

## CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS EMBEBIDOS

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

### **PIDS: Sistema de información visual para pasajeros de Trenes Argentinos**

**Autor:**  
**Ing. Carlos German Carreño Romano**

Director:  
Dr. Ing. Pablo Martín Gomez (UBA)

Jurados:  
Nombre del jurado 1 (pertenencia)  
Nombre del jurado 2 (pertenencia)  
Nombre del jurado 3 (pertenencia)

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires,  
entre Marzo de 2020 y Diciembre de 2022.*



## *Resumen*

En las formaciones ferroviarias modernas existen distintos sistemas de control que se interconectan a través de una red de comunicaciones (TCN). En particular, las formaciones de Trenes Argentinos cuentan con la TCN que sigue el estándar .... En Algunos ejemplos son el sistema de frenos, el control de puertas, el aire acondicionado y el sistema de información visual al pasajero (PIDS). El PIDS es el responsable de transmitir mensajes como el destino o la próxima estación a través de carteles de matriz led usando su propia red. El propósito de este trabajo es desarrollar firmware y hardware necesarios para controlar los carteles de matriz LED de salón (IDU) de las formaciones ferroviarias de Trenes Argentinos. El principal valor que aporta es generar herramientas de mantenimiento para extender la vida útil de los trenes. Si bien existen carteles led comerciales de propósito general, en los trenes hace falta conectarlos a la red, interpretar datos y protocolos del PIDS, presentar mensajes en función de los datos y considerar restricciones eléctricas. En el diseño e implementación del sistema embebido de este trabajo se aplicaron patrones de software concurrente (máquinas de estado y objeto activo) usando un sistema operativo de tiempo real (RTOS) sobre una plataforma EDU-CIAA. También se desarrollaron piezas de hardware para adaptar el sistema a la red y se realizaron capturas de tramas de datos en formaciones ferroviarias operando en vivo.



## *Agradecimientos*

En primer lugar quiero agradecer al Dr. Ing. Pablo Gomez por su inagotable paciencia y excelente predisposición a lo largo de todo el tiempo que llevó concluir este trabajo. También quiero agradecer al Dr. Ing. Ariel Lutenberg por su empuje, su espíritu motivador y su actitud de concertación. Me gustaría destacar su liderazgo en la generación de propuestas concretas de vinculación entre la universidad y la industria a través de proyectos. También agradecer a ellos dos y a todo el plantel de profesores que han volcado a lo largo de los años un enorme y minucioso trabajo en el desarrollo de los contenidos del programa de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos. Ha sido altamente satisfactorio completar el posgrado.

Quiero agradecer al personal altamente calificado de la Gerencia de Material Rodante Eléctrico de la compañía Trenes Argentinos Operaciones (SOFSE), el Ing. Sergio Dieleke, y a todos los colaboradores que nos han brindado atención, seguridad y tiempo para realizar mediciones en las formaciones ferroviarias. En especial también quiero agradecer a Bruno Pilato por su colaboración desde los talleres de Castelar para realizar pruebas en conjunto durante la pandemia.

Por último también agradezco a Magui, que me brindó soporte en todo momento; a mi madre y padre por enseñarme a valorar tanto la formación académica como la experiencia técnica con igual importancia; y a mis tutores y colegas de la empresa con quienes comparto el día a día e intercambio ideas sumamente útiles para pensar fuera de la caja.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción general . . . . .	3
1.2. Objetivos y alcance . . . . .	4
1.3. Estado del arte . . . . .	7
<b>2. Introducción específica</b>	<b>13</b>
2.1. Trenes: Red de comunicación TCN . . . . .	13
2.2. PIDS: Sistema de información visual para pasajeros de trenes . . . . .	14
2.3. Carteles y controladoras de matrices LED . . . . .	15
<b>3. Diseño e implementación</b>	<b>19</b>
3.1. Requerimientos . . . . .	19
3.2. Casos de Uso . . . . .	22
3.3. Arquitectura . . . . .	23
3.3.1. Contexto . . . . .	24
3.3.2. Diseño . . . . .	25
3.3.3. Implementación . . . . .	26
3.4. Patrones . . . . .	28
3.5. Firmware . . . . .	29
3.6. Hardware . . . . .	30
<b>4. Ensayos y resultados</b>	<b>35</b>
4.1. Mediciones . . . . .	35
4.2. Análisis de tramas . . . . .	36
4.3. Pruebas en maqueta . . . . .	37
4.4. Integración con red PIDS . . . . .	38
4.5. Pruebas de campo . . . . .	39
<b>5. Conclusiones</b>	<b>41</b>
5.1. Resultados obtenidos . . . . .	42
5.2. Prospectivas . . . . .	43
5.3. Bibliografía . . . . .	44
<b>Bibliografía</b>	<b>45</b>



# Índice de figuras

1.1.	Foto de una formación operativa de Trenes Argentinos. Se observa el cartel de matriz led frontal que indica el destino Tigre. . . . .	4
1.2.	Diagrama de bloques del sistema embebido propuesto basado en la plataforma EDU-CIAA. . . . .	5
1.3.	Solución de carteles para sistemas PIDS de Hitachi. Consultado en [1] . . . . .	7
1.4.	Solución de displays LCD para sistemas PIDS de Toshiba. Consultado en [2] . . . . .	8
1.5.	Sistema PIDS del proveedor austriaco Trapeze. Consultado en [3] . .	8
2.1.	Diagrama del tren y de los buses WTB/MVB de la red TCN. . . . .	13
2.2.	Diagrama de la red TCN de Trenes Argentinos. Cortesía SOFSE, plano modificado por parte del autor. . . . .	14
2.3.	Fotografía del rack de salón de una formación de Trenes Argentinos.	15
2.4.	Diagrama de bloques del sistema PIDS, elaborado en base al plano de referencia de SOFSE. . . . .	16
2.5.	Fotografía de las unidades de rack del sistema PIDS en el rack de salón. . . . .	16
2.6.	Fotografía del detalle de cableado de la unidad de rack del PIDS que corresponde a los carteles LED de salón. . . . .	17
2.7.	Fotografía de un cartel de salón inicializándose bajo una prueba de operación. . . . .	17
2.8.	Fotografía del detalle de conexión de la placa de control de los carteles led de salón. . . . .	18
3.1.	Diagrama del sistema Tren-TCN-PIDS. . . . .	24
3.2.	Diagrama de interconexión TCN-PIDS . . . . .	24
3.3.	Diagrama del módulo SCU en la red PIDS. . . . .	24
3.4.	Diagrama de bloques del sistema SCU, placa de control y carteles LED de salón. . . . .	25
3.5.	Diagrama de bloques del controlador propuesto. . . . .	25
3.6.	Vista de interacciones del sistema propuesto. . . . .	25
3.7.	Vista de interacciones extendida del sistema propuesto. . . . .	26
3.8.	Diagrama del objeto activo de la máquina de estados asociada. . . .	28
3.9.	Estructura del código en C. . . . .	31
3.10.	Diagrama del objeto activo PIDS y detalle de la máquina de estados asociada. . . . .	32
3.11.	Diagrama de detalle de la implementación en RTOS del objeto activo UART. . . . .	32
3.12.	. . . . .	33
3.13.	Círcuito esquemático de la placa driver de los carteles de matriz LED. . . . .	33

3.14. Circuito esquemático de la placa de control de los carteles LED de salón. . . . .	34
3.15. Lógica de procesamiento de datos para visualizar en el display. . . .	34

# Índice de tablas

1.1.	Principales aspectos y servicios asociados que debe ofrecer un sistema PIDS. Elaboración del autor. . . . .	9
1.2.	Principales características de displays para sistemas PIDS. Elaboración del autor. . . . .	10
1.3.	Principales características de controladores de uso general para aplicaciones PIDS. Elaboración del autor. . . . .	10
3.1.	Tabla de requerimientos funcionales, de integración y de documentación del proyecto. . . . .	21
3.2.	Tabla de casos de uso. . . . .	22
3.3.	. . . . .	23



*Dedicado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de  
Buenos Aires y a la empresa Trenes Argentinos  
Operaciones*



# Capítulo 1

## Introducción

Los sistemas de información visual para pasajeros están presentes en diversas industrias y aplicaciones. Se encargan de proveer información a pasajeros en movimiento y tienen un rol fundamental en la industria del transporte.

Las personas se trasladan por tierra o aire usando automóviles, ómnibus, subtes, trenes o aviones, entre otros. Los sistemas de información visual presentan necesidades y soluciones distintas en cada caso. En una autopista se comunican accidentes u obras viales en ejecución usando carteles gigantes con información en tiempo real. Los pasajeros aéreos visualizan la información de arribo, estado o despegue de vuelos en un aeropuerto. A los pasajeros de ómnibus les interesa conocer los tiempos de espera y las líneas en operación al llegar a una estación. Los pasajeros de trenes usan estos sistemas para conocer el destino o la próxima estación cuando están viajando. En algunos casos los carteles están a la intemperie y en otros dentro de un recinto, pero en general requieren estar sincronizados con los vehículos en movimiento.

Los sistemas de información visual para pasajeros (PIDS) tienen principalmente tres componentes: un sistema que genera datos, una red de transmisión y un sistema de pantallas. Dependiendo del dominio de aplicación, las especificaciones de cada sistema tienen distintos requerimientos. Típicamente en los trenes se requiere comunicación en tiempo real, lo que conlleva la adopción de protocolos de datos de tiempo real (RTP). En aplicaciones ferroviarias también es importante la integridad, disponibilidad y confiabilidad de los datos. Pero también existen otros requerimientos de carácter operativo, como el mantenimiento y la facilidad de instalación. Estos últimos aspectos son esenciales en la operación de una formación ferroviaria y tienen impacto directo en el ciclo de vida de un tren.

Los sistemas PIDS instalados en los trenes se interconectan con una red de comunicaciones (TCN). Esta red TCN sigue un estándar y define tanto interfaces eléctricas como protocolos. A la red TCN se conectan dispositivos para el sensado y control de frenos, de puertas, de monitoreo, entre otros, usando una arquitectura jerárquica de buses de datos. La red TCN representa un estándar robusto, maduro, probado y con gran adopción internacional. Sin embargo los sistemas PIDS se presentan sin la necesidad de ser compatibles con los estándares de TCN, al menos hasta la revisión del año 2005. Existen diversas soluciones comerciales de

sistemas PIDS, para aplicaciones de entretenimiento por ejemplo, pero se requiere de un trabajo de integración adicional para que funcionen en un tren.

