de conectores

La visualización adecuada de la inmensa cantidad de datos que maneja un vehículo moderno resulta esencial para garantizar la calidad y la eficiencia en la línea de montaje. Con más de 300 conectores distribuidos a lo largo de su arnés eléctrico —cada uno definido por tipo, número de pines, secciones de cable, posición y función—, es imprescindible contar con una herramienta capaz de sintetizar y presentar esta compleja información de forma clara y accesible para técnicos e ingenieros.

Partiendo del grafo de la arquitectura eléctrica, este proyecto extrae automáticamente todos los atributos relevantes de cada conector y los integra en una interfaz web interactiva. La plataforma permite identificar de un vistazo los puntos con mayor tasa de fallo, filtrar por tipo de conector o periodo temporal y consultar estadísticas de reparaciones.



2.1.4. Comprobación de desconexiones via OBD

La posibilidad de comprobar la continuidad de cualquier conector del vehículo directamente a través del puerto OBD representa un avance crucial para la validación “in-line” durante el montaje, ya que elimina por completo la necesidad de desmontar componentes para detectar fallos eléctricos. Para lograrlo, el sistema aprovecha el modelo de grafos de la arquitectura eléctrica: cada conector, cable y módulo de control aparece como un nodo o enlace en el grafo, con sus relaciones y rutas de señal perfectamente definidas.

Cuando se selecciona un conector concreto, un motor de razonamiento automatizado recorre el grafo y determina qué rutas eléctricas y qué unidades de control (ECU) deben interrogarse para verificar la conexión. A continuación, genera dinámicamente la secuencia de peticiones UDS (Unified Diagnostic Services) que se envían por el bus CAN al puerto OBD. Estas solicitudes incluyen, por ejemplo, lecturas de estado de línea, activación de salidas internas o comprobación de resistencias de bucle. Las respuestas recibidas se interpretan en tiempo real y se correlacionan con el grafo para confirmar si el conector está correctamente acoplado o, por el contrario, presenta una desconexión o mal contacto.

2.2. Dispositivo simbiote

En paralelo al modelado eléctrico, se ha diseñado un nuevo dispositivo que permita un sistema de validación verdaderamente flexible, basado en los principios de fog y edge computing. La clave consiste en trasladar la mayor parte de la carga de cómputo desde el hardware embarcado hasta la infraestructura informática de la planta. Hoy por hoy, la solución Ecats integra en un único equipo una tarjeta de comunicaciones CAN y un ordenador industrial que ejecuta las rutinas de diagnóstico, lo que lo convierte en un dispositivo voluminoso, pesado y de elevado coste.

El concepto que sustenta esta línea de investigación propone desacoplar la interfaz de captura de datos del módulo de análisis y validación. El nuevo prototipo, bautizado como “Simbiote”, concentra en un único bloque compacto las funciones de comunicación intra-vehicular (CAN, UDS) y de conectividad IoT, mientras que los algoritmos de

diagnóstico, las reglas de validación y los modelos de gemelo digital corren en los servidores de planta. Gracias a esta arquitectura, Simbionte reduce significativamente tamaño, peso y coste, y a la vez posibilita actualizaciones remotas, despliegue masivo y escalado inmediato a medida que evolucionan los requisitos de validación.

Esto resultará en un método de validación más flexible y económico puesto que los dispositivos físicos no requieran de grandes cualidades de computación, únicamente de comunicación. Delegando las tareas de cálculo y automatización a los sistemas de planta, los cuales son más simples e actualizar ante cambios en el proceso o producto.

El correcto desarrollo de esta línea de investigación pivota sobre dos pilares fundamentales. El primero consiste en garantizar la disponibilidad y la integridad de los datos eléctricos de cada vehículo en los sistemas informáticos de planta, de modo que los automatismos puedan adaptarse de forma transparente a las distintas versiones y configuraciones de modelo. Esto enlaza directamente con la estrategia de modelado automático previamente descrita, que provee el “source of truth” necesario para orquestar cualquier rutina de validación.

