



FACULTAD DE INGENIERIA

Universidad de Buenos Aires

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-FRH)

Jurados:

Mg. Ing. Nicolás Dassieu Blanchet (FIUBA)

Esp. Ing. Pedro Martos (FIUBA)

Ing. Nicolás Álvarez (UNSAM, FIUBA)

*Este trabajo fue realizado en la 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 de enclavamiento electrónico. Se trata de 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 de 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, aprendidos durante la Maestría.

Agradecimientos

Los agradecimientos son muy similares a los que escribí en mi memoria del Trabajo Final de la Especialización en Sistemas Embebidos, ya que las personas que me han acompañado para realizar este Trabajo Final de la Maestría son prácticamente las mismas.

Quisiera agradecer a mi familia, que siempre me ha 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 aparatos técnicos del mundo de las FPGA's y su dedicación al proyecto fue crucial cuando se requería una experiencia que me excedía.

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

Índice general

Resumen	III
1. Introducción General	1
1.1. Contexto y motivación	1
1.2. Propuesta de solución	2
1.3. Elementos del señalamiento ferroviario	6
1.3.1. Vías	6
1.3.2. Semáforos ferroviarios	6
1.3.3. Circuito de vías	8
1.3.4. Pasos a nivel	9
1.3.5. Máquina de cambios	9
1.4. Sistema de enclavamientos	11
1.5. Tipos de enclavamientos	12
1.5.1. Enclavamientos mecánicos	12
1.5.2. Enclavamientos electromecánicos	12
1.5.3. Enclavamientos electrónicos	13
1.6. Objetivos	14
2. Introducción Específica	15
2.1. Topologías típicas	15
2.1.1. Bypass	15
2.1.2. Estación	16
2.1.3. Hub	16
2.1.4. Terminal	17
2.2. Estrategias de resolución	18
2.3. Enfoque funcional	18
2.3.1. Tabla de enclavamientos	18
2.3.2. Modelo del sistema	20
2.3.3. Flujo de trabajo	21
2.3.4. Escalabilidad de la estrategia	21
2.4. Enfoque geográfico	22
2.4.1. Análisis de grafos	23
2.4.2. Flujo de trabajo	24
2.4.3. Escalabilidad de la estrategia	25
2.5. Consideraciones generales	26
2.6. Plataforma utilizada	27
3. Diseño e Implementación	29
3.1. Analizador de redes ferroviarias	29
3.2. Arquitectura de la solución propuesta	31
3.3. Módulo de nodos	33
3.4. Módulo de la máquina de cambios	34
3.5. Módulo de comunicación UART	35

3.6.	Módulos de procesamiento de tramas	36
3.6.1.	Módulo detector	36
3.6.2.	Módulo registro	38
3.6.3.	Módulo selector	39
3.7.	Módulos de adaptación a enclavamiento	40
3.7.1.	Módulo separador	41
3.7.2.	Módulo mediador	42
3.8.	Interfaz de comunicación Python	43
4.	Ensayos y Resultados	45
4.1.	Verificación del análisis automático de redes ferroviarias	45
4.2.	Verificación de la implementación del nodo	47
4.2.1.	Testbench del módulo nodo	47
4.2.2.	Resultados obtenidos	47
4.3.	Verificación de la implementación de la máquina de cambios	48
4.3.1.	Testbench del módulo de la máquina de cambios	48
4.3.2.	Resultados obtenidos	49
4.4.	Verificación de la implementación de la UART	49
4.4.1.	Testbench del módulo UART	49
4.4.2.	Resultados obtenidos	49
4.5.	Verificación de la implementación del detector	50
4.5.1.	Testbench del módulo detector	50
4.5.2.	Resultados obtenidos	51
4.6.	Verificación de la implementación del enclavamiento	51
4.6.1.	Testbench del módulo enclavamiento	51
4.6.2.	Resultados obtenidos	51
4.7.	Verificación de la implementación del registro	52
4.7.1.	Testbench del módulo registro	52
4.7.2.	Resultados obtenidos	53
4.8.	Verificación de la implementación del selector	53
4.8.1.	Testbench del módulo selector	53
4.8.2.	Resultados obtenidos	53
4.9.	Prueba de integración: topología bypass	54
5.	Conclusiones	59
5.1.	Resultados obtenidos	59
5.2.	Próximos pasos	60
Bibliografía		61

