

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE MAESTRÍA EN SISTEMAS EMBEBIDOS



MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

**Sistema ferroviario de enclavamiento  
electrónico en FPGA**

**Autor:**  
**Esp. Ing. Martín Nicolás Menéndez**

Director:  
Dr. Ing. Ariel Lutenberg (CONICET-FIUBA)  
Codirector:  
Mg. Ing. Facundo Larosa (UTN-FRBA)

Jurados:  
Mg. Ing. Nicolás Dassieu Blanchet (FIUBA)  
Esp. Ing. Pedro Martos (FIUBA)  
Ing. Nicolás Álvarez (UNSAM, FIUBA)

*Este trabajo fue realizado en las Ciudad Autónoma de Buenos Aires, entre marzo de 2019 y abril de 2020.*



## *Resumen*

En base a un pedido de Trenes Argentinos, se diseñó un sistema electrónico de enclavamiento electrónico. Un enclavamiento es un sistema ferroviario de alto costo y complejidad, que controla automáticamente que las máquinas de cambios y las señales se gestionen de forma segura, evitando choques y descarrilamientos de trenes.

Para el desarrollo de este trabajo resultó necesario aplicar conocimientos en lenguajes de descripción de hardware para la implementación del sistema sobre una plataforma de lógica programable en FPGA. Además, se trabajó con control de versiones y se aplicó el modelo de máquinas de estados finitos para la lógica del sistema. Se aplicaron estrategias de testing para validar los módulos. Finalmente, fueron fundamentales los conocimientos de sistemas críticos y ferroviarios.



## *Agradecimientos*

Quisiera agradecer a mi familia que siempre me han apoyado a lo largo de todos mis estudios de forma incondicional. Espero que se sientan tan orgullosos de los resultados como yo de haber puesto tanto esfuerzo en la realización de mi carrera.

A mi Director el Dr. Ing. Ariel Lutenberg, que con una enorme paciencia siempre me ha dado incontables oportunidades para demostrar mi capacidad. Sus inagotables ganas de que el país crezca tecnológicamente son muy inspiradoras y los proyectos en los que me ha confiado la participación me enriquecen enormemente.

A mi Codirector, el Mg. Ing. Facundo Larosa, que disipó muchas de mis dudas y aportó una metodología de trabajo que supo dar sus frutos.

Al Ing. Nicolás Álvarez, que desde el inicio del proyecto supo guiarme en los aparatazos técnicos del mundo de las FPGA's y su dedicación al proyecto fue crucial en momentos que requerían experiencia que me excedía.

Al CONICET-GICSAFe por su gran camaradería y solidaridad a la hora de compartir sus saberes, tanto de la profesión como de la vida diaria. Especialmente al Dr. Ing. Pablo Gomez y al Ing. Adrián Laiuppa, ya que conversando con ellos fuera del trabajo diario he aprendido enormemente.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>1. Introducción General</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto y motivación . . . . .	1
1.2. Propuesta de solución . . . . .	2
1.3. Elementos del sistema ferroviario . . . . .	4
1.3.1. Vías . . . . .	4
1.3.2. Semáforos ferroviarios . . . . .	5
1.3.3. Circuito de vías . . . . .	6
1.3.4. Pasos a nivel . . . . .	7
1.3.5. Máquina de cambios . . . . .	8
1.4. Sistema de enclavamientos . . . . .	9
1.5. Tipos de enclavamientos . . . . .	10
1.5.1. Enclavamientos mecánicos . . . . .	10
1.5.2. Enclavamientos electromecánicos . . . . .	11
1.5.3. Enclavamientos electrónicos . . . . .	12
1.6. Objetivos . . . . .	12
<b>2. Introducción Específica</b>	<b>15</b>
2.1. Topologías típicas . . . . .	15
2.1.1. Bypass . . . . .	15
2.1.2. Estación . . . . .	15
2.1.3. Hub . . . . .	15
2.1.4. Terminal . . . . .	16
2.2. Enfoque funcional . . . . .	16
2.3. Enfoque geográfico . . . . .	16
<b>3. Diseño e Implementación</b>	<b>21</b>
3.1. Consideraciones generales . . . . .	21
3.2. Generación automática . . . . .	21
3.3. Módulo de nodos . . . . .	21
3.4. Módulo de cambios . . . . .	21
3.5. Módulo de red . . . . .	21
3.6. Módulos de adaptación a enclavamiento . . . . .	21
3.6.1. Módulo separador . . . . .	21
3.6.2. Módulo mediador . . . . .	22
3.7. Módulos de procesamiento de tramas . . . . .	22
3.7.1. Módulo detector . . . . .	22
3.7.2. Módulo registro . . . . .	22
3.7.3. Módulo selector . . . . .	23
3.8. Módulo de comunicación UART . . . . .	23
3.9. Interfaz de comunicación Python . . . . .	23

<b>4. Ensayos y Resultados</b>	<b>25</b>
4.1. Validación de grafos . . . . .	25
4.2. Validación del nodo . . . . .	25
4.3. Validación de la máquina de cambios . . . . .	25
4.4. Validación de la red . . . . .	25
4.5. Validación de la UART . . . . .	25
4.6. Validación del sistema . . . . .	25
<b>5. Conclusiones</b>	<b>27</b>
5.1. Resultados obtenidos . . . . .	27
5.2. Próximos pasos . . . . .	28

# Índice de figuras

1.1.	Ejemplo de implementación de topología sencilla . . . . .	3
1.2.	Ejemplo de implementación de topología compleja . . . . .	3
1.3.	Proceso de generación automática de la solución electrónica . . . . .	4
1.4.	Tramo de vía ferroviaria. . . . .	4
1.5.	(a) Semáforo de 3 aspectos (b) Semáforo doble de 3 aspectos (Estación Olivos). . . . .	5
1.6.	(a) Semáforo de 2 aspectos (b) Semáforos de cruce de vías (Estación Lavallol). . . . .	6
1.7.	Ocupación de las secciones de vías. . . . .	6
1.8.	Estado de los aspectos ferroviarios según la ubicación del tren. . . . .	7
1.9.	Pasos a nivel vehicular y peatonal sobre vía férrea. . . . .	8
1.10.	Máquina de cambios de Lavallol (Línea Roca). . . . .	8
1.11.	Cambio de vías de estación Matheu (Línea Mitre). . . . .	9
1.12.	Posiciones normal e inversa del cambio. . . . .	9
1.13.	Vía simple con bypass . . . . .	10
1.14.	Sistema mecánico de enclavamiento en la antigua estación de Chascomús, hoy convertida en museo. . . . .	11
1.15.	Bastidor de relés de estación Lavallol (Línea Roca) . . . . .	11
1.16.	Panel de control enclavamientos - Central Lavallol. . . . .	12
1.17.	Redundancia por votación 2 de 3. . . . .	13
2.1.	Topología bypass . . . . .	16
2.2.	Topología estación . . . . .	16
2.3.	Topología hub . . . . .	17
2.4.	Topología terminal . . . . .	17
2.5.	Enfoque funcional . . . . .	18
2.6.	Esquema de trabajo en el enfoque funcional . . . . .	18
2.7.	Ejemplo de elaboración de tabla de enclavamientos . . . . .	18
2.8.	Escalabilidad del enfoque funcional . . . . .	19
2.9.	Enfoque geográfico . . . . .	19
2.10.	Pasaje de topología ferroviaria a grafo . . . . .	19
2.11.	Análisis del grafo ferroviario . . . . .	19
2.12.	Esquema de trabajo en el enfoque geográfico . . . . .	20
2.13.	Escalabilidad del enfoque geográfico . . . . .	20
3.1.	Generación automática del código VHDL . . . . .	21
3.2.	HOLA . . . . .	21
3.3.	HOLA . . . . .	21
3.4.	HOLA . . . . .	22
3.5.	Diagrama de estados finitos digitales del módulo separador . . . . .	22
3.6.	Diagrama de estados finitos digitales del módulo mediador . . . . .	22
3.7.	Diagrama de estados finitos digitales del módulo detector . . . . .	23
3.8.	Diagrama de estados finitos digitales del módulo registro . . . . .	23

3.9. Diagrama de estados finitos digitales del módulo selector . . . . .	23
3.10. Diagrama de estados finitos digitales del módulo UART . . . . .	24
3.11. HOLA . . . . .	24
4.1. HOLA . . . . .	25
4.2. HOLA . . . . .	25
4.3. HOLA . . . . .	25
4.4. HOLA . . . . .	26
4.5. HOLA . . . . .	26
4.6. HOLA . . . . .	26

# Índice de Tablas



*"Él hará la unidad de la República mejor que todos los Congresos. Estos podrán declararla una e indivisible pero sin el camino de fierro que acerque sus extremos remotos, quedará siempre divisible y dividida contra todos los Decretos Legislativos."*

*Juan Bautista Alberdi (1810-1884).*



# Capítulo 1

## Introducción General

En este capítulo se presentan el contexto del proyecto, los sistemas ferroviarios, una introducción a las distintas tecnologías de los sistemas de enclavamientos y los objetivos a cumplir.

### 1.1. Contexto y motivación

Actualmente el sistema ferroviario argentino se encuentra enormemente deteriorado y desactualizado. Mientras que otras naciones mas avanzadas han progresado en la migración de sus sistemas de transporte de cargas y pasajeros añadiendo electrónica de última generación, Argentina continua utilizando mecanismos diseñados a principios o mediados del siglo XX.