El segundo requisito aborda la capa de comunicaciones del dispositivo Simbionte. En el entorno de montaje de Ford Almussafes, la sobresaturación de las redes Wi-Fi plantea serios cuellos de botella para el tráfico masivo de mensajes IoT. Por ello, se ha emprendido un estudio exhaustivo de alternativas de red —tanto en la banda ISM (LoRaWAN, Sigfox) como en soluciones privadas de baja latencia (private LTE, NB-IoT, 5G campus)— para determinar cuál ofrece el mejor equilibrio entre cobertura, rendimiento y coste energético.

2.3. Trabajo académico

El componente académico de este proyecto ha girado en torno a dos ejes fundamentales: una rigurosa revisión bibliográfica y la difusión de los resultados obtenidos. Para la revisión se llevó a cabo un estudio exhaustivo en fuentes especializadas, abarcando tanto el modelado de arquitecturas eléctricas y sistemas ciberfísicos como las tecnologías de comunicación industrial.

En el ámbito del modelado, la revisión bibliográfica se centró en identificar estudios y casos de aplicación en la industria automotriz, constatando que, a pesar de la creciente complejidad de los vehículos modernos, las técnicas de análisis de sistemas complejos apenas se han explotado en este sector, lo que revela un amplio espacio de investigación. Para enriquecer este enfoque, también se exploraron trabajos de disciplinas afines — como robótica, gestión de redes energéticas e ingeniería de sistemas— con el objetivo de adaptar metodologías de modelado y simulación avanzadas al contexto automovilístico, con vistas a mejorar la eficiencia y la fiabilidad de los procesos de validación y diseño.

Por otra parte, en el ámbito de las redes de comunicación se ha llevado a cabo un estudio pormenorizado de tecnologías inalámbricas habitualmente empleadas en domótica — como ZigBee, Z-Wave, Bluetooth Low Energy, LoRaWAN y redes Wi-Fi de baja potencia—, identificando en todas ellas ventajas claras en cobertura, autonomía y facilidad de despliegue. Sin embargo, al trasladar estos resultados al entorno industrial de una línea de montaje automotriz se detecta una carencia crítica de referencias: no existen estudios sistemáticos que evalúen su comportamiento bajo condiciones reales de planta (ruido electromagnético, gran densidad de nodos, reflexiones metálicas, requisitos de latencia y calidad de servicio).

Este vacío bibliográfico motiva un programa de ensayo específico: primero, caracterizar cuantitativamente el rendimiento de cada tecnología (tasa de paquetes útiles, retardo extremo a extremo, consumo energético y resiliencia ante interferencias) en bancos de pruebas que replican las condiciones típicas de montaje. A continuación, comparar esos resultados con los requisitos de la aplicación “in-line” de diagnóstico vehicular para determinar cuál o cuáles de estas redes permiten garantizar la fiabilidad y escalabilidad que demanda el dispositivo Simbionte. De este modo, se cubre un hueco de conocimiento fundamental para la adopción de comunicaciones IoT en entornos industriales exigentes.

En lo referente a las publicaciones se han realizado dos publicaciones asociadas al trabajo realizado durante esta anualidad. Una primera publicación asociada al concepto y estructura del modelado del cableado del vehículo descrito en el segundo apartado. En estos momentos se encuentra en revisión en la revista Journal of Industrial Information Integration del cuartil Q1.

Por otra parte, ha sido aceptada una publicación asociada al congreso ICEE 2025. Esta publicación detalla la investigación realizada sobre los medibles a tener en consideración a la hora de desplegar y entregar modelos de gran complejidad (como el propuesto en esta tesis) a través de servicios en la nube. Esta publicación se presentará el 15 de junio en el congreso mencionado.

2.4. Otros proyectos

Durante la realización de los trabajos asociados a la tesis se ha asistido en diversos proyectos realizados en el departamento. Estos proyectos están relacionados con la tesis descrita, debido a que los diferentes avances realizados durante la investigación o los conocimientos adquiridos, son aplicables.

Entrando en detalle de los proyectos, se ha asistido en el diseño de un sistema HIL capaz de validar de manera avanzada los vehículos a fabricar en la planta previamente a ser construidos. Se ha dado soporte tanto en el diseño como aplicando el modelo implementado del vehículo para dotar de flexibilidad a estos sistemas ante diversas versiones de un mismo vehículo.

Por otra parte, se ha participado en la creación de una web de visualización de los sistemas de comunicación CAN enmarcada en el proyecto sinapsis. Para ello se ha utilizado el modelo desarrollado como fuente de datos para alimentar este proyecto.