Índice de figuras

1.1. Ejemplo de implementación de Belgrano R.	3
1.2. Proceso de generación automática de la solución electrónica.	3
1.3. Analizador de redes ferroviarias desarrollado en Python.	4
1.4. Archivos VHDL generados por el analizador de redes ferroviarias.	4
1.5. Ejemplos de algunas topologías luego de ser procesadas por el sistema desarrollado.	5
1.6. Esquemático generado por el analizador de redes ferroviarias.	5
1.7. Tramo de vía ferroviaria.	6
1.8. (a) Semáforo de tres aspectos (b) Semáforo doble de tres aspectos (Estación Olivos).	7
1.9. (a) Semáforo de dos aspectos (b) Semáforos de cruce de vías (Estación Lavallol).	7
1.10. Ocupación de las secciones de vías.	8
1.11. Estado de los aspectos ferroviarios según la ubicación del tren.	8
1.12. Pasos a nivel vehicular y peatonal sobre vía férrea.	9
1.13. Máquina de cambios de Lavallol (Línea Roca).	10
1.14. Cambio de vías de estación Matheu (Línea Mitre).	10
1.15. Posiciones normal e inversa del cambio.	11
1.16. Vía simple con <i>bypass</i>	11
1.17. Sistema enclavamiento mecánico en la estación de Chascomús, hoy convertida en museo.	12
1.18. Bastidor de relés de estación Lavallol (Línea Roca).	13
1.19. Panel de control enclavamientos - Central Lavallol.	13
1.20. Redundancia por votación 2 de 3.	14
 2.1. Topología bypass.	16
2.2. Topología estación con andén único.	16
2.3. Topología hub.	17
2.4. Topología terminal.	17
2.5. Ejemplo de elaboración de las rutas.	19
2.6. Enfoque funcional.	20
2.7. Esquema de trabajo en el enfoque funcional.	21
2.8. Escalabilidad del enfoque funcional.	22
2.9. Enfoque geográfico.	23
2.10. Pasaje de topología ferroviaria a grafo.	23
2.11. Análisis del grafo ferroviario.	24
2.12. Esquema de trabajo en el enfoque geográfico.	24
2.13. Escalabilidad del enfoque geográfico.	25
2.14. Diagrama en bloques genérico de una FSMD	26
2.15. FPGA Arty Z7-10 de Digilent	27
 3.1. Grafo antes de ser analizado por el algoritmo	30
3.2. Grafo luego de ser analizado por el algoritmo	30

3.3.	Diagrama de conexión del sistema a la computadora.	31
3.4.	Diagrama general del sistema.	32
3.5.	Diagrama en bloques del módulo de nodo genérico	33
3.6.	Conexión del módulo de la máquina de cambios	34
3.7.	Diagrama en bloques del módulo de máquina de cambios	35
3.8.	Diagrama en bloques de la UART	36
3.9.	FSMD del módulo detector	37
3.10.	Estados del módulo detector	38
3.11.	FSMD del módulo registro	38
3.12.	Estados del módulo registro	39
3.13.	Diagrama de bloques del módulo selector	40
3.14.	Diagrama de bloques del módulo separador	42
3.15.	Diagrama de bloques del módulo mediador	42
3.16.	Menú de opciones para comunicarse con el sistema-	43
3.17.	Grafo modificado en tiempo real por la FPGA.	43
4.1.	Topología aleatoria generada para probar el análisis automático de redes ferroviarias.	45
4.2.	Simulación de un nodo.	48
4.3.	Simulación de la máquina de cambios.	49
4.4.	Simulación de la UART.	50
4.5.	Simulación del detector.	51
4.6.	Simulación del separador.	52
4.7.	Simulación del enclavamiento.	52
4.8.	Simulación del mediador.	52
4.9.	Simulación del registro.	53
4.10.	Simulación del selector.	54
4.11.	Topología bypass sin procesar.	54
4.12.	Topología bypass procesada.	54
4.13.	Archivos .VHDL generados.	55
4.14.	Módulo de red generador.	56
4.15.	Bypass con circulación inversa y nodo 10 ocupado.	57

Índice de Tablas

2.1.	Tabla de enclavamientos (izquierda a derecha)	19
2.2.	Tabla de enclavamientos (derecha a izquierda)	19
2.3.	Tabla de enclavamientos (caso bidireccional)	19
3.1.	Convención para elementos ferroviarios I	40
3.2.	Convención para elementos ferroviarios II	41
3.3.	Trama de entrada [N]	41
3.4.	Trama de salida [M]	41
4.1.	Tabla de enclavamientos generada automáticamente	46
4.2.	Tabla de enclavamientos construida manualmente	46
4.3.	Combinaciones posibles	47
4.4.	Combinaciones posibles	48
4.5.	Tabla de enclavamientos de la topología bypass.	55

"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, las distintas tecnologías de los sistemas de enclavamientos y los objetivos a cumplir.