En este trabajo se introduce una breve descripción de las redes TCN y su evolución en el tiempo. Para el caso de las formaciones de Trenes Argentinos, que forman el marco de este trabajo, se presenta también el detalle de interconexión TCN-PIDS, el desarrollo de un sistema de control para los carteles led del sistema PIDS y los resultados de las pruebas de campo realizadas en conjunto con la empresa Trenes Argentinos Operaciones (SOFSE). Se ha organizado esta memoria buscando acercar al lector primero los conceptos principales de la aplicación y luego el detalle técnico del diseño del sistema embebido propuesto.

En el capítulo 1 se introduce al lector a la motivación original del trabajo realizado. Se explica el marco de investigación del que forma parte este proyecto y se presenta el estado del arte en controles de carteles led.

En el capítulo 2 se introduce vocabulario técnico específico. Se presenta una descripción del sistema con el foco en la red de comunicaciones TCN, el sistema PIDS, sus interacciones y componentes.

En el capítulo 3 se abordan cuestiones de diseño de sistema. Se especifican los requerimientos y casos de uso que se plantean en el espacio problema y también las consideraciones del espacio solución. Se detalla la solución en términos de arquitectura, patrones de software, descripción de componentes e implementación. Se incluye también los planos de los circuitos eléctricos del hardware existente que fueron relevados al realizar este trabajo.

En el capítulo 4 se abordan cuestiones relacionadas al entorno real del sistema: visitas técnicas, mediciones realizadas, hardware ad-hoc realizado para las mediciones y un breve análisis de las tramas de datos de la red PIDS existente.

En el capítulo 5 se tratan las conclusiones principales del desarrollo, su potencial fabricación en serie y los pasos a seguir para integrar al resto de ramales ferroviarios. En el apéndice de bibliografía se encontrarán las principales referencias técnicas, científicas e institucionales relevantes para este trabajo.

## 1.1. Introducción general

En este trabajo se desarrolla el sistema de control para carteles de matriz led del sistema de información visual para pasajeros de trenes argentinos. Las formaciones de trenes argentinos cuentan con carteles de matriz led en sus coches, en el frente y en el contrafrente del tren. Todos los carteles se interconectan a una red de comunicación del sistema PIDS por la que viajan distintos tipos de datos: por ejemplo datos de mapas led, mensajes de audio, información visual para los carteles, o bien video de cámaras de seguridad. En los buses de datos de la red TCN además se comunican datos de sensores de velocidad, de frenado, eventos que indican apertura o cierre de puertas, por citar algunos ejemplos.

Los carteles led del sistema PIDS presentan fallas a lo largo de su ciclo de vida. Esto implica tareas de mantenimiento, reparación o reposición. Si bien existen muchos tipos de carteles led disponibles comercialmente, la integración al sistema de comunicaciones del tren es propietaria del fabricante de trenes. Para el caso de trenes argentinos el proveedor está radicado en China, haciendo muy costoso y lento el proceso de reposición o mantenimiento de equipamiento. Por esta razón, el desarrollo local de tecnología para sistemas PIDS es estratégico porque además de desarrollar la industria local extiende la vida útil de los trenes.

El eje de este trabajo es el desarrollo de un sistema a medida para Trenes Argentinos. La necesidad que prima es generar y brindar al personal de operaciones información necesaria para construir y mantener los sistemas PIDS. Como consecuencia, este trabajo también tiene impacto directo en el pasajero, ya que contribuye a una mejora en la calidad del servicio.

## 1.2. Objetivos y alcance

El marco de este trabajo es un Proyecto de Desarrollo Estratégico (PDE) de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad de Buenos Aires (UBACyT). El PDE se titula PDE\_15\_2020 - "Sistema de monitoreo y gestión de la red TCN en formaciones ferroviarias". Las partes que se involucran y forman parte del equipo de trabajo en este proyecto son el Grupo de Investigación en Calidad y Seguridad de las Aplicaciones Ferroviarias (GICSAFE), creado en 2017 en el marco del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) de la República Argentina, y la Operadora Ferroviaria Sociedad del Estado (SOFSE), también conocida como Trenes Argentinos Operaciones. El proyecto está orientado a cubrir necesidades tecnológicas concretas del sistema ferroviario argentino. Este tipo de proyectos son instrumentos de promoción científico-tecnológica que revalorizan e incrementan el aporte de la Universidad al desarrollo socioproductivo.

El objetivo principal de este trabajo es diseñar e implementar un sistema de información visual para pasajeros a bordo del tren. El sistema de información visual para pasajeros existente tiene una parte manual y una automática. Cuando el conductor del tren toma cabina para brindar servicio, programa en una pantalla cuáles van a ser las estaciones cabecera. Los nombres de estas estaciones cabecera se visualizan en las marquesinas del frente y contrafrente del tren, como puede verse en la figura 1.1.



FIGURA 1.1. Foto de una formación operativa de Trenes Argentinos. Se observa el cartel de matriz led frontal que indica el destino Tigre.

En el interior de los coches también hay carteles led. En estas marquesinas se presentan mensajes a los pasajeros como el nombre de la próxima estación, o la estación arribada ("próxima estación Belgrano", "estás en estación Belgrano",

por ejemplo). Ésta información se presenta automáticamente en base a variables de sistema que monitorean el detenimiento del tren, su velocidad y la apertura o cierre de puertas. Esta y otra información de monitoreo y control viaja por una red de comunicación interna del tren que se denomina TCN (Train Communication Network) de acuerdo al estándar que la define [4]. Este estándar define para la red TCN dos buses jerárquicos donde se conectan los subsistemas electrónicos: el WTB (Wire Train Bus) y el MVB (Multi-Vehicle Bus) [CSN EN 61375-2-1][IEC 61375-3-1:2012]. El primero es el bus de mayor jerarquía que se conecta entre vagones y que se usa para monitorear cambios topográficos del tren. En el segundo se conectan los sensores y actuadores de cada coche como son los frenos, los controles de puertas, los monitores de velocidad, el sistema de información, etcétera. Los dos buses establecen el uso de interfaces eléctricas usando redes RS485.

El sistema propuesto en este trabajo pretende leer los mensajes de información al pasajero que viajan por la red existente y presentarlos en un display LED. El sistema se compone principalmente de cuatro partes:

- display LED
- placa de control
- cableado de interconexión
- firmware del sistema embebido

El diagrama del prototipo se presenta en la figura 1.2. El display LED matricial representa los carteles de los coches del tren. La placa de control se debe poder conectar a la entrada con al bus de la red RS485 que corresponda y a la salida con un display LED matricial.

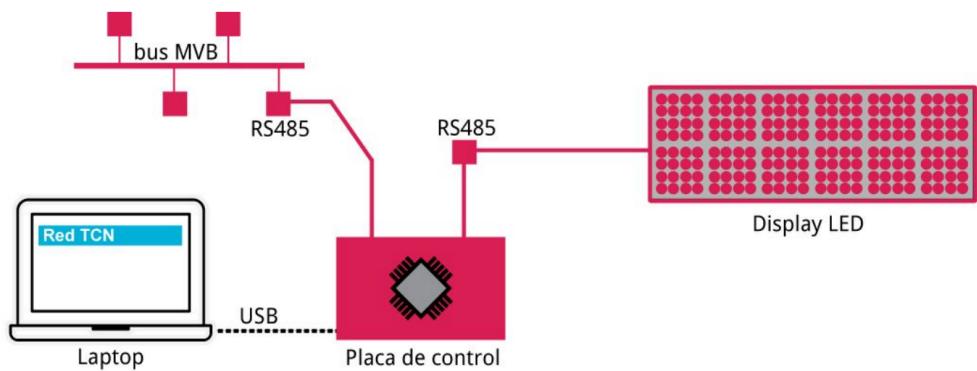


FIGURA 1.2. Diagrama de bloques del sistema embebido propuesto basado en la plataforma EDU-CIAA.

La placa de control está basada en la plataforma EDU-CIAA [5] o en alguna de las plataformas desarrolladas por el CONICET-GICSAFE. La conexión entre el display y la placa así como de la placa con la red TCN deberá ser compatible con el estándar RS-485, definido como capa física de la red TCN. El firmware a desarrollar se carga a la placa de control usando el puerto USB de una laptop. Este firmware es el responsable de leer los mensajes del sistema de información al pasajero y presentarlos en el display.

Las cualidades que debe satisfacer este proyecto son:

- compatibilidad: debe cumplir con los estándares asociados a la red TCN;
- practicidad: debe ser de fácil uso para el personal de Trenes Argentinos Operaciones

Este proyecto permitirá implementar las funciones de visualización del sistema de información al pasajero sin depender del equipamiento existente. El sistema existente es un equipamiento integrado y propietario, y este proyecto busca desacoplar algunas de sus funciones, las que corresponden a la visualización de información para pasajeros, y presentarlas en un display LED genérico. Por otro lado, permitirá reponer los carteles que en la actualidad quedan fuera de servicio por fallas o pérdida del material original y no pueden ser reparados. De esta manera, el valor principal que aporta este proyecto es contribuir con la sustitución de repuestos faltantes por medio de desarrollo y reducir la dependencia tecnológica de la empresa con los fabricantes. Este proyecto tiene impacto directo en las formaciones ferroviarias existentes que brindan servicio al pasajero todos los días.

### 1.3. Estado del arte

En esta breve sección se resumen algunas características y aspectos comunes de los sistemas PIDS, tanto para sistemas ferroviarios como para sistemas de transporte integrados. Lejos de ser un estudio sistemático, se pretende orientar al lector en las consideraciones que fueron tenidas en cuenta en este trabajo. Primero se describe el rol que juegan estos sistemas y una noción de su mercado, mencionando aquellos proveedores que se consideraron relevantes por claridad en la información, marca global y diseño conceptual de la solución. Luego se describen algunas soluciones comerciales interesantes y finalmente se presenta usando tablas algunos aspectos técnicos comunes en distintas soluciones. Adicionalmente se mencionan algunos trabajos académicos relevados. Se han elegido como dimensiones de análisis las funcionalidades y servicios que debe ofrecer un sistema PIDS, las características principales de la oferta de carteles electrónicos, y por último las características técnicas de las unidades de control.

El cliente de mayor impacto de los servicios que provee un sistema PIDS es la red de transporte (trenes, subtes, metros, ómnibus) de una gran ciudad, debido a su masividad. Lo que se observa en general es que las empresas que proveen sistemas PIDS a las redes metropolitanas de transporte de las grandes ciudades lo hacen bajo formatos distintos. Algunas instalan televisores o pantallas de video, otras carteles led, otras incluyen carteles impresos con algún elemento indicador tipo led, o bien leds en forma de flecha mezclándose con la señalización para indicar nombres de estaciones, pantallas led para desplegar publicidad entre mensajes, etcétera. En algunos países se han realizado esfuerzos durante la última década para que los sistemas PIDS faciliten el acceso a la información del transporte para personas con discapacidades, movilidad reducida y de edades avanzadas. Actualmente los sistemas PIDS se diseñan teniendo en cuenta al pasajero en el centro de todo, buscando ofrecer servicios de información que mejoren la experiencia de viaje.