3. Plan de trabajo anualidad 2025-2026

El trabajo a desarrollar durante la anualidad 2025-2026 pretende continuar por las dos líneas de investigación anteriormente descritas. Además, se proporcionará soporte a los proyectos del departamento donde las investigaciones desarrolladas puedan aportar un avance en los mismos.

3.1. Investigación en el modelado

En primer lugar se está desarrollando un modelo de redes de información las cuales se definen como cualquier red de intercambio de información entre elementos electrónicos. El objetivo es modelar, no solo la capa física del vehículo, sino todos los intercambios de información asociadas a las múltiples funcionalidades del vehículo.

Para ello se ha propuesto un sistema complejo -anteriormente definido- multicapa, que permita mediante múltiples abstracciones, captar y modelar toda la complejidad de las redes de información.

Con el objetivo de demostrar la aplicabilidad y utilidad de este modelo se han propuesto dos casos de uso. Un primer caso de uso en el que se pretende demostrar la aplicabilidad del modelo para aplicaciones de validación, utilizándolo para desarrollar los algoritmos y automatizaciones necesarias para una validación inteligente del vehículo en diferentes fases del producto.

Asociado a la explicación y primera justificación del modelo se pretende redactar un primer artículo donde se plasmen los resultados asociados a esta investigación. Se prevee aportar suficiente contribución para poder aplicar a revistas

El segundo caso de uso se relaciona con la rama de investigación del dispositivo simbiote y las IoT. El objetivo es demostrar la versatilidad del modelo en distintos tipos de redes se pretende diseñar en primera instancia la red de comunicación del nuevo sistema de validación. Este caso de uso demostraría no solo la versatilidad del modelo en diferentes entornos sino para diferentes tareas, validación y diseño de redes de información.

De igual manera que el anterior caso de uso, se prevee poder extraer suficiente información como para realizar una publicación asociada al trabajo realizado.

3.2. Dispositivo simbiote

Durante la anualidad 2024-2025 abordaremos dos líneas de trabajo clave para consolidar el prototipo Simbiote y validar su integración en la planta de montaje. En primer lugar, se diseñará y construirá un dispositivo de prueba de concepto que reúna en un formato compacto la tarjeta de comunicación CAN y el módulo IoT, soportando los protocolos UDS sobre CAN y la capa de transporte hacia los sistemas de planta. Este desarrollo incluirá la selección de microcontrolador y radios, el desarrollo del firmware de diagnóstico y un banco de ensayo que reproduzca las condiciones reales de la línea de montaje (interferencias electromagnéticas, variaciones de temperatura, vibraciones). Superadas las pruebas de laboratorio, el prototipo circulará por un vehículo piloto en Ford Almussafes, donde se evaluarán aspectos como la robustez en entornos ruidosos, los tiempos de ciclo de diagnóstico “in-line” y el coste unitario de producción, con el fin de ajustar la arquitectura y garantizar una solución industrialmente viable.

Paralelamente, se llevará a cabo un estudio comparativo de cuatro tecnologías inalámbricas en un entorno de montaje saturado: Bluetooth Low Energy, Zigbee, Thread y redes Wi-Fi convencionales. Apoyándonos en el modelo de grafo eléctrico, se seleccionarán puntos estratégicos de la línea para desplegar nodos sensores encargados de transmitir paquetes de diagnóstico y telemetría. Se recopilarán métricas fundamentales —tasa de entrega de paquetes, latencia en la confirmación de conexión, consumo energético y nivel de resiliencia ante pérdidas temporales de enlace— para determinar cuál de estas tecnologías ofrece el mejor compromiso entre fiabilidad, velocidad y eficiencia en planta.

Los resultados de este experimento servirán como base para una publicación científica que describirá la metodología de ensayo, el análisis de cada red en situación real y las recomendaciones para el despliegue de comunicaciones IoT en la industria del automóvil.

Con ello, no solo validaremos la estrategia de descoplamiento “edge-to-fog” propia de Simbionte, sino que aportaremos conocimiento pionero sobre el comportamiento de estas redes en entornos industriales exigentes.

Juan Bautista Cones



JUAN FRANCISCO BLANES NOGU

Adrià Bosch Serra