Esto repercute negativamente en la poca o nula seguridad que dichos sistemas pueden brindar a los pasajeros, conductores, peatones y automovilistas. Pero los sistemas electrónicos para la seguridad vial de trenes y subtes son importados y muy costosos, además de estar monopolizados por menos de un docena de empresas en todo el mundo. Un sistema de enclavamiento como el que se aborda en este trabajo puede costar entre 5 y 10 millones de dólares[**SIEMENS**] y se requieren varias decenas de estos sistemas sólo para la zona urbana de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Dichas empresas brindan muy poca información técnica sobre sus desarrollos y la mayoría de las herramientas que utilizan son de uso privado empresarial. No obstante, deben regirse bajo normativas como las que la comunidad europea ha establecido desde 2004. Normas ferroviarias relacionadas con los parámetros RAMS, haciendo especial hincapié en la seguridad. En este sentido, las tres normas principales son EN-50126[**EN50126**] (ciclo de vida), EN-50128[**EN50128**] (técnicas de software) y EN-50129[**EN50129**] (técnicas de hardware). Entre otras cuestiones, se busca asegurar la integridad de la seguridad.

En los sistemas críticos una falla puede poner en peligro cientos de vidas humanas y/o costosas inversiones. Por lo tanto se deben cumplir estrictos parámetros de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS, del inglés *Reliability, Availability, Mantenability and Safety*), durante todo el ciclo de vida.

En este contexto en 2015 se crea el CONICET-GICSAFe, cuyas siglas corresponden a Grupo de Investigación en Calidad y Seguridad de las Aplicaciones Ferroviarias, conformado por docentes e investigadores de una decena de universidades e instituciones públicas argentinas[**GICSAFE**]. El grupo desarrolla sistemas electrónicos e informáticos para aplicaciones ferroviarias relacionadas con la seguridad, generando un prototipo funcional y la documentación correspondiente

que luego se transfiere en su totalidad a los clientes. En particular, esta metodología se utiliza en este trabajo con Trenes Argentinos, que es la Sociedad del Estado que opera las líneas Roca, Sarmiento, Mitre, San Martín y Belgrano Sur, entre otras. Luego el cliente puede fabricar el sistema diseñado por el GICSAFe o licitar su fabricación, así como modificar el sistema de acuerdo con sus necesidades.

En el marco de la Especialización de Sistemas Embebidos, desde julio de 2018 se tuvieron reuniones con diferentes funcionarios y profesionales de Trenes Argentinos. En particular los encuentros se desarrollaron con la Gerencia de Ingeniería, Gerencia de Seguridad Operacional, Subgerencia de Desarrollo y Normas Técnicas, Subgerencia de Transporte, Gerencia de Señalamiento, entre otros, de los cuales surgió el interés en el desarrollo del presente proyecto. De dichas visitas y otras posteriores se obtienen la totalidad de las fotografías incluidas en esta memoria.

El desarrollo del sistema implica muchas áreas distintas a tener en cuenta: procesamiento, comunicación, replicación del sistema para otras topologías, testing, etc. Un primer prototipo se desarrolló a finales de 2018 y actualmente se culminó una segunda versión para la Maestría en Sistemas Embebidos. Sin contar que la amplia variedad de topologías existentes obliga a abandonar la metodología de desarrollo artesanal de cada sistema y abordarlo de forma general para topologías genéricas, lo que adiciona aún más trabajo al monumental proyecto.

Por esa razón, durante la Maestría en Sistemas Embebidos, en el año 2019, se comenzó a seguir un estrategia orientada a obtener una solución integral para cualquiera sea la locación, generando automáticamente el código y los testbenches involucrados. A la vez que miembros de CONICET-GICSAFe pertenecientes a UTN-Haedo comenzaron el desarrollo de un front-end gráfico y su correspondiente simulador en tiempo real, en vistas a ser integrado al proyecto en el mediano plazo.

Hacia finales del 2019 se iniciaron reuniones con miembros de la Comisión Nacional de Energía Atómica(CNEA), para integrar el proyecto en sus plataformas de hardware ampliamente testeadas en el ámbito de los sistemas críticos. Además del intercambio de conocimiento y la puesta en común de estrategias a utilizar, se aprovechó todo lo posible la amplia experiencia que ellos nos brindaron durante el pasado y corriente año.

## 1.2. Propuesta de solución

En el desarrollo del proyecto en la Especialización de Sistemas Embebidos se implementaron sistemas como el de la Figura 1.1. Con una cantidad acotada de tramos de vías y bifurcaciones que implicaba una cantidad acotada de circuitos lógicos complicados pero posibles de obtener y testear.

La implementación del sistema se hacía de forma artesanal, bloque a bloque y conectándolos de igual manera uno por uno. El testing demoraba días o semanas en estar completo para ser utilizado y era necesario revisar varias veces las pocas y difusas especificaciones que se tenían para corroborar un correcto funcionamiento del sistema.

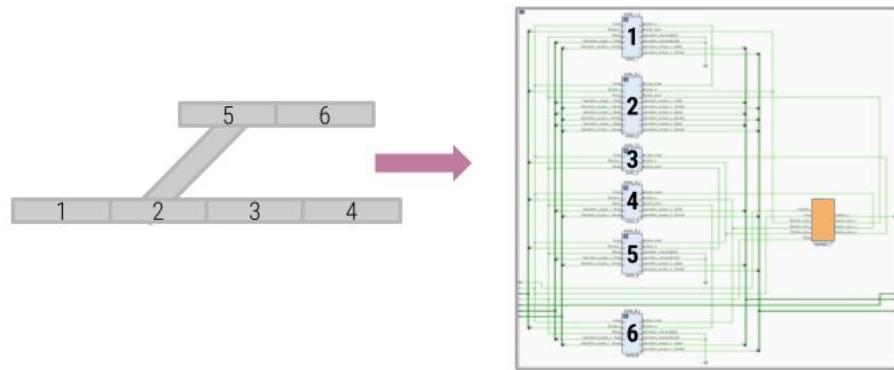


FIGURA 1.1: Ejemplo de implementación de topología sencilla

Pero fue una constante que la locación en la cual se basaba el desarrollo del sistema cambiase abruptamente por otra diferente, representada en la Figura 1.2. Por lo que, aún manteniendo los mismos conceptos iniciales, el alcance y los requerimientos cambiaban completamente y se tenía que desechar gran parte de lo construido, tanto del sistema como los tests que ya no tenían sentido para el nuevo sistema. El rediseñar de cero todo fue algo común durante esta etapa del proyecto.

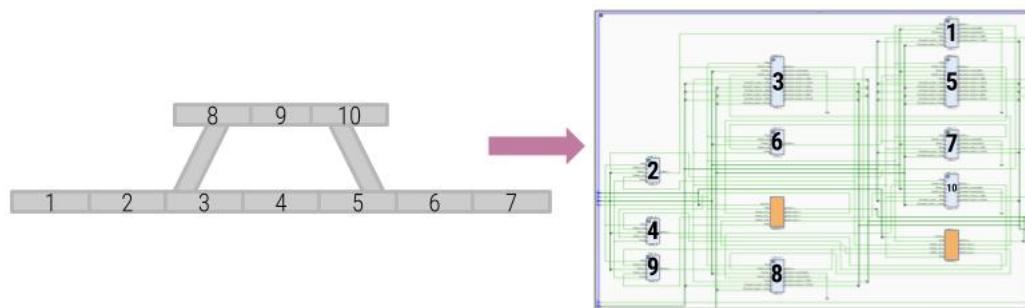


FIGURA 1.2: Ejemplo de implementación de topología compleja

Una mayor cantidad de elementos ferroviarios implica una densidad mayor de circuitos lógicos y estos a su vez repercuten en un crecimiento exponencial de la complejidad del desarrollo, mayor dificultad para implementar los ensayos y mayores chances de errores al extrapolar conceptos aún inmaduros a sistemas de mayor tamaño.

La solución a proponer no podía quedar sujeta a una única topología, ya que aún culminando el proyecto se corría el riesgo de que el tiempo empleado fuese desperdiciado si se cambiaban los requerimientos de forma tan abrupta. Es por eso que se añadió como objetivo de este trabajo el desarrollo de una herramienta capaz de generar automáticamente la solución electrónica de un sistema de enclavamiento ferroviario, a partir de una representación matemática única de cada topología. En la Figura 1.3 se puede visualizar el proceso.