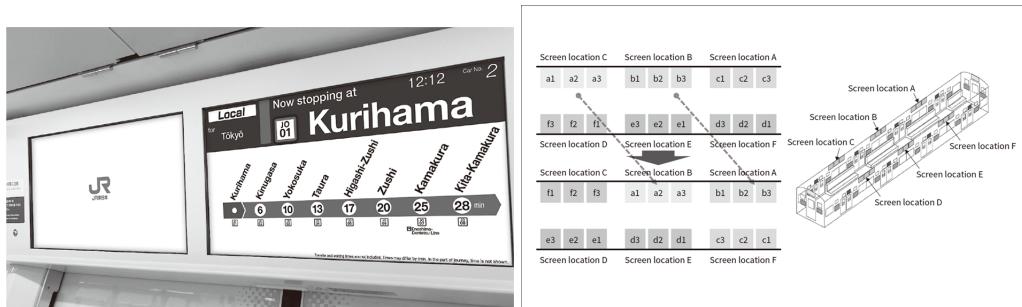


FIGURA 1.3. Solución de carteles para sistemas PIDS de Hitachi.  
Consultado en [1]

Hitachi ofrece una solución para publicidad de tres pantallas en array que se sincronizan para formar una sola y transmitir video con conectividad WiMAX. Cada uno de estos arreglos los posicionan arriba de las ventanas en ambos lados de los coches, alcanzando el despliegue de hasta dieciocho pantallas sincronizadas por coche, como se puede ver en la figura 1.3. Con esto logran transmitir varios mensajes distintos en simultáneo a los pasajeros sin que tengan que moverse de su

asiento.

Toshiba ofrece una solución que permite transmitir publicidad e información al pasajero en una misma pantalla LCD en simultáneo. La solución está centrada en la pantalla como dispositivo central, ofreciendo pantallas de 32z 42", de 1920 x 540 píxeles, full color de hasta 16.7 millones de colores, con amplio ángulo de visión y de gran luminancia[2]. En la mayoría de los casos las soluciones ofrecidas buscan cubrir tanto la demanda de un sistema PIDS como la oferta de publicidad de cara al pasajero, como es habitual en las estaciones y formaciones ferroviarias.



FIGURA 1.4. Solución de displays LCD para sistemas PIDS de Toshiba. Consultado en [2]

El grupo austriaco Trapeze [3] distingue cuatro tecnologías principales en sistemas PIDS: Led, LCD, canales móviles o apps, y e-ink que es una tecnología de LCD monocromo relativamente nueva. De los factores a tener en cuenta en la selección de carteles se distinguen los ángulos de visión, las condiciones del ambiente donde van instalados, por ejemplo si están a la intemperie o requieren visibilidad con la luz del sol, el tamaño o resolución de los caracteres en pantalla, la selección de colores y su relación con la capacidad estadística de visión de los pasajeros, el housing mecánico, el acceso a controles para personas con movilidad reducida, la alimentación eléctrica y la capacidad de realizar upgrades de sistema de forma remota.



FIGURA 1.5. Sistema PIDS del proveedor austriaco Trapeze. Consultado en [3]

Además se sugiere la importancia de la precisión en la información que ofrece como servicio el sistema PIDS. Si un pasajero recibe el número de andén incorrecto al llegar a la estación muy probablemente perderá el tren, resultando en una mala experiencia de viaje. La interconexión con otros canales de información sobre todo en puntos nodales de transporte también es favorita. Si un pasajero puede anticiparse y ver el tiempo estimado entre una línea de omnibus o de tren antes de llegar a la estación donde hace combinación, entonces puede tomar una mejor elección basada en datos ofrecidos por el sistema PIDS. Estos y otros aspectos de

<b>Conectividad</b>	RS485 Ethernet, Fibra Óptica WiFi, WiMax, GPS 2G / 3G / 4G / 5G
<b>Interconexión</b>	App del Tren Información multinodal Ómnibus Tablas de horarios programados Portales de noticias Publicidad Canal de información estatal
<b>Accesibilidad</b>	Información por audio Ángulos de visión de las pantallas Facilidades para personas en sillas de ruedas Facilidades para personas de edad avanzada Correcto y cuidado sistema de señalización
<b>Información</b>	Estimación de tiempos precisa Aviso de cortes en tiempo real Buen trackeo de vehículos Conexiones Mensajes de alerta o precauciones Números de emergencia
<b>Mantenibilidad</b>	Fácil instalación Costo de reposición Consumo eléctrico Upgrades

TABLA 1.1. Principales aspectos y servicios asociados que debe ofrecer un sistema PIDS. Elaboración del autor.

sistema centrados en el usuario se resumen en la tabla 1.1.

Según el punto de vista centrado en los carteles se suele tener en cuenta las dimensiones del cartel, la densidad de píxeles por unidad de área, la cantidad de colores o leds por píxel, los niveles de intensidad lumínica, el brillo y contraste, la potencia eléctrica como especificaciones típicas de los carteles de los sistemas PIDS. El ángulo de visión es una de las variables más consideradas ya que en sistemas PIDS implican el alcance a mayor cantidad de pasajeros de la información en pantalla. En la tabla 1.2 se presenta un resumen de estas características. Las fuentes consultadas para la elaboración de esta tabla son diversos portales internacionales de distribución de componentes electrónicos.

Todo cartel requiere de un controlador como interfaz que procesa información y la codifica según la lógica que requiera el tipo de cartel. Los controladores de los carteles de matriz led suelen basarse en circuitos digitales, en microcontroladores de 8, 16 o 32 bits o en FPGA. Las tasas de transmisión de datos requieren señales de clock que pueden variar desde algunos KHz hasta cientos de MHz. Los tamaños del buffer de memoria están en función de la cantidad de píxeles que

Display	LED matricial	LED RGB	TFT LCD	LCD RGB
<b>Colores</b>	monocromo bicolor tricolor multicolor (<10 colores)	desde 256 hasta 16,7M (típicamente)	hasta 16.7M	16.7M (típicamente)  1,000M
<b>Ángulo de visión</b>	110°	160°	120°-140°	178°
<b>Intensidad</b>	450 cd/m2	1500-2000 cd/m2	350 cd/m2	900 cd/m2
<b>Densidad de píxeles</b>	3,9 K 27,7 K 110 K *	P16: 3,9 K P12: 6,9 K P10: 10 K P8: 15,6 K P6: 27,7 K P5: 40 K P4: 62,5 K P3: 111 K P2.5: 160 K P2: 250 K *	29 M/m2 (pixel size 179um x 192um)	4,26 M/m2 (pixel size 484 um x 484 um)  29 M/m2 (pixel size 179um x 192um)
<b>Potencia (consumo promedio)</b>	<10 W	15 W a 250W~316W	20 W	25W

TABLA 1.2. Principales características de displays para sistemas PIDS. Elaboración del autor.

tenga la pantalla. Las interfaces físicas pueden ser periféricos de un microcontrolador, un pin de propósito general o bien puertos USB o HDMI. Los carteles LCD en muchos casos requieren de la transmisión de señales de video. Esto implica mayores costos de implementación que la alternativa LED pero también mayor versatilidad en la programación de contenidos. En la tabla 1.3 se resumen algunas características principales de los requerimientos de los controladores.

Unidad de procesamiento	MCU 8/16/32 bits	FPGA / ADIC / DSP	CPU / DSP
<b>Clock</b>	1-200 MHz	10-250 MHz	1-3 GHz
<b>Memory buffer</b>	1 KB	1-512 MB	1-10 GB
<b>Conectividad</b>	UART (1-4) USB (1-2) RS485 GPIO (1-20) Ethernet	Pmod I/O pins (20-800) Ethernet USB	USB VGA HDMI DVI display Port PCI / PCI-E Ethernet
<b>Programación</b>	C / C++ / Assembly	VHDL, Verilog, XML	C, C++, Java, Python, XML

TABLA 1.3. Principales características de controladores de uso general para aplicaciones PIDS. Elaboración del autor.

Una vez instalados, los sistemas PIDS suelen requerir mantenimiento. Muchas veces hay fallas de hardware, como por ejemplo leds que dejan de funcionar, una fuente de alimentación o una memoria que se debe reemplazar. Otras veces se requieren cambios en el software, por ejemplo actualizar el contenido de un mensaje o bien cambiarlo. Los atributos de mantenibilidad, versatilidad, modularidad y confiabilidad en la implementación pueden tener un impacto económico relevante en la operación de un servicio de transporte. Para líneas de trenes que cuentan con muchas formaciones ferroviarias operando en simultáneo, las tareas de actualización pueden ser muy intensivas en términos de horas de trabajo y requerir también capacitaciones técnicas periódicas al personal de mantenimiento. Incluso no todos los dispositivos pueden recibir actualizaciones en producción, esto es, en la locación física donde funcionan. Muchas veces se los necesita desinstalar, llevar a un centro técnico y actualizar fuera de operación, lo que requiere de ventanas de mantenimiento y de tiempos reducidos para realizar tareas que pueden ser susceptibles a errores. Otra forma es enviar un técnico al sitio que pueda conectar algún periférico y actualizar manualmente cada dispositivo.

De los trabajos académicos relevados se mencionan aquellos con propuestas del sistema de control que representan distintas tecnologías. En [6] se utiliza el chip AT89C52 para enviar caracteres chinos sobre matrices de 32 x 192 leds de un solo color; en [7] se implementa una pantalla led RGB de 320 x 240 píxeles que rota 360° permitiendo visualizar imágenes en color por persistencia de visión; en [8] se desarrollan algoritmos sobre FPGA usando búferes de datos para controlar una pantalla LED de 160 x 32 píxeles alcanzando 32,768 colores; en [9] se presenta el control de un micro display de transistores de película delgada (TFT) usando modulación por ancho de pulso (PWM) alcanzando 256 niveles de color a una frecuencia de refresco de 60 Hz, basado también en FPGA; en [10] se presenta el control de píxeles virtuales para matrices led multicolor usando flip-flops tipo D.

En el diseño e implementación del presente trabajo, los carteles son de matriz led de un solo color y de distintas dimensiones (8x64, 32 x 64, 32 x 128). El control de los carteles tiene como factor común el uso del conjunto de chips digitales 74HC138, 74HC595 y 74HC245. La topología permite interconectar paneles en serie para construir carteles led de distinto tamaño usando la misma lógica de control.