De esta manera, la solución desarrollada parte de cualquier red ferroviaria, representada mediante un grafo y un analizador de redes ferroviarias (desarrollado también en este trabajo) detecta qué función cumplirá cada elemento de la red y determina cuántos semáforos, de cuantos aspectos, en qué orientación y en qué nodo deben situarse para que el sistema sea seguro. A continuación, en base a los

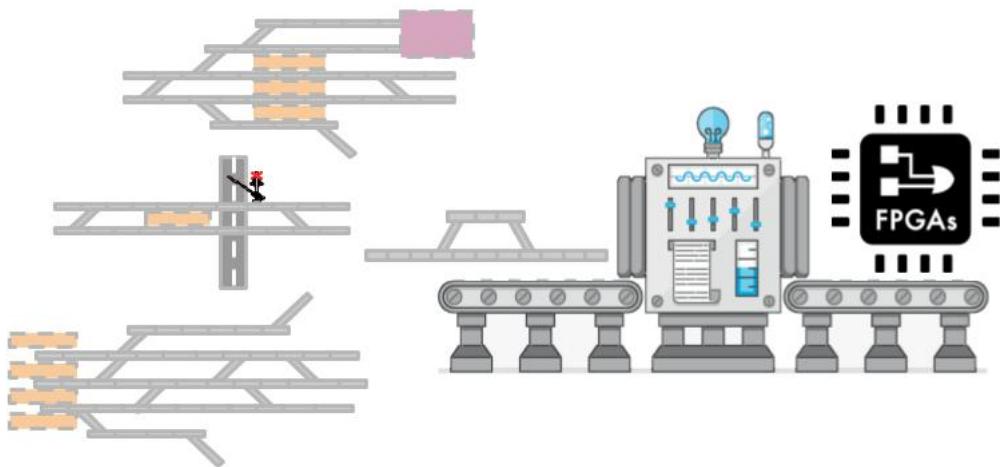


FIGURA 1.3: Proceso de generación automática de la solución electrónica

semáforos insertados el analizador calcula todas las rutas posibles que admite esa red.

Para poder entender mejor el funcionamiento del sistema es necesario introducir conceptos propios del sistema ferroviario y sus componentes involucrados, que se describirán en la sección siguiente.

### 1.3. Elementos del sistema ferroviario

Se denomina señalamiento ferroviario al sistema cuya función es evitar las colisiones entre trenes. A continuación se presentan distintos elementos del señalamiento ferroviario que fueron utilizados durante este trabajo.

#### 1.3.1. Vías

Las vías férreas (1.4) consisten en el elemento esencial de la infraestructura ferroviaria y conforman el sitio por el cual se desplazan los trenes. Las mismas se encuentran separadas una distancia fija, medida desde sus caras internas, denominada trocha.

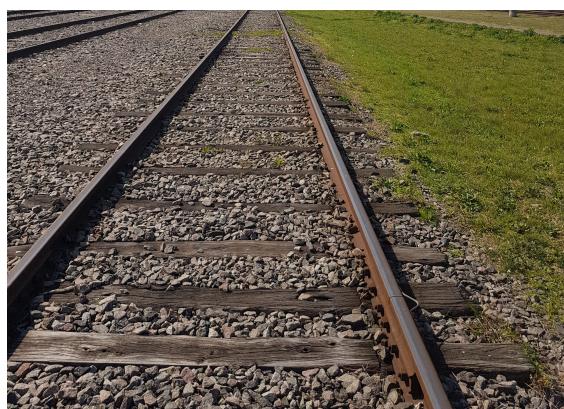


FIGURA 1.4: Tramo de vía ferroviaria.

Las vías no son un tramo continuo, sino que se encuentran separadas en tramos y por seguridad se establece que cada tramo de vías puede contener solo una formación por vez. Los mismos pueden tener largos variables en zonas urbanas de entre 500 a 1000 metros en zonas rurales.

Las vías se clasifican en ascendentes o descendentes. Las ascendentes son aquellas por las que los trenes circulan únicamente en la dirección del kilometraje en sentido creciente. Las descendentes son aquellas por la que los trenes circulan únicamente en la dirección del kilometraje en sentido decreciente [RITO]. El kilómetro 0 es la estación principal de la línea ferroviaria, como por ejemplo: Plaza Constitución (para la línea Roca), Once de septiembre (para la línea Sarmiento) o Retiro (para las líneas Mitre y San Martín).

Existen vías de maniobra que pueden ser tanto ascendentes como descendentes. Estas vinculan, mediante un cambio de vías, una sección ascendente con otra descendente, en la cual los trenes deben circular a una velocidad reducida.

### 1.3.2. Semáforos ferroviarios

El sistema de enclavamientos utiliza los semáforos ferroviarios para indicarle al conductor del tren si puede o no acceder al próximo tramo de vías y a qué velocidad se le permite circular por medio del color del semáforo, denominado aspecto. A diferencia de los semáforos vehiculares donde cada color es alternado por otro color de la secuencia rojo-amarillo-verde en función del tiempo, los semáforos ferroviarios cambian su aspecto en función de los eventos de los tramos siguientes.

En la Figura 1.5 se presenta un esquema de señales de tres aspectos, que es el tipo de semáforo que se utiliza en la gran mayoría de las líneas ferroviarias.



"Peligro".  
Obligación  
de detener  
la formación

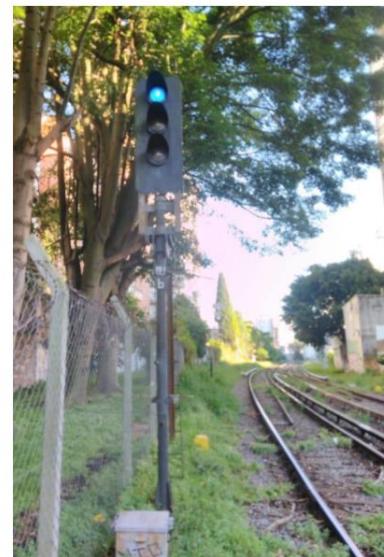


"Precaución". La  
próxima señal  
puede ser roja,  
velocidad menor a  
40 km/h



"Vía libre".  
Se autoriza a  
continuar la  
marcha hasta  
100 km/h

(a)



(b)

FIGURA 1.5: (a) Semáforo de 3 aspectos  
(b) Semáforo doble de 3 aspectos (Estación Olivos).

Otra diferencia fundamental es que no todos los semáforos ferroviarios poseen tres aspectos. Los semáforos de maniobras constan de solo dos aspectos: amarillo (precaución) y rojo (prohibido avanzar) y algunas líneas como la Línea Roca utilizan semáforos de cuatro aspectos.

En Figura 1.6 se visualizan Los semáforos de dos aspectos. Se utilizan en cambios de vías donde, por su peligrosidad, solo se podrían permitir aspectos rojos y amarillos.

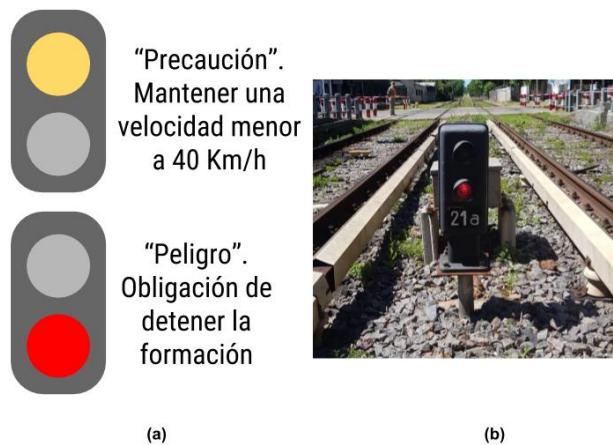


FIGURA 1.6: (a) Semáforo de 2 aspectos  
(b) Semáforos de cruce de vías (Estación Lavallol).

Los semáforos de cuatro aspectos son utilizados en la Línea Roca y poseen un doble amarillo antes del amarillo simple, para permitir así tramos de vías mas cortos en forma segura. Como no son objeto de estudio del presente trabajo, no serán explicados en esta memoria.

### 1.3.3. Circuito de vías

Para poder determinar si un tramo de la vía se encuentra ocupado o libre se utilizan los llamados circuitos de vías. Los mismos constituyen en componentes electrónicos que imponen una tensión conocida entre los rieles y cuando un tren se posiciona sobre esa sección provoca un cortocircuito que es detectado por el circuito. Se ejemplifica en la Figura 1.7, la ocupación de las secciones por una formación (modelada con un 0) y la ausencia de formación (modelada con un 1).

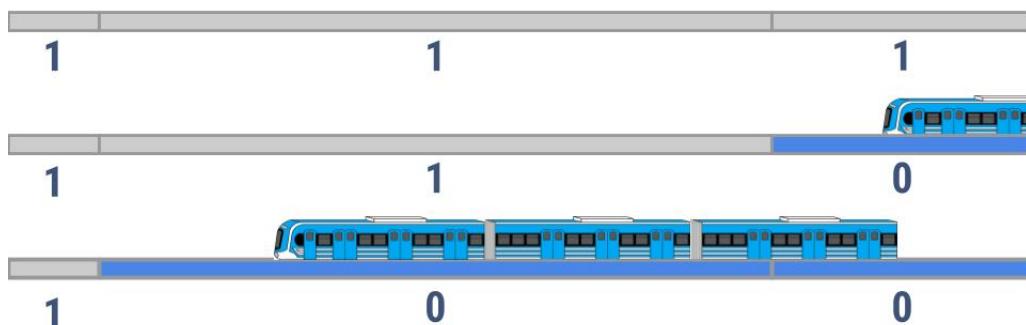


FIGURA 1.7: Ocupación de las secciones de vías.

Si el tramo de vía no tiene ninguna formación ocupándolo, el señalamiento indicará un aspecto verde o amarillo según el estado de ocupación del tramo siguiente. Si la formación ocupa la sección, el señalamiento cambiará su aspecto a rojo para indicar que no puede ingresar ninguna otra formación, a fin de evitar colisiones. Por seguridad también se establecerá a rojo el semáforo anterior y a amarillo el anterior a éste (doble recubrimiento), tal como se ilustra en la Figura 1.8.