## Capítulo 2

# Introducción específica

En este capítulo se introduce la terminología de la red de comunicaciones del tren y del sistema de información visual al pasajero. Se presenta una descripción de la arquitectura del sistema y de sus módulos principales. También se introduce el sistema de carteles led que presentan información al pasajeros, en particular en los coches de las formaciones ferroviarias de Trenes Argentinos.

### 2.1. Trenes: Red de comunicación TCN

La red de comunicaciones del tren (TCN) presenta una arquitectura de buses jerárquicos de dos niveles que se pueden identificar en la figura 1: el bus de datos WTB y el MVB[11]. El WTB se encarga de las comunicaciones entre coches a través de nodos con redundancia física, mientras que al bus MVB se conectan los dispositivos de cada coche. Algunos de estos dispositivos son el control de puertas (DOORL/R), el aire acondicionado (HVAC), el sistema de tracción (VVVF), el sistema de control de frenos (BCU), entre otros. El mapa de recorrido y los carteles LED en conjunto con otros dispositivos como los parlantes y las cámaras de video (CCTV) forman un sistema denominado Sistema de información al pasajero (PIDS).

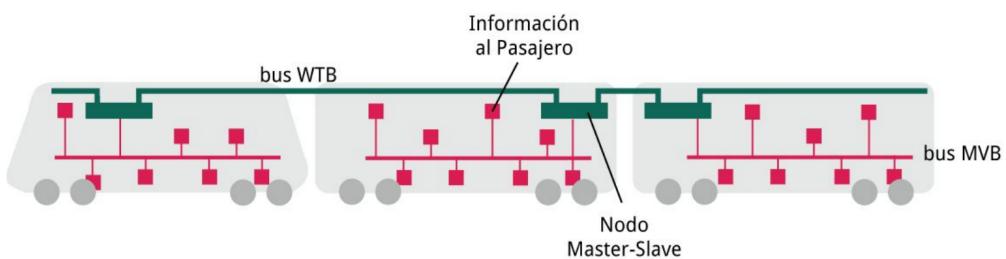


FIGURA 2.1. Diagrama del tren y de los buses WTB/MVB de la red TCN.

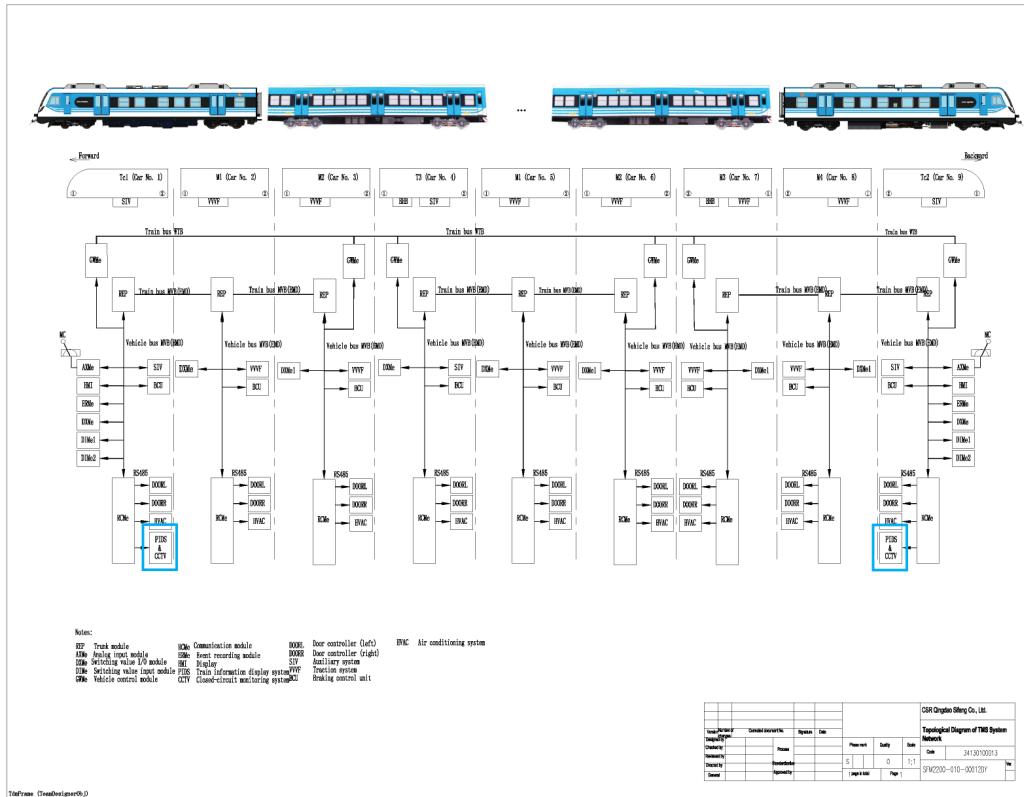


FIGURA 2.2. Diagrama de la red TCN de Trenes Argentinos. Cortesía SOFSE, plano modificado por parte del autor.

## 2.2. PIDS: Sistema de información visual para pasajeros de trenes



FIGURA 2.3. Fotografía del rack de salón de una formación de Trenes Argentinos.

### 2.3. Carteles y controladoras de matrices LED

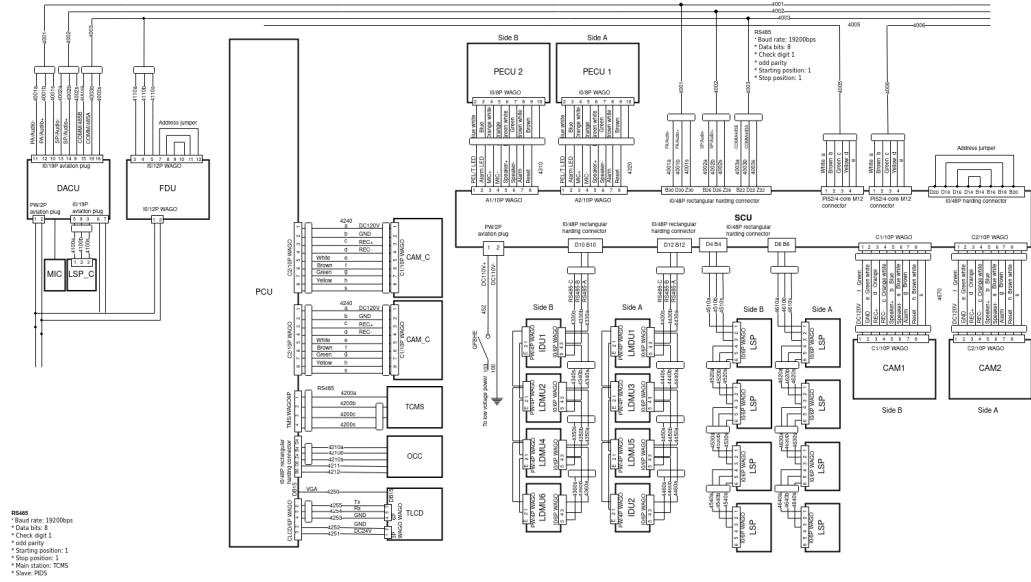


FIGURA 2.4. Diagrama de bloques del sistema PIDS, elaborado en base al plano de referencia de SOFSE.

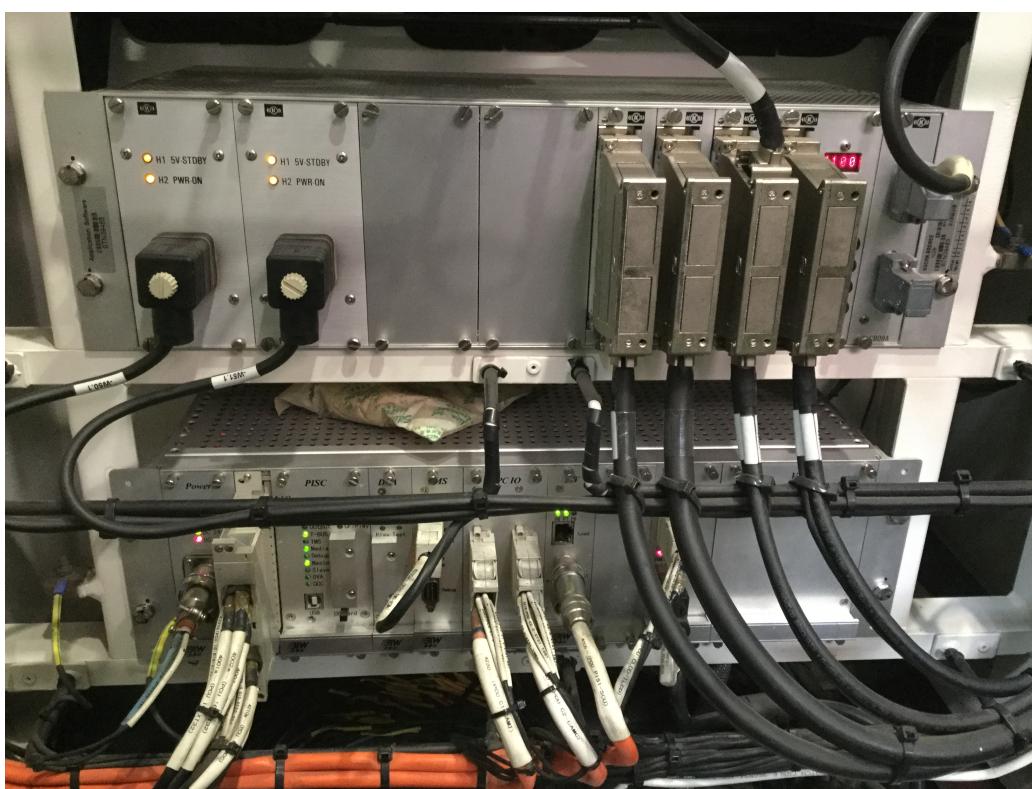


FIGURA 2.5. Fotografía de las unidades de rack del sistema PIDS en el rack de salón.



FIGURA 2.6. Fotografía del detalle de cableado de la unidad de rack del PIDS que corresponde a los carteles LED de salón.