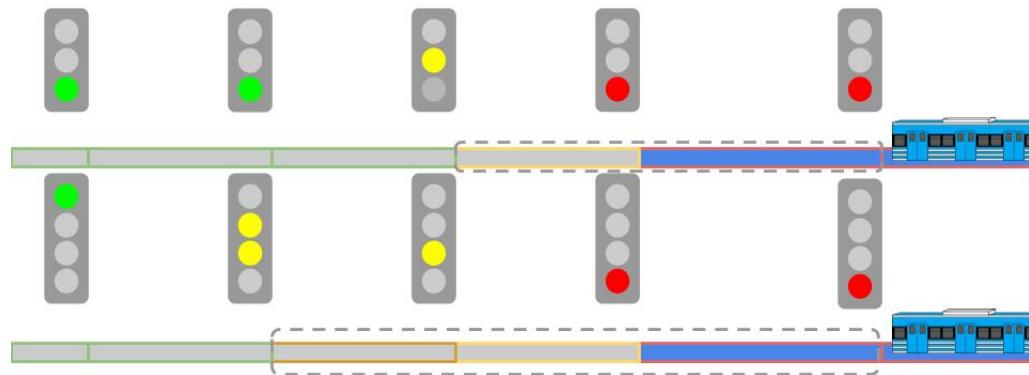


FIGURA 1.8: Estado de los aspectos ferroviarios según la ubicación del tren.

[Modificar](#)

Si la alimentación es interrumpida o si el cableado sufre alguna falla, entonces el sistema asumirá que hay un tren en las vías y los semáforos se pondrán en aspecto rojo para que las formaciones cercanas detengan su marcha y las barreras de los pasos a nivel desciendan. A este principio se le denomina fail-safe<sup>1</sup>. Es decir, si por alguna razón algo falla, el sistema adopta la condición más restrictiva, mitigando la posibilidad de una situación peligrosa.

#### 1.3.4. Pasos a nivel

La intersección de una ruta vehicular o peatonal con la vía férrea se denomina paso a nivel. El sistema de control de la barrera mantiene el brazo de la misma en alto para permitir la circulación vehicular, como se puede ver en la Figura 1.9. Si un tren ocupa las secciones amarillas de la Figura 1.9 se desenergiza la barrera y comienza a descender el brazo por efecto de la gravedad. Cuando se ocupen las secciones azules de la Figura 1.9 entonces se accionará la alarma sonora para alertar a los peatones que deben permanecer en el laberinto contiguo a la vía, cuya función es forzar a los peatones a mirar a ambos lados antes de cruzar el paso a nivel.

[Rehacer figura](#)

Solo cuando la barrera baja, el tren tiene permitido avanzar sobre el cruce, siendo el paso a nivel un sector de altísimo riesgo.

Al desocuparse las secciones amarillas, la barrera vuelve a energizarse y se sitúa en estado alto nuevamente, a la espera de otro tren para reiniciar el proceso descripto.

<sup>1</sup>fail-safe: Falla segura

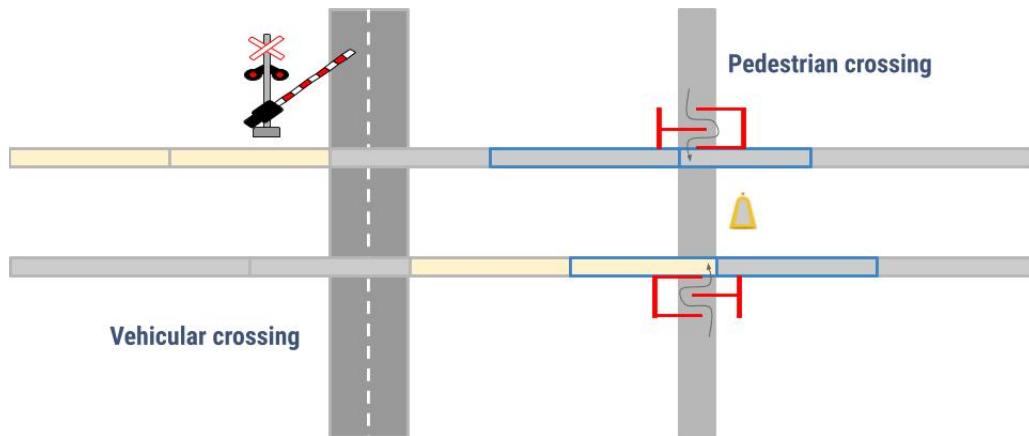


FIGURA 1.9: Pasos a nivel vehicular y peatonal sobre vía férrea.

Se debe destacar que el mismo proceso de descenso de la barrera ocurrirá si la misma se desenergiza por una falla eléctrica y/o pérdida de alimentación. Es decir, el sistema asumirá el estado mas seguro ante cualquiera de los mencionados fallos, siguiendo el principio de falla segura.

### 1.3.5. Máquina de cambios

Una máquina de cambios (Figura 1.10) es un mecanismo utilizado para permitir el paso de las formaciones de una vía a una ramificación del recorrido principal mediante el movimiento de la aguja del cambio (riel móvil) hacia su respectiva contraaguja (riel fijo) hasta obtener un adecuado acoplamiento que permita la circulación de la formación.



FIGURA 1.10: Máquina de cambios de Lavallol (Línea Roca).

En la Figura 1.11 se muestra el cambio de vía de la estación Matheu de la Línea Mitre. Se observa que según sea la posición del cambio el tren puede continuar en la misma vía o hacer el cambio a la otra vía.



FIGURA 1.11: Cambio de vías de estación Matheu (Línea Mitre).

En la Figura 1.12 se muestran las posiciones que puede adoptar el cambio. En la posición normal los trenes pueden circular de forma directa, en paralelo, por la vía principal en sentidos opuestos. En la posición reversa, en cambio, se permite el intercambio de trenes de una rama principal a otra en sentido opuesto o a una ramificación secundaria de la red.

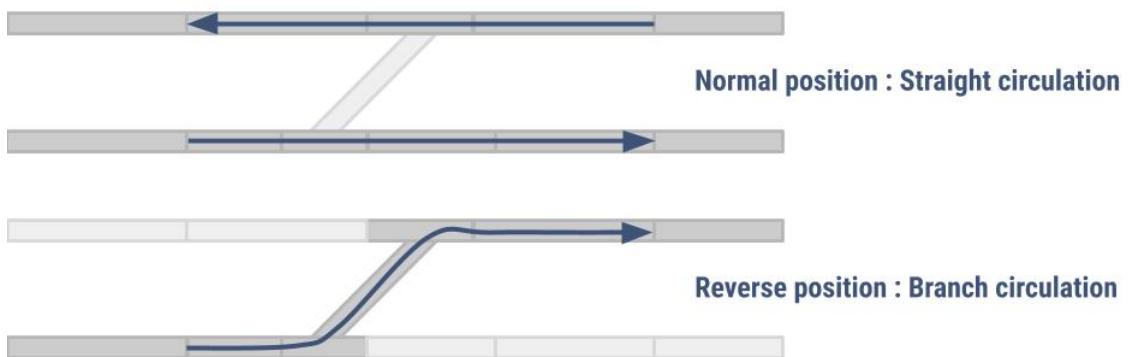


FIGURA 1.12: Posiciones normal e inversa del cambio.

## 1.4. Sistema de enclavamientos

A modo de ejemplo se ilustra en la Figura 2.1 un sistema de cambios en una vía simple con *bypass*. El mismo permite que dos formaciones puedan cruzarse en sentidos opuestos sin colisionar entre si.

[Rehacer figura](#)

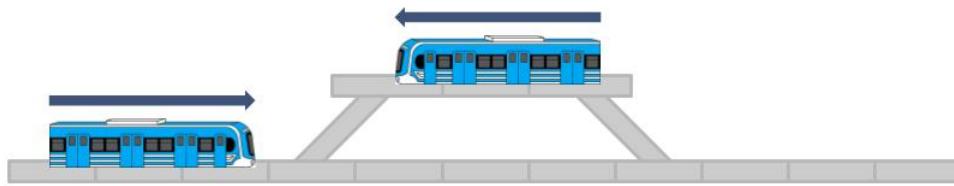


FIGURA 1.13: Vía simple con bypass

Para evitar la colisión se requiere un control seguro que evite que las formaciones avancen hacia secciones ya ocupadas por otras formaciones. También debe evitar que las formaciones avancen sobre los cambios cuando estos aún no han terminado de posicionarse en su lugar, provocando descarrillamientos. A este control se le denomina sistema de enclavamiento que impide que se produzcan las configuraciones no seguras y controla los semáforos que habilitan o no los itinerarios de las formaciones.

Una falla en un enclavamiento puede poner en peligro cientos de vidas humanas y generar gastos considerables. Por lo tanto, en el diseño del sistema de enclavamiento se deben cumplir estrictos parámetros de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS).

Lamentablemente los sistemas de enclavamientos en Argentina son en su mayoría mecánicos, de comienzos del siglo XX y otra cantidad considerable son electromecánicos con más de 40 años de antigüedad. Muchos de ellos ya han agotado su vida útil y deben ser reemplazados. Otros en cambio, han estado en desuso por años y se necesita su reposición pero solo una docena de empresas en el mundo realizan el diseño del sistema y los costos para un bypass simple rondan las decenas de millones de dólares. Por esto, es importante contar con sistemas electrónicos de diseño y fabricación nacional.

Adicionalmente, existen diferentes lugares donde aún resta instalar este tipo de sistemas, por lo que su implementación constituye una necesidad real para el desarrollo de la infraestructura ferroviaria de señalamiento en Argentina.

## 1.5. Tipos de enclavamientos

A continuación se presentan distintas tecnologías de implementación de enclavamientos en orden cronológico de invención.

### 1.5.1. Enclavamientos mecánicos

A comienzos del siglo XX se implementaron los sistemas de enclavamientos mediante soluciones mecánicas. Utilizaban palancas como las que se visualizan en la Figura 1.14 para comandar los cambios de vías y semáforos.

Una vez que se constituye una configuración de posiciones de palancas que habilitan un trayecto, las mismas quedan ‘enclavadas’ mecánicamente. Es decir, la posición de las mismas se bloquea y no es físicamente posible cambiarla. A medida que se van moviendo ciertas palancas las demás palancas que pudieran representar situaciones no seguras quedan enclavadas, y sólo se pueden mover aquellas



FIGURA 1.14: Sistema mecánico de enclavamiento en la antigua estación de Chascomús, hoy convertida en museo.

cuyo accionamiento representa una situación segura. De esa manera se garantiza que no se generarán configuraciones tales que las formaciones colisionen entre sí.

Las tecnologías más modernas heredaron el término 'enclavamiento', aún cuando ya no se tengan palancas enclavadas en posiciones fijas.

### 1.5.2. Enclavamientos electromecánicos

A mediados de siglo XX se desarrolló el sistema de enclavamiento electromecánico. Su funcionamiento se basa en relés (Figura 1.15) y circuitos de vía, de forma tal de poder detectar la presencia de un tren y comandar tanto las señales como las barreras de los pasos a nivel.



FIGURA 1.15: Bastidor de relés de estación Lavallol (Línea Roca)

Los sistemas de enclavamiento electromecánicos son comandados por un operario mediante un panel de control (Figura 1.16). El operario solicita al sistema de enclavamiento las rutas que el conductor ferroviario necesita para circular. El sistema permitirá solo la operación de cambio de vías seguras. En caso contrario, se tendrán las salidas 'enclavadas' y el sistema de enclavamiento impedirá mediante los semáforos el avance de la formación hasta que pueda realizarse el cambio en forma segura.



FIGURA 1.16: Panel de control enclavamientos - Central Lavallol.

### 1.5.3. Enclavamientos electrónicos

El sistema de enclavamiento moderno es electrónico y debe incluir redundancia de hardware para lograr niveles RAMS adecuados. Pueden utilizarse, por ejemplo, estrategias de *2 en 2* o sistemas de votación *2 de 3* como se ve en la Figura 1.17 para tener siempre una salida sin importar los fallos que puedan producirse [REDUNDANCIA]. La diversidad de plataformas de hardware (representados en diferente color en la Figura 1.17), por ejemplo utilizando diferentes proveedores de un mismo sistema o plataforma, es otra técnica muy utilizada.

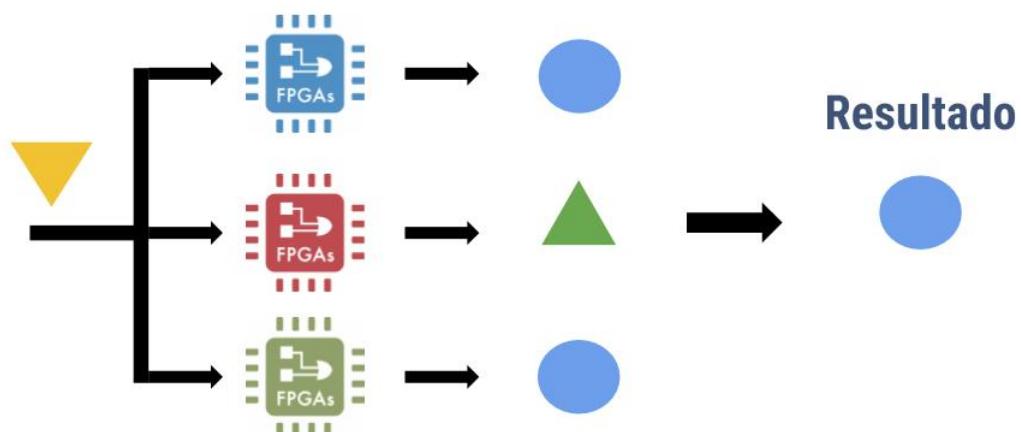


FIGURA 1.17: Redundancia por votación 2 de 3.

En este trabajo se implementó un sistema de enclavamiento electrónico, como se explicará en el Capítulo 3.

## **1.6. Objetivos**

El objetivo de este proyecto fue el diseño, implementación y realización de pruebas funcionales de un prototipo de sistema electrónico de enclavamiento, sobre un kit de desarrollo de FPGA.

Se procura además estudiar las tecnologías para implementar metodologías orientadas a mejorar los niveles RAMS del sistema, de acuerdo al estado del arte en sistemas ferroviarios altamente críticos.

Teniendo la experiencia acumulada del trabajo realizado en la Especialización de Sistemas Embebidos, se puso especial énfasis en la automatización del proceso, para poder satisfacer las necesidades de cualquiera sea la estación o zona elegida.



## Capítulo 2

# Introducción Específica

Es este capítulo se presentarán las topologías básicas del sistema ferroviario y los dos enfoques de resolución del proyecto, con sus ventajas y desventajas antes de abordar la implementación de la solución elegida.

### 2.1. Topologías típicas

El tendido ferroviario argentino dista de ser uniforme: en las zonas rurales predominan vías simples con bypass debido al alto costo de utilizar vías dobles, mientras que en las zonas urbanas son mayoría las estaciones y playas de maniobras a talleres de mantenimiento.

Es por eso que el trabajo realizado debe abocarse a muchos frentes y muy diversos unos de otros. La cantidad de elementos involucrados diverge conforme la complejidad de la topología se incrementa, pero los elementos y sus comportamientos no dejan de ser los mismos de los presentados en el Capítulo 1.

#### 2.1.1. Bypass

Para cubrir grandes distancias entre un punto estratégico como podría ser Vaca Muerta y un puerto para la exportación de los recursos es necesaria una línea ferroviaria con vagones de carga que puedan transportar el producto. Es obvio que es necesario un ida y vuelta entre trenes vacíos que van a ser llenados en el destino y trenes llenos que van a descargar al puerto la carga que lleven, pero el costo de utilizar dos vías en sentidos opuestos es muy elevado y utilizar solo un no tiene el menor sentido logístico.

Es por eso que se utiliza la topología de bypass cada cierta cantidad de kilómetros de vía simples para poder permitir que trenes en sentidos opuestos se crucen sin riesgo de colisión. Se presenta en la Figura 2.1 una representación de la topología bypass donde un tren que circula hacia la derecha por la vía principal podría entrar en colisión lateral con un tren que busca ingresar a la red desde una vía secundaria por medio del cambio de vías.