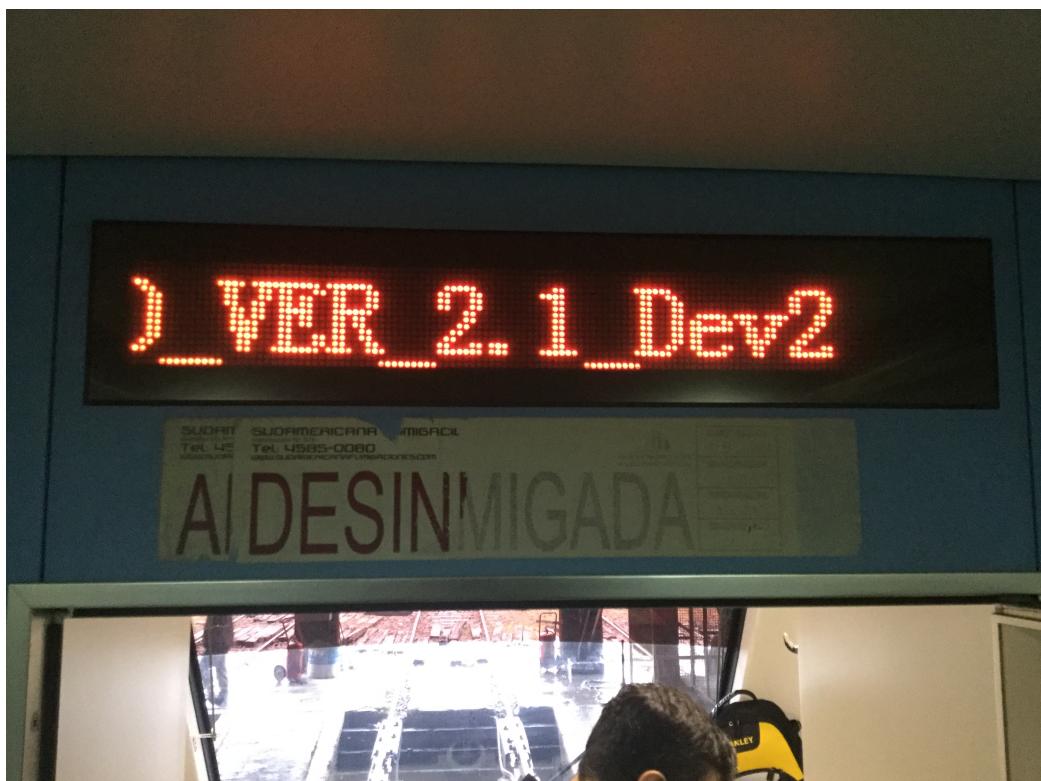


FIGURA 2.7. Fotografía de un cartel de salón inicializándose bajo una prueba de operación.



FIGURA 2.8. Fotografía del detalle de conexión de la placa de control de los carteles led de salón.

## Capítulo 3

# Diseño e implementación

En este capítulo se presentan los requerimientos y la solución propuesta. Se describe la arquitectura, algunos patrones de software, técnicas de concurrencia utilizadas y distintas vistas de despliegue, tanto a nivel de interacción entre componentes como las secuencias de los casos de uso.

En este trabajo se usa la plataforma de hardware EDU-CIAA[12], la API desarrollada bajo el nombre de Firmware\_v3[13], y el sistema operativo de tiempo real FreeRTOS[14].

Siguiendo los lineamientos del marco de trabajo en ingeniería de software, se presentan el desarrollo en el siguiente orden: requerimientos, funcionalidades y casos de uso principales como ejes del espacio problema; arquitectura, patrones, firmware y hardware para describir el espacio solución.

A modo de ejemplo:

```
sStateMachine fsmTest [] =
{
    {STATE_INIT, evInit, InitHandler},
    {STATE_LISTENING, evReceive, ListeningHandler},
    {STATE_HEADER, evReceive, HeaderHandler},
    {STATE_TRAILER, evReceive, TrailerHandler}
};
```

### 3.1. Requerimientos

El objetivo principal de este trabajo es diseñar e implementar un sistema de información visual para pasajeros a bordo del tren.

Está dirigido a:

1. Todos los miembros del grupo de trabajo GICSAFE y SOFSE que participan de proyectos orientados a cubrir necesidades tecnológicas del sistema ferroviario argentino.
2. Alumnos y personal académico con intenciones de participar en proyectos de desarrollo aplicados a la industria.

### 3. Desarrolladores de software y equipamiento para trenes.

A nivel general, los requerimientos del proyecto son los siguientes:

- El sistema debe leer datos de información al pasajero de la red interna de los trenes y presentarlos en un display LED. El sistema no se encargará de presentar los mensajes en formato de audio.
- Este sistema permitirá implementar las funciones de visualización del sistema de información al pasajero existente. El sistema comercial existente es un equipamiento propietario que integra otras funciones como el sistema de audio, un CCTV usando cámaras de seguridad, entre otras.
- El sistema que se especifica busca desacoplar funciones del equipamiento comercial para permitir reponer carteles que en la actualidad quedan fuera de servicio por fallas o pérdida del material original y que no pueden ser reparados.

Estos requerimientos generales se traducen en requerimientos específicos y se dividen en tres grupos que se detallan a continuación: requerimientos funcionales, de integración y de documentación.

#### Requerimientos funcionales

- El sistema debe controlar arreglos de matrices LED de 8x8 (64 LED individuales).
- El sistema debe presentar en el display información dinámicamente.
- El sistema debe poder almacenar una cantidad de información para visualización.
- El sistema debe permitir elegir entre distintos mensajes de visualización.
- El sistema debe permitir cargar los mensajes a visualizar a través de una computadora.
- El sistema debe poder reaccionar a un mensaje que es enviado para visualizar.

#### Requerimientos de integración con la red TCN

- Las placas de control deben ser compatibles con el sistema PIDS existente.
- Las placas de control deben poder alimentarse con 110 VDC.
- El bus de datos de entrada debe ser una interfaz RS-485.
- El sistema debe interpretar las tramas del PIDS que corresponden a los módulos LDU.
- El sistema debe manejar tramas en ciclos típicos de 16-20 ms.

#### Requerimientos de documentación

- Se debe generar un documento de casos de prueba.
- Se debe generar una guía de usuario.
- Se debe generar una presentación del sistema.
- Se debe generar un informe final de proyecto.

La tabla 3.1 sintetiza los requerimientos y les asigna un código de referencia para la evaluación de su cumplimiento.

Código	Descripción
PIDS-REQ-FN-01	Control de módulos de matriz led 8x8
PIDS-REQ-FN-02	Control de paneles de 2x6 modulos
PIDS-REQ-FN-03	Control de displays basados en arreglos de 3 paneles
PIDS-REQ-FN-04	Visualización de mensajes en idioma castellano
PIDS-REQ-FN-05	Visualización de mensajes dinámicos
PIDS-REQ-FN-06	Almacenamiento de información de trayecto
PIDS-REQ-FN-07	Selección de contenidos disponibles
PIDS-REQ-FN-08	Upstream de mensajes desde una computadora personal
PIDS-REQ-INT-01	Compatibilidad de sistema con sistema existente
PIDS-REQ-INT-02	Compatibilidad eléctrica
PIDS-REQ-INT-03	Compatibilidad de interfaces RS485
PIDS-REQ-INT-04	Compatibilidad con tramas de datos del módulo LDU
PIDS-REQ-INT-05	Procesamiento de tramas menor a 16 ms
PIDS-REQ-DOC-01	Documentación de casos de prueba
PIDS-REQ-DOC-02	Guía de usuario
PIDS-REQ-DOC-03	Presentación del sistema
PIDS-REQ-DOC-04	Informe final de proyecto

TABLA 3.1. Tabla de requerimientos funcionales, de integración y de documentación del proyecto.

Por último se explicita que para el desarrollo del presente proyecto se asume que:

- No habrá dependencias directas con otros proyectos enmarcados en el mismo PDE[15].
- No habrá dificultad ni excesivas demoras en la compra de los componentes electrónicos o de software necesarios.
- Se contará con recursos y materiales necesarios para validar los test realizados. Trenes Argentinos dará acceso a una formación ferroviaria con red TCN para realizar pruebas de campo.
- El Sistema de Información al Pasajero se va a montar sobre el sistema PIDS existente de las formaciones ferroviarias en operación.
- El sistema de información al pasajero no se va a montar sobre redes TCN de tiempo real basadas en Ethernet (ETB/ECN).

### 3.2. Casos de Uso

Los casos de uso planteados se presentan como respuesta a historias de usuario. Las historias de usuario principales son:

- Como usuario del tren quiero ver el nombre de la estación a la que estoy arribando.
- Como conductor del tren quiero elegir el destino y recorrido asociado que se visualizará en los coches.
- Como sistema vinculado quiero transmitir mensajes de asistencia, emergencia e información al pasajero.
- Como componente de sistema quiero recibir e interpretar tramas de la red de datos del sistema PIDS

Estas historias de usuario presentan cuatro tipos distintos de usuarios: pasajeros, conductores, sistemas de información al pasajero, y componentes internos del sistema. Con esta oferta de usuarios de sistema se busca definir funcionalidad y casos de uso. Los principales casos de uso del sistema se presentan en la tabla 3.2.

Código	Descripción
PIDS-UC-01	Visualizar estación
PIDS-UC-02	Elegir destino
PIDS-UC-03	Información de asistencia
PIDS-UC-04	Receptor de tramas

TABLA 3.2. Tabla de casos de uso.

El caso de uso UC-1 involucra al tren como sistema disparador cuando arriba a una estación y presenta información visual al pasajero usando los carteles LED de salón. El UC-2 resuelve una acción del conductor al presionar un botón, y presenta también información visual al pasajero, en este caso las estaciones cabecera del recorrido que se visualizan en los carteles LED de frente y contrafrente del tren. El tercer caso de uso, UC-3, presenta información de asistencia previamente cargada y que se dispara por acción de un timer mientras el tren está en circulación. Por último, el caso de uso UC-4 involucra al módulo SCU de la red PIDS y a un sistema externo, como puede ser una computadora de un operador, para decodificar las tramas de datos recibidas desde el SCU.

<b>UC-1: Visualización del nombre de la estación arribada</b>		
1	Nombre	Visualizar el nombre de la estación arribada.
1.1	Descripción	El sistema genera un mensaje que contiene información para el actor principal.
1.2	Actor principal	Pasajeros
	Disparadores	El evento se inicia cuando el tren arriba a una estación.
2	Flujo de eventos	
2.1	Flujo básico	<p>El tren comienza a frenar hasta llegar a velocidad 0 km/h.</p> <p>El subsistema PIDS recibe del bus MVB las tramas con la variable de velocidad.</p> <p>El subsistema PIDS busca el nombre de la estación actual, buscando en la base de datos.</p> <p>El subsistema PIDS envía la trama a la Red TCN con destino al sistema HMI.</p> <p>El subsistema HMI recibe la trama generada por el PIDS y presenta el nombre de la estación en la pantalla.</p> <p>El tren se queda detenido en la estación.</p>
2.2	Flujo alternativo	<p>El subsistema PIDS recibe del bus MVB las tramas con la variable de velocidad.</p> <p>El subsistema PIDS compara el estado actual y no detecta cambios.</p> <p>El subsistema PIDS envía una trama a la red TCN interrogando el sistema HMI.</p> <p>El subsistema HMI recibe el requerimiento y entrega el mensaje.</p> <p>El subsistema PIDS recibe el mensaje y no detecta cambios, no lo procesa.</p>
3	Requerimientos especiales	
4	Pre-condiciones	El sistema debe estar en modo ONLINE.
5	Post-condiciones	El sistema pasa al estado detenido.