#### 2.1.2. Estación

Explicacion

#### 2.1.3. Hub

Explicacion

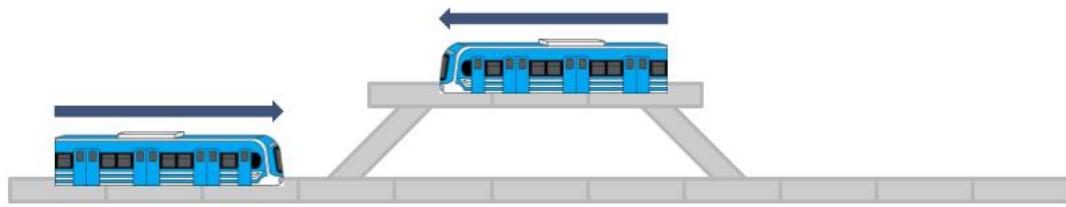


FIGURA 2.1: Topología bypass

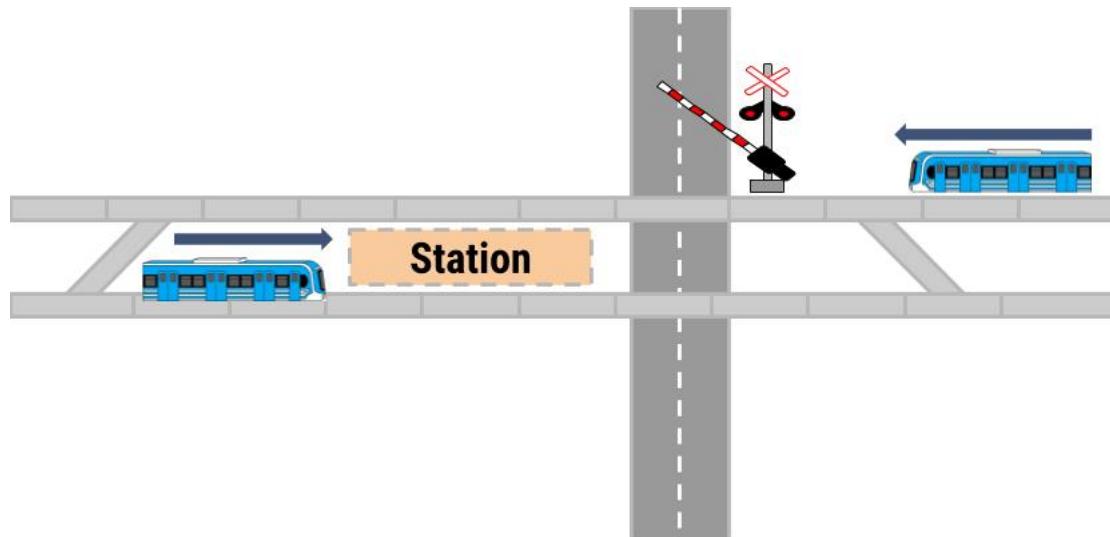


FIGURA 2.2: Topología estación

#### 2.1.4. Terminal

Explicacion

Explicacion

#### 2.2. Enfoque funcional

Explicacion

Explicacion

Explicacion

Explicacion

Explicacion

#### 2.3. Enfoque geográfico

Explicacion

Explicacion

Explicacion

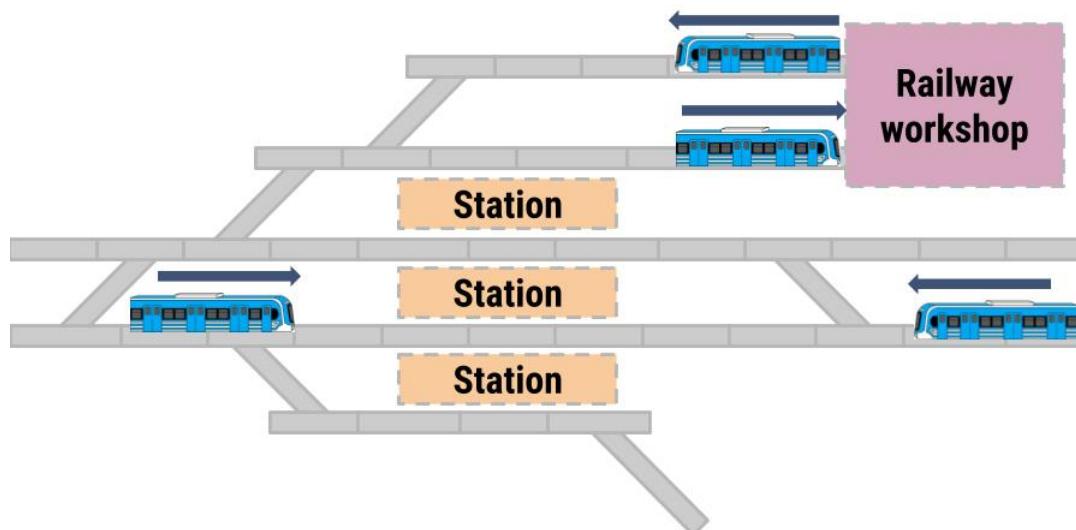


FIGURA 2.3: Topología hub

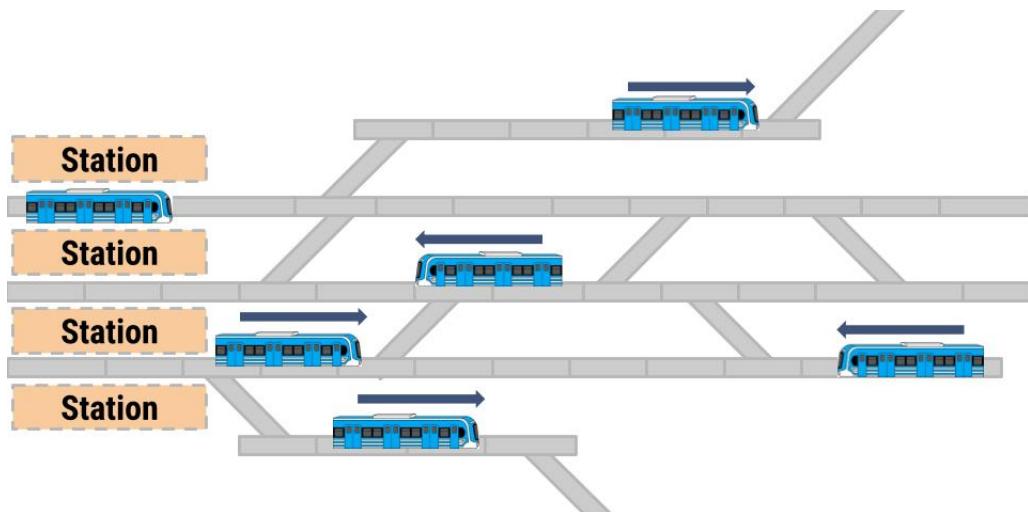


FIGURA 2.4: Topología terminal

Explicacion

Explicacion

Explicacion

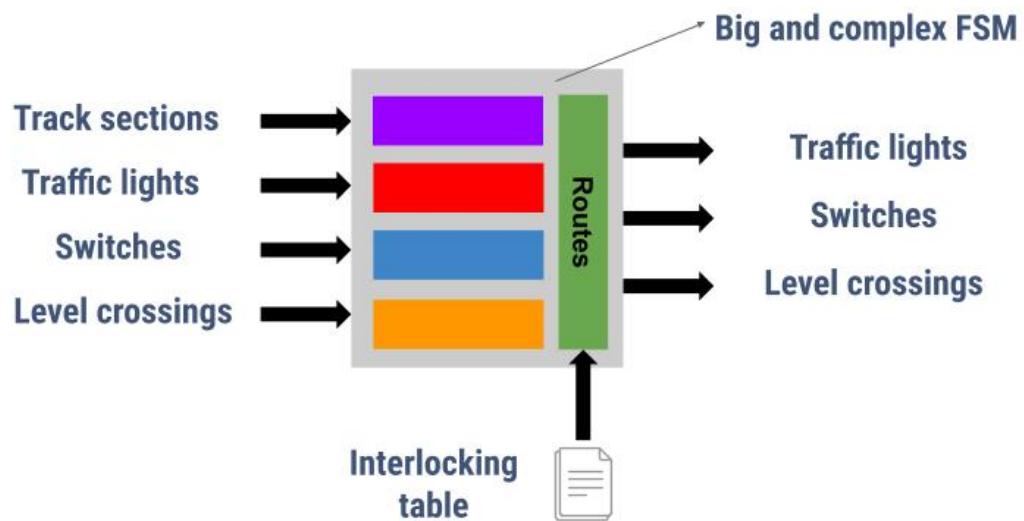


FIGURA 2.5: Enfoque funcional

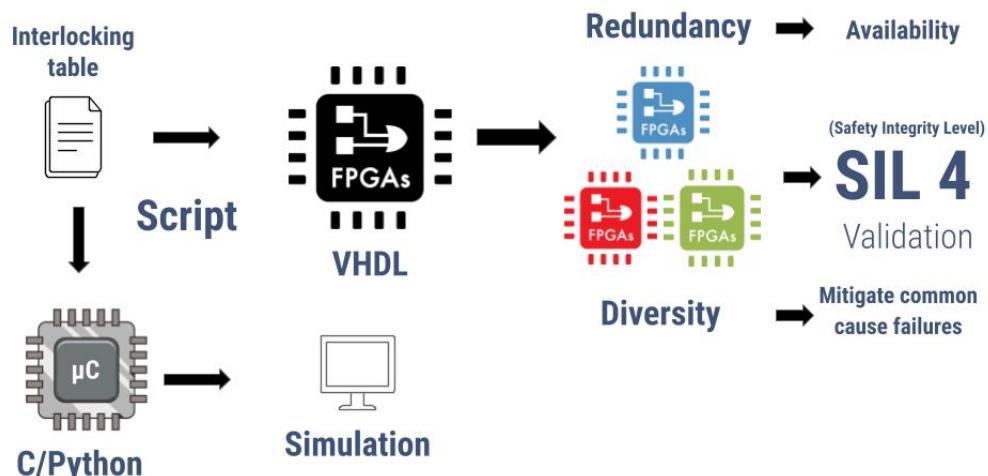


FIGURA 2.6: Esquema de trabajo en el enfoque funcional

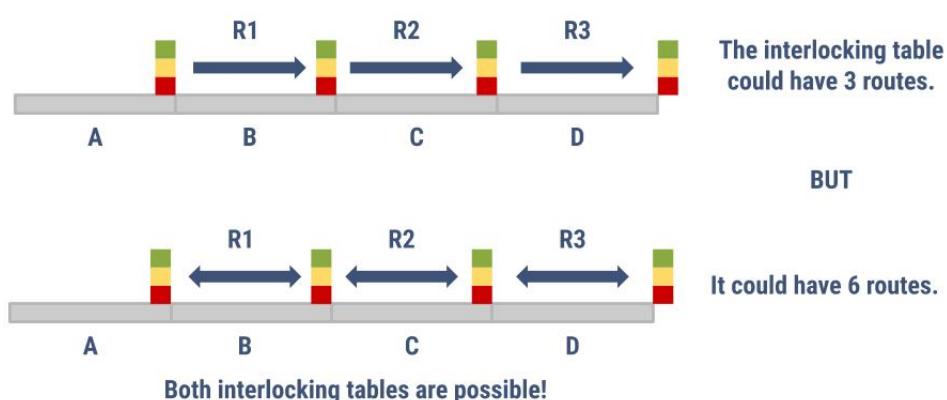


FIGURA 2.7: Ejemplo de elaboración de tabla de enclavamientos

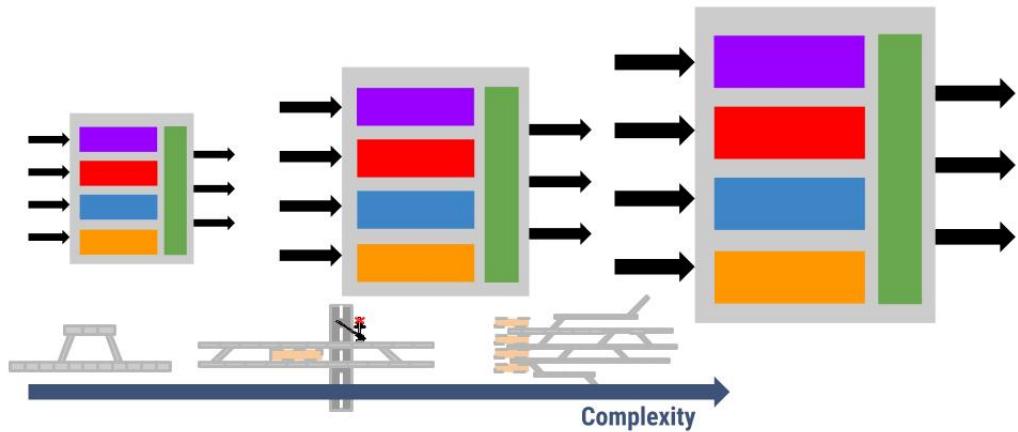


FIGURA 2.8: Escalabilidad del enfoque funcional

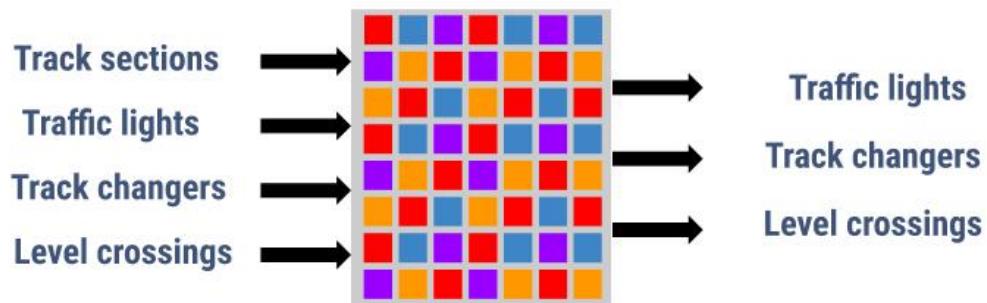


FIGURA 2.9: Enfoque geográfico

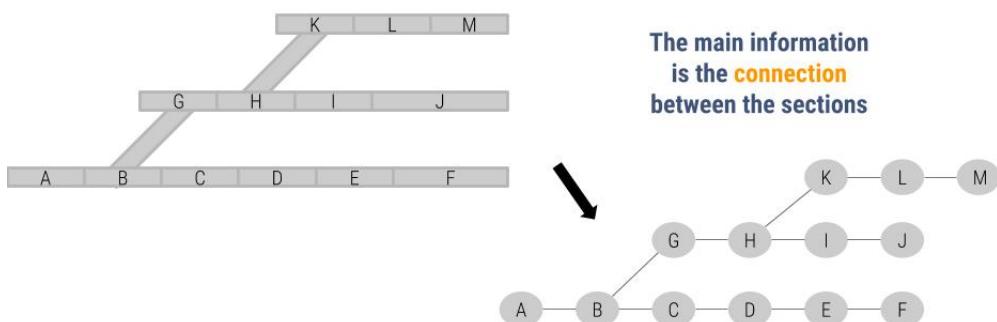


FIGURA 2.10: Pasaje de topología ferroviaria a grafo

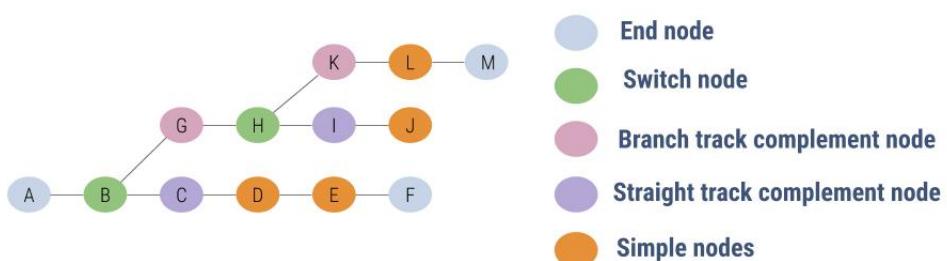


FIGURA 2.11: Análisis del grafo ferroviario

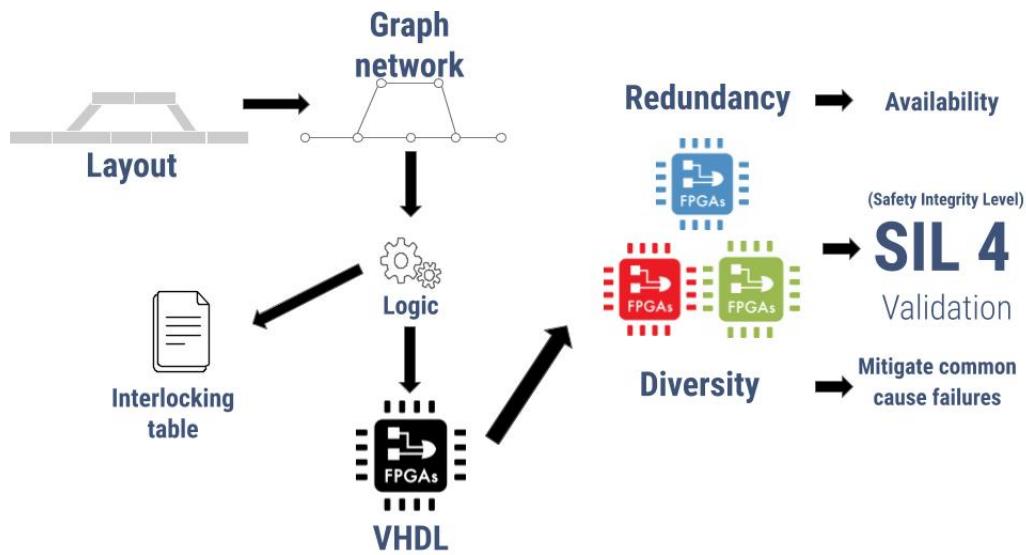


FIGURA 2.12: Esquema de trabajo en el enfoque geográfico

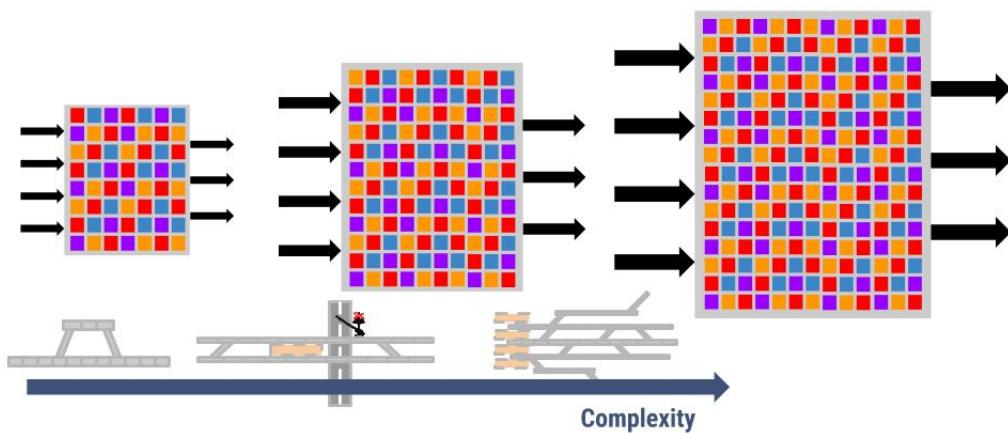


FIGURA 2.13: Escalabilidad del enfoque geográfico

## Capítulo 3

# Diseño e Implementación

### 3.1. Consideraciones generales

### 3.2. Generación automática

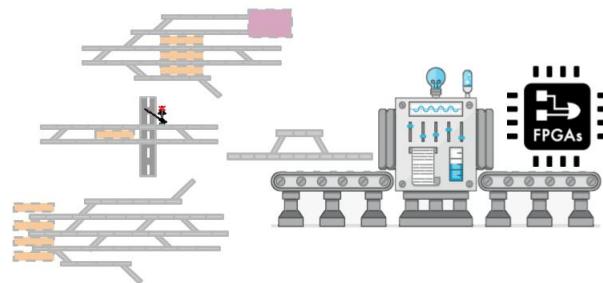


FIGURA 3.1: Generación automática del código VHDL

### 3.3. Módulo de nodos

FIGURA 3.2: HOLA

[Incluir figura](#)

### 3.4. Módulo de cambios

FIGURA 3.3: HOLA

[Incluir figura](#)

### 3.5. Módulo de red

[Incluir figura](#)