TABLA 3.3

### 3.3. Arquitectura

El sistema PIDS de Trenes Argentinos sigue una arquitectura específica que está relacionada con la implementación de la red TCN del fabricante de los trenes, la empresa China State Railway Group Company, Ltd. En este capítulo se describen los aspectos más relevantes de esa arquitectura que tienen relación con los componentes del sistema embebido propuesto.

El sistema embebido diseñado en este trabajo sigue una arquitectura orientada a eventos. Se han desarrollado distintos patrones de software a lo largo del trabajo, buscando modularidad, portabilidad y escalabilidad. Algunos de los objetos que se implementaron se describen a nivel de detalle para resaltar los criterios y decisiones de diseño tomadas.

La relación entre la arquitectura existente del PIDS de trenes y la arquitectura del sistema embebido basado en la plataforma CIAA busca satisfacer por un lado la compatibilidad eléctrica de hardware y por otro las historias de usuario planteadas en los casos de uso en la etapa de definición de requerimientos.

En las secciones siguientes se describen los componentes del sistema y sus interacciones. Se mencionan también algunas mejoras evaluadas para futuras implementaciones que buscan optimizar fragmentos de código con potencial de optimización de recursos usando instrucciones en lenguaje assembly propias de arquitecturas ARM M4.

### 3.3.1. Contexto

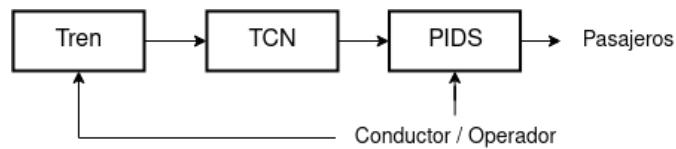


FIGURA 3.1. Diagrama del sistema Tren-TCN-PIDS.

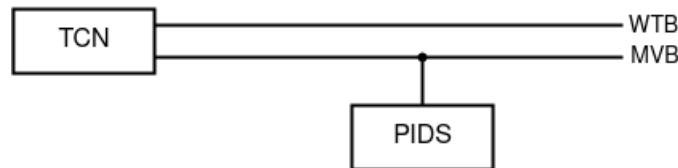


FIGURA 3.2. Diagrama de interconexión TCN-PIDS

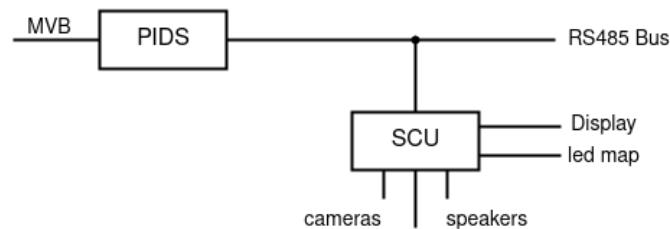


FIGURA 3.3. Diagrama del módulo SCU en la red PIDS.

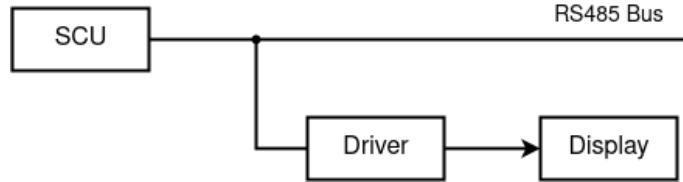


FIGURA 3.4. Diagrama de bloques del sistema SCU, placa de control y carteles LED de salón.

### 3.3.2. Diseño

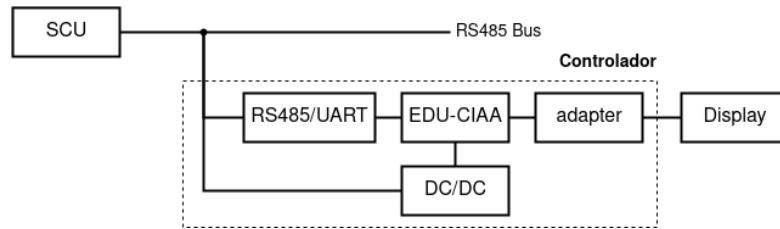


FIGURA 3.5. Diagrama de bloques del controlador propuesto.

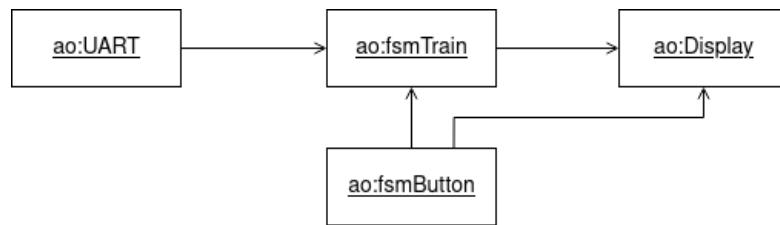


FIGURA 3.6. Vista de interacciones del sistema propuesto.

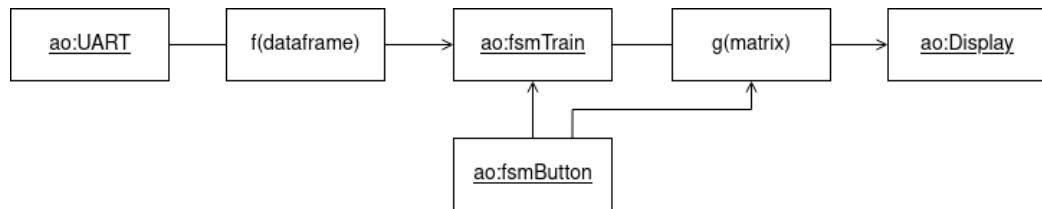


FIGURA 3.7. Vista de interacciones extendida del sistema propuesto.

### 3.3.3. Implementación

El desarrollo de la arquitectura propuesta se basa en la interacción de máquinas de estado. En este trabajo las máquinas de estado se implementan en C a partir de la siguiente estructura:

1. Definir los estados posibles con un tipo definido como ".eSystemState":

```
typedef enum {
    STATE_INIT,
    STATE_LISTENING,
    STATE_HEADER,
    STATE_TRAILER
} eSystemState;
```

2. Definir los eventos que van a generar transiciones entre estados con un tipo definido ".eSystemEvent":

```
typedef enum{
    evInit ,
    evReceive ,
    evHeader ,
    evTrailer
} eSystemEvent;
```

3. A partir de un diagrama de la máquina de estados en cuestión, definir un tipo puntero a función definido como "\*pfEventHandler()":

```
typedef eSystemState (* pfEventHandler)(void);
```

- 4: Definir una estructura para la máquina de estados con un tipo definido "sStateMachine" que incluya una variable estado (eSystemState), una variable evento (eSystemEvent) y un puntero a función (pfEventHandler). El puntero a función será una instancia de handler específico que maneje las transiciones entre estados.

```
typedef struct {
    eSystemState      fsmState ;
    eSystemEvent     fsmEvent ;
    pfEventHandler   fsmHandler ;
} sStateMachine ;
```

De esta manera queda desacoplada la implementación de los handlers del resto de la estructura de la máquina de estados, logrando portabilidad, escala y modularidad. Los handlers serán funciones que se implementan con el sufijo Handler() y que por definición tienen un solo argumento de tipo void.

5. Definir los handlers a implementar para el manejo de ejecución y transiciones entre estados.

```
eSystemState InitHandler(void)    ;
eSystemState ListeningHandler(void)   ;
eSystemState HeaderHandler(void)    ;
eSystemState TrailerHandler(void)   ;
```

Con esta técnica de desacoplamiento, se implementan dos archivos por cada máquina de estado : uno de encabezados (stateMachine.h) con las definiciones de los puntos 1 a 4 y otro con la implementación (stateMachine.c) de los handlers.

Una implementación de handler a modo de ejemplo se presenta a continuación.

```
eSystemState TrailerHandler(void) {
    printf("STATE_TRAILER;\n");
    return STATE_LISTENING;
}
```

6. Finalmente, cada implementación de máquina de estado debe definir la instancia de la máquina de estados propiamente dicha con un arreglo de estructuras definido como "sStateMachine fsmStateMachine []". Este arreglo de estructuras máquina de estados se define a partir de los estados, sus transiciones y los handlers correspondientes. En este punto es mandatorio incluir un diagrama de la máquina de estados.

```
sStateMachine fsmTest [] =
{
    {STATE_INIT, evInit, InitHandler},
    {STATE_LISTENING, evReceive, ListeningHandler},
    {STATE_HEADER, evReceive, HeaderHandler},
    {STATE_TRAILER, evReceive, TrailerHandler}
};
```

El diagrama para esta máquina es el siguiente:

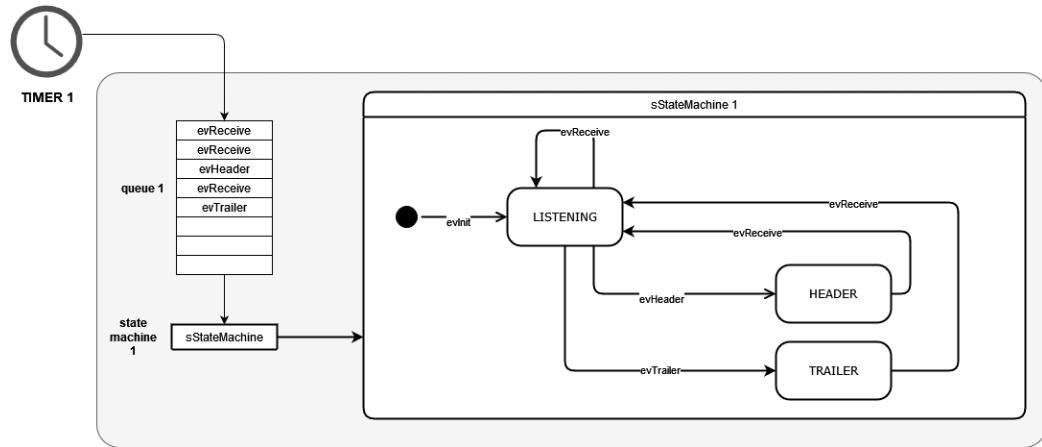


FIGURA 3.8. Diagrama del objeto activo de la máquina de estados asociada.

### 3.4. Patrones

### **3.5. Firmware**

### **3.6. Hardware**

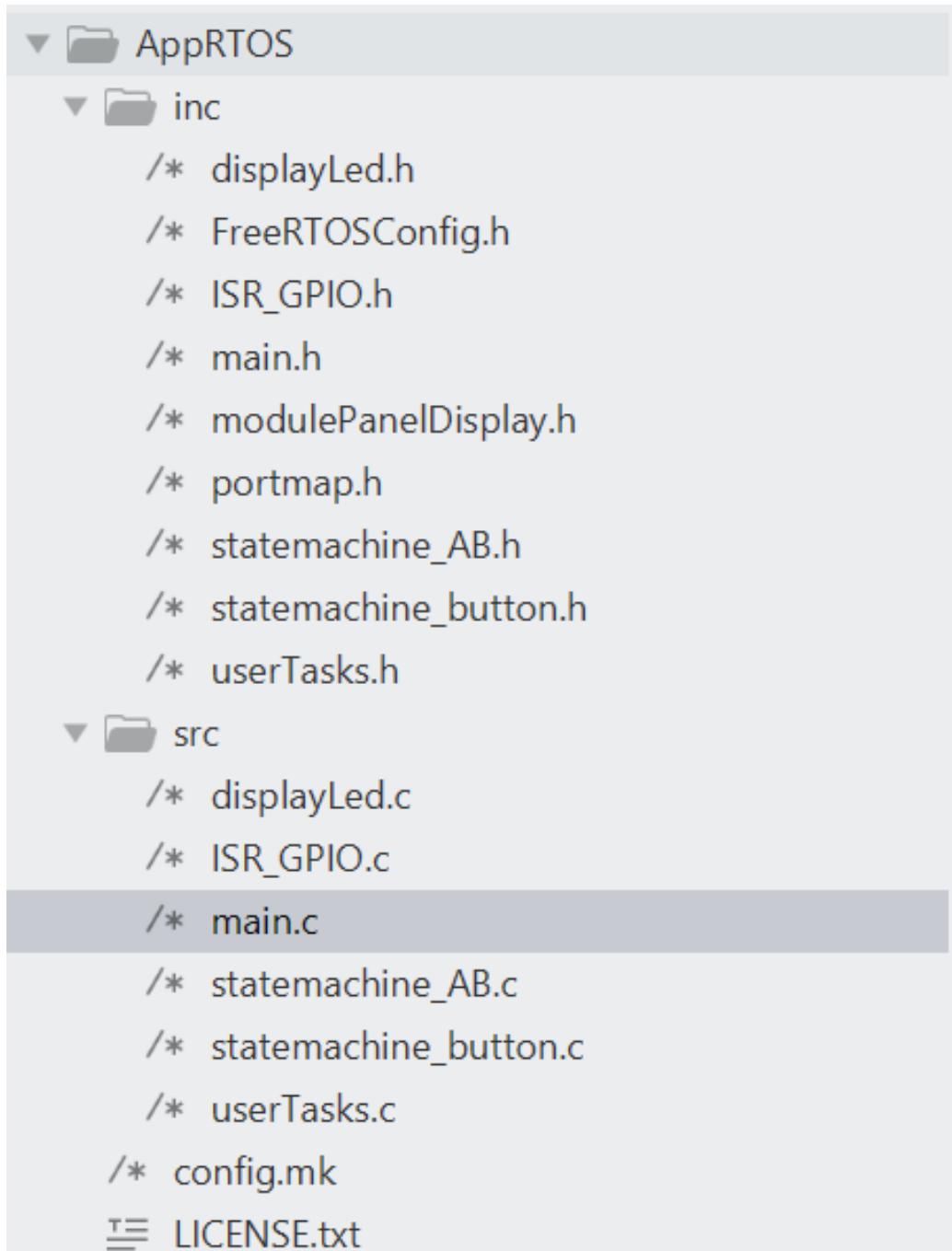


FIGURA 3.9. Estructura del código en C.

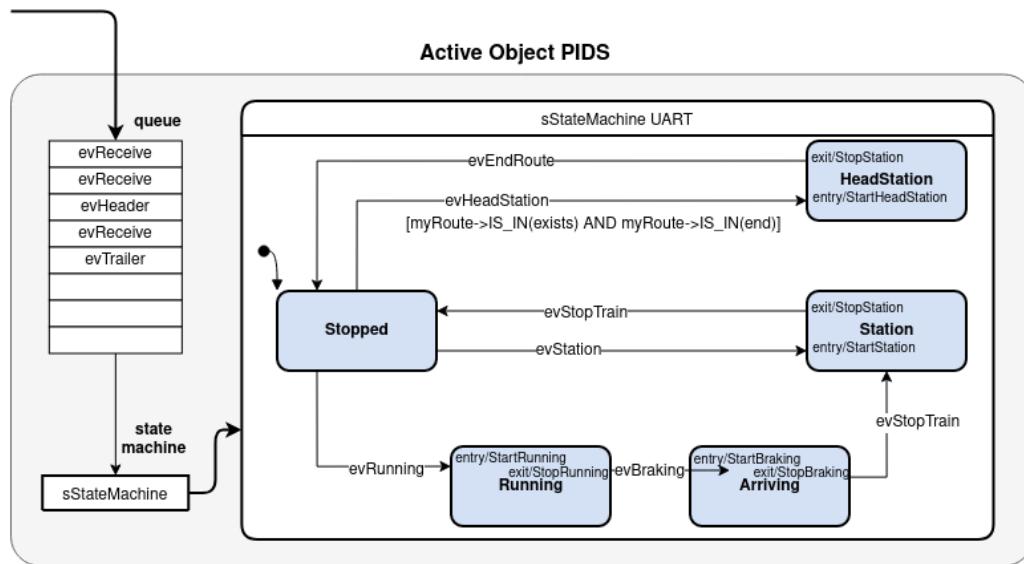


FIGURA 3.10. Diagrama del objeto activo PIDS y detalle de la máquina de estados asociada.

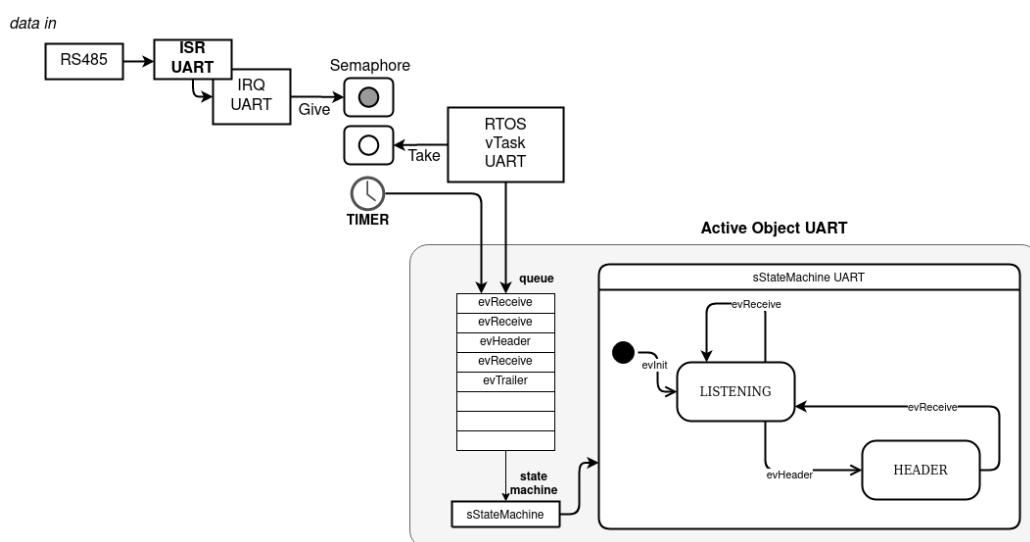


FIGURA 3.11. Diagrama de detalle de la implementación en RTOS del objeto activo UART.