### 3.6. Módulos de adaptación a enclavamiento

Explicacion

#### 3.6.1. Módulo separador

Explicacion

Explicacion

FIGURA 3.4: HOLA

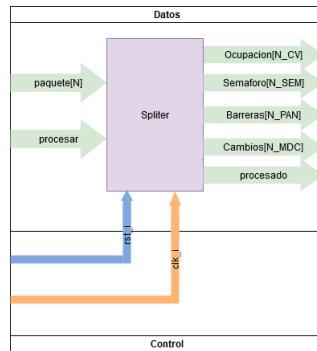


FIGURA 3.5: Diagrama de estados finitos digitales del módulo separador

### 3.6.2. Módulo mediador

Explicacion

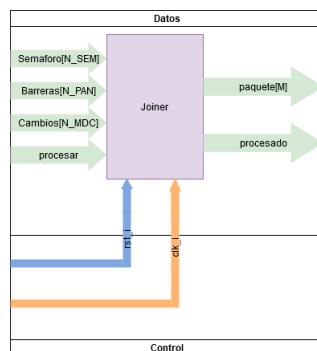


FIGURA 3.6: Diagrama de estados finitos digitales del módulo mediador

Explicacion

## 3.7. Módulos de procesamiento de tramas

Explicacion

### 3.7.1. Módulo detector

Explicacion

Explicacion

### 3.7.2. Módulo registro

Explicacion

Explicacion

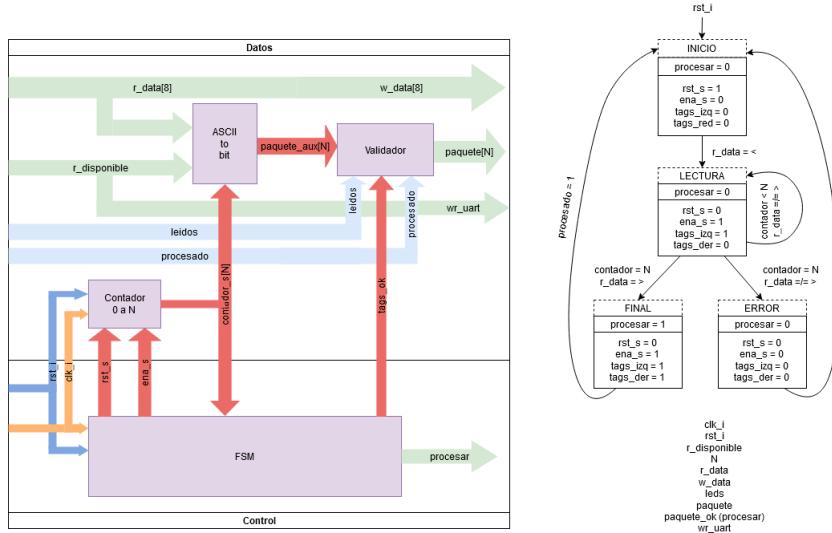


FIGURA 3.7: Diagrama de estados finitos digitales del módulo de detección

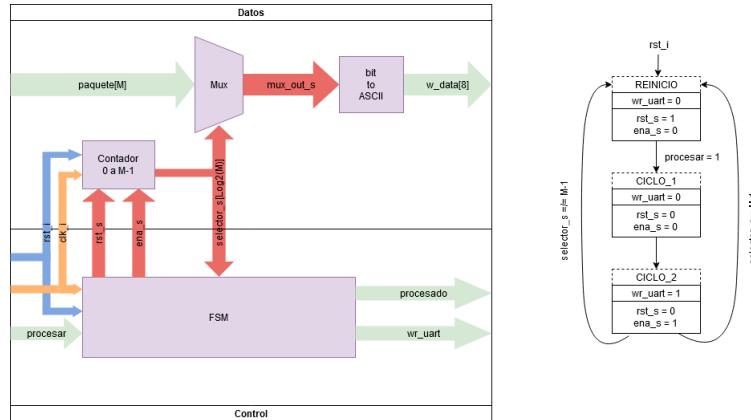


FIGURA 3.8: Diagrama de estados finitos digitales del módulo registro

### 3.7.3. Módulo selector

Explicacion

FIGURA 3.9: Diagrama de estados finitos digitales del módulo selector

Explicacion

## 3.8. Módulo de comunicación UART

[Incluir figura](#)

## 3.9. Interfaz de comunicación Python

[Incluir figura](#)

FIGURA 3.10: Diagrama de estados finitos digitales del módulo  
UART

FIGURA 3.11: HOLA

## Capítulo 4

# Ensayos y Resultados

### 4.1. Validación de grafos

FIGURA 4.1: HOLA

Incluir figura

### 4.2. Validación del nodo

FIGURA 4.2: HOLA

Incluir figura

### 4.3. Validación de la máquina de cambios

FIGURA 4.3: HOLA

Incluir figura

### 4.4. Validación de la red

Incluir figura

### 4.5. Validación de la UART

Incluir figura

### 4.6. Validación del sistema

Incluir figura

FIGURA 4.4: HOLA

FIGURA 4.5: HOLA

FIGURA 4.6: HOLA

## Capítulo 5

# Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas, los logros alcanzados y las dificultades encontradas. Además de un resumen de los elementos del proyecto que no se incluyeron en la memoria y se dejaron para la etapa de doctorado.

### 5.1. Resultados obtenidos

A lo largo de todo el proyecto se han visitado una gran cantidad de lugares claves del ámbito ferroviario (estaciones, talleres, oficinas, áreas de pruebas, etc), se ha conocido a decenas de profesionales del área que con sus diversos grados de conocimientos y experiencias en el área han sabido aportar cada uno su pieza para éste rompecabezas, que sumado al conocimiento adquirido a lo largo de tanto la Especialización como la Maestría en Sistemas Embebidos se construyó con el esfuerzo propio y la ayuda de los integrantes del CONICET-GICSAFe.

El proyecto inicialmente comenzó como una idea abstracta y ambiciosa que fue evolucionando y adquiriendo mayor definición conforme avanzaban las entrevistas con los diversos actores que en el día a día comandan las instalaciones ferroviarias. Al ir investigando, se iban encontrando nuevas ramificaciones para el proyecto y nuevos enfoques para abordarlo, lo cual elevó su complejidad a tal punto de calificar para una beca de doctorado que iniciará el corriente año.

Durante la especialización, los cambios de metas y alcances fueron una constante, al igual que los cambios de locación. Por lo tanto el haber encarado el la segunda etapa del proyecto en la maestría con un enfoque general, en vistas de automatizar la totalidad del proceso, fue un enorme esfuerzo extra que no estaba contemplado pero cuya necesidad surgió del contexto adverso en el que se desarrolló el sistema. Al final del trabajo todos esas horas dedicadas a la automatización tuvieron su impacto en cada una de las demás aristas del proyecto.

Los conocimientos en el área de las FPGAs sirvieron enormemente para materializar los diseños planteados, aunque fueron necesarias muchas horas de ensayos y práctica hasta tener no solo un sistema seguro y funcional, sino también uno escalable al automatizar la generación del código.

El haber trabajado en conjunto en otros proyectos de CONICET-GICSAFe a la par del desarrollo del sistema de enclavamientos permitió tomar conciencia de la importancia real del mismo como sistema crítico y abre las puertas a una tercera etapa próxima a iniciarse durante el 2020 en el Doctorado en Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Partiendo de una base sólida de conocimientos, vínculos humanos y profesionales, con expectativas mucho mas altas, pero con

la confianza y el respaldo que otorgan los avances concretados en esta etapa del proyecto que llega a su fin.

En el transcurso del proyecto se han alcanzado los siguientes logros:

- Diseño e implementación de un algoritmo analizador de redes ferroviarias. Por lo que pueden analizarse la mayoría de las topologías de las redes ferroviarias argentinas.
- Diseño e implementación de un generador de código en VHDL basado en un grafo ferroviario. Por lo que pueden implementarse enclavamientos electrónicos de cualquiera sea la locación.
- Diseño e implementación de un generador de tramas de prueba para comandar la plataforma FPGA desde Python. Facilitando el testeo de los sistemas generados.
- Publicación de artículos en IEEE Latin America y el Congreso Argentino de Sistemas Embebidos 2019.
- Beca de doctorado en desarrollo estratégico de CONICET 2020-2025.
- Desarrollo del primer sistema ferroviario crítico en el marco del CONICET-GICSAFe.

## 5.2. Próximos pasos

La planificación del proyecto contempló desde un inicio que sería un trabajo de dos años a ser realizado en conjunto entre la Especialización y la Maestría de Sistemas Embebidos. Pero el mencionado incremento en la complejidad del sistema abrió las puertas a continuar el proyecto durante el doctorado. Por lo tanto se mencionan a continuación los pasos a seguir para el próximo tramo del proyecto.

- Optimización del analizador de grafos ferroviarios.
- Integración con la interfaz gráfica desarrollada en UTN-Haedo.
- Realización de pruebas en paralelo con la estación Olivos, gracias al desarrollo del sistema modular del Mg. Ing. Lucas Dórdolo.
- Culminación del generador de test para COCOTB.
- Culminación del generador de tablas de enclavamiento.
- Corrección del funcionamiento de las barreras.
- Elaboración de un análisis formal del sistema de enclavamientos para redes ferroviarias arbitrarias.
- Aplicación de técnicas de redundancia por votación para aumentar la seguridad del sistema.
- Obtención de los parámetros RAMS alcanzados para obtener el grado SIL necesario.