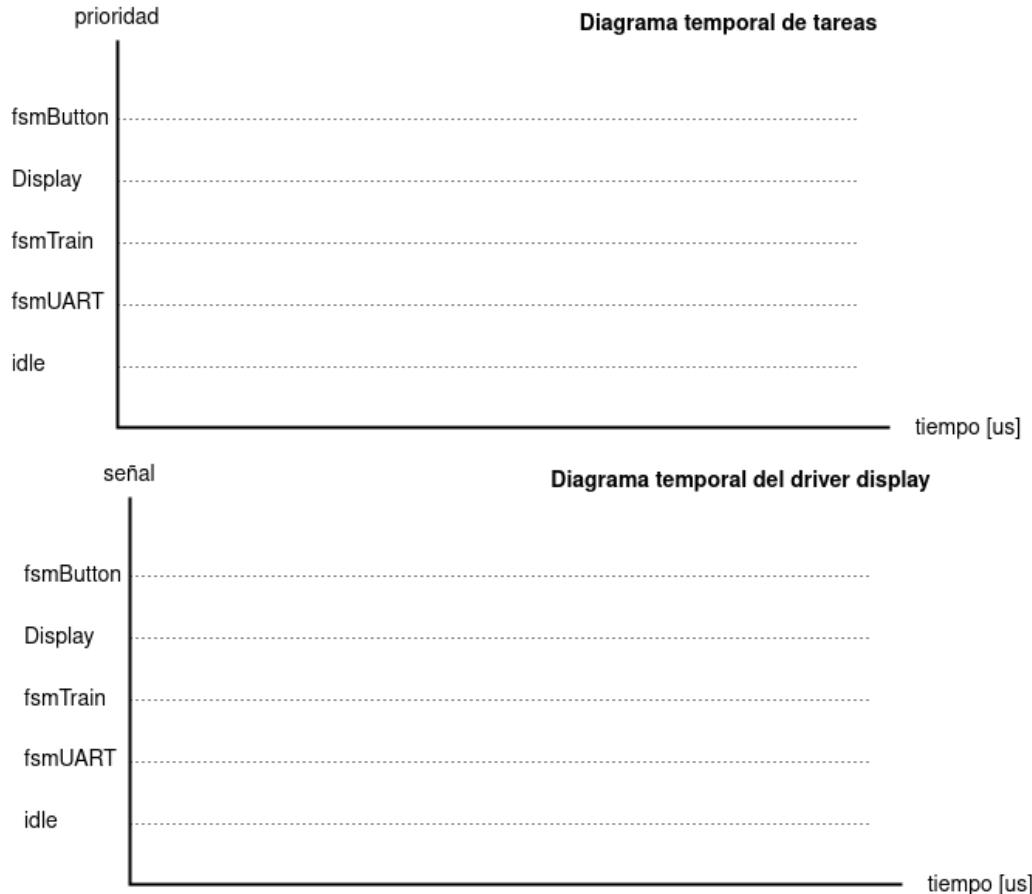


FIGURA 3.12

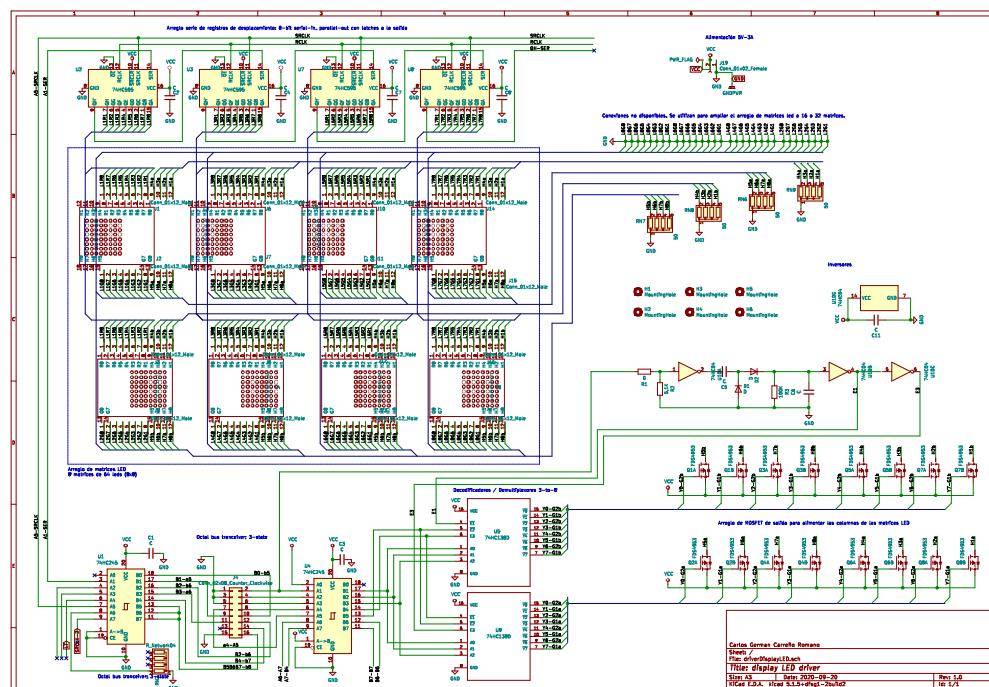


FIGURA 3.13. Circuito esquemático de la placa driver de los carteles de matriz LED.

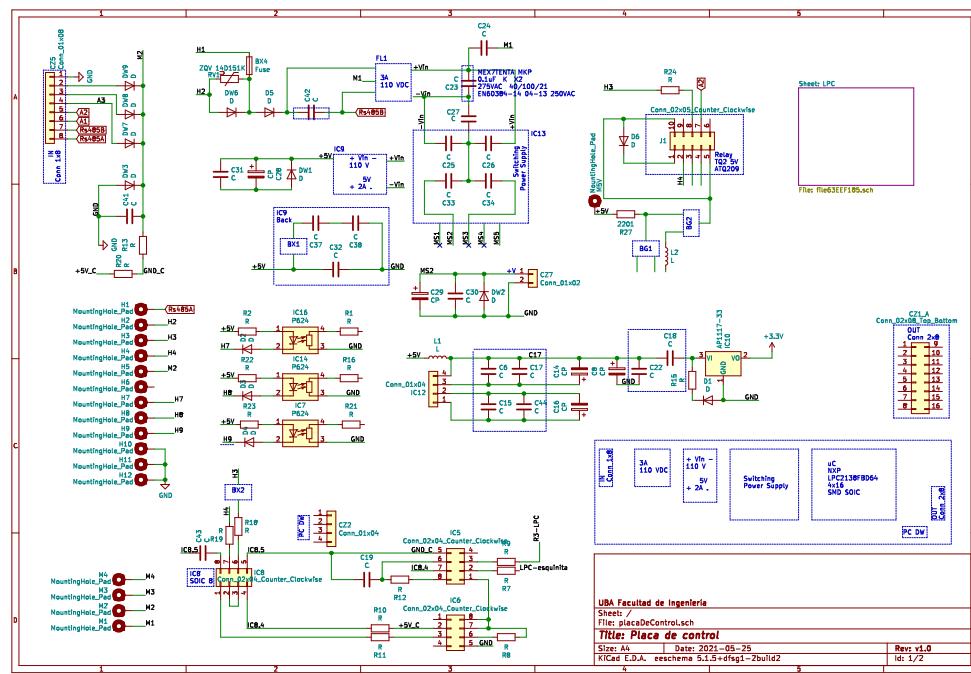


FIGURA 3.14. Circuito esquemático de la placa de control de los carteles LED de salón.

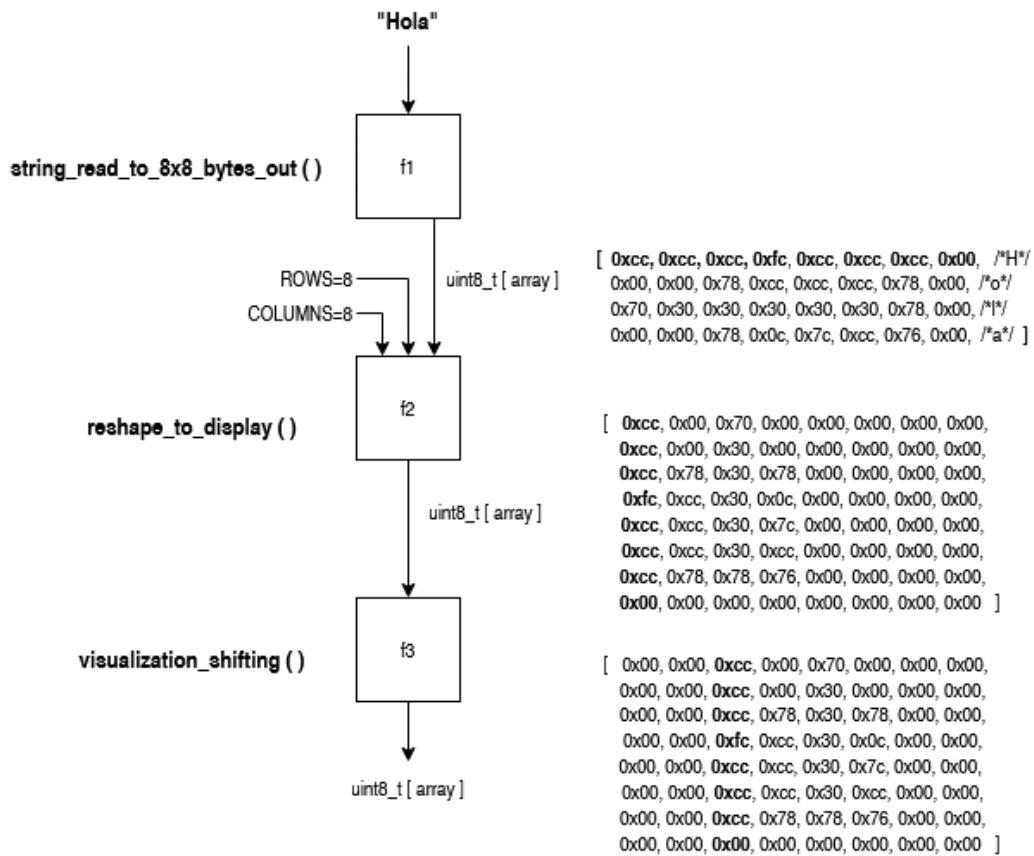


FIGURA 3.15. Lógica de procesamiento de datos para visualizar en el display.

## Capítulo 4

# Ensayos y resultados

En este capítulo se detallan los ensayos realizados en las formaciones ferroviarias y en los talleres de Trenes Argentinos. El orden cronológico de los ensayos es distinto al del desarrollo del firmware. En este documento se ha presentado previamente el diseño de la solución para facilitar la comprensión del trabajo realizado. El desarrollo de la solución fue posterior a una serie de mediciones realizadas en los talleres que permitieron identificar parámetros clave del sistema.

En las secciones que siguen se explican las mediciones realizadas en las visitas a los talleres de Victoria y Castelar de Trenes Argentinos Operaciones. Luego se presenta un análisis de datos de las tramas relevadas y también las pruebas de integración propuestas para validar el desarrollo.

### 4.1. Mediciones

## **4.2. Análisis de tramas**

### **4.3. Pruebas en maqueta**

#### **4.4. Integración con red PIDS**

## **4.5. Pruebas de campo**



## **Capítulo 5**

# **Conclusiones**

En este capítulo se exponen los principales resultados obtenidos de este trabajo. Se presenta también su relación con el contexto y se plantea una serie de trabajos futuros.

### **5.1. Resultados obtenidos**

## **5.2. Prospectivas**

**5.3. Bibliografía**

# Bibliografía

- [1] .
- [2] .
- [3] .
- [4] .
- [5] .
- [6] Yongxian Song et al. «Design of LED Display Control System Based on AT89C52 Single Chip Microcomputer.» En: *J. Comput.* 6.4 (2011), págs. 718-724.
- [7] Shih-Min Liu, Ching-Feng Chen y Kuang-Chung Chou. «The design and implementation of a low-cost 360-degree color LED display system». En: *IEEE transactions on consumer electronics* 57.2 (2011), págs. 289-296.
- [8] W Kurdthongmee. *Design and Implementation of an FPGA-based Multiple-color LED Display*. 2004.
- [9] Yi-Zhen Lin et al. «Active-matrix micro-LED display driven by metal oxide TFTs using digital PWM method». En: *IEEE Transactions on Electron Devices* 68.11 (2021), págs. 5656-5661.
- [10] Alfonso Gago, José Fernández y Alfonso G Bohórquez. «Control architecture of a virtual matrix LED display without current drivers». En: *2009 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*. IEEE. 2009, págs. 53-56.
- [11] .
- [12] Proyecto CIAA. *Computadora Industrial Abierta Argentina*. Visitado el 2016-06-25. 2014. URL: <http://proyecto-ciaa.com.ar/devwiki/doku.php?id=start>.
- [13] Eric Pernia. *firmware v3*. Visitado el 2023-04-07. 2021. URL: [https://github.com/epernia/firmware\\_v3](https://github.com/epernia/firmware_v3).
- [14] Richard Barry. *Free Real Time Operative System*. Visitado el 2023-04-07. 2016. URL: [https://freertos.org/Documentation/RTOS\\_book.html](https://freertos.org/Documentation/RTOS_book.html).
- [15] Pablo Gomez. *PDE 15 2020 SISTEMA DE MONITOREO Y GESTIÓN DE LA RED TCN EN FORMACIONES FERROVIARIAS*. Visitado el 2023-04-07. 2021. URL: [https://github.com/epernia/firmware\\_v3](https://github.com/epernia/firmware_v3).