1.1. Contexto y motivación

Mientras que otras naciones han progresado en la migración de sus sistemas de transporte de cargas y pasajeros añadiendo electrónica de última generación, Argentina en muchos casos continúa utilizando mecanismos diseñados a principios o mediados del siglo XX [1, 2]. Esto repercute negativamente en la seguridad que dichos sistemas pueden brindar a los pasajeros, conductores, peatones y automovilistas.

A la vez, ocurre que los sistemas electrónicos para la seguridad vial de trenes y subtes son importados y muy costosos, además de constituir un oligopolio conformado por menos de una 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 [3] y se requieren varias decenas de estos sistemas sólo para la zona urbana de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Las empresas que fabrican sistemas de enclavamiento [4-13] brindan muy poca información técnica sobre sus desarrollos y la mayoría de las herramientas que utilizan son de uso privado de cada empresa. No obstante, deben regirse bajo normativas como las que la Unión Europea ha establecido desde 2004. Las tres normas principales son EN-50126 [14] (ciclo de vida), EN-50128 [15] (técnicas de software) y EN-50129 [16] (técnicas de hardware).

Los sistemas de enclavamiento son sistemas críticos. Esto implica que 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 creó el CONICET-GICSAFe [17], 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. El grupo desarrolla sistemas electrónicos e informáticos para aplicaciones ferroviarias relacionadas con la seguridad, a partir de la generación de 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 [18], 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 obtuvo la totalidad de las fotografías incluidas en esta memoria.

El desarrollo del sistema involucra muchas áreas distintas: 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. La amplia variedad de topologías existentes obligó a abandonar la metodología de desarrollo ad hoc de cada sistema y fue necesario abordar el diseño de forma general, para topologías genéricas, lo que adiciona aún más trabajo al 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 cualquier ubicación, 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 de 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 brindaron a GICSAFe desde fines del año pasado a la fecha.

1.2. Propuesta de solución

En el marco de la Especialización de Sistemas Embebidos se implementó en 2018 el diseño de un sistema de enclavamiento para la estación Belgrano R de la Línea Mitre. En la Figura 1.1 se muestran los principales elementos de esa estación: un cambio de vías, un paso a nivel para vehículos, dos pasos a nivel para peatones y once señales ferroviarias.

La implementación se hacía de forma ad hoc, diseñar los ensayos demoraba días o semanas y era necesario revisar varias veces las pocas especificaciones que se tenían para corroborar un correcto funcionamiento del sistema.

El desarrollo a medida de la estación Belgrano R permitió afianzar muchos conceptos del mundo ferroviario sobre cómo se comportaban sus diversos componentes y como interactuaban a nivel general. No obstante, de querer replicar el

desarrollo en otras locaciones, aún con mínimas diferencias con Belgrano R, hubiese implicado rehacer por completo todo el proceso: análisis, diseño, testing, etc.

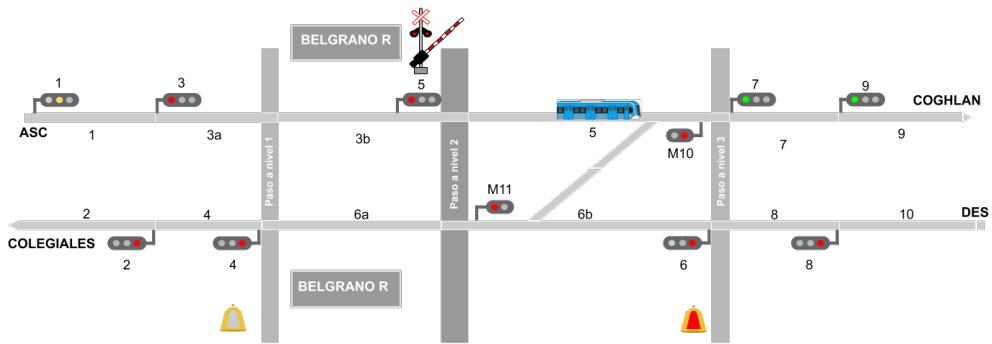


FIGURA 1.1: Ejemplo de implementación de Belgrano R.

A partir de esta experiencia se concluyó que es muy importante diseñar e implementar un método de trabajo que brinde reusabilidad, y que también sea escalable, de modo que se pueda aplicar en topologías más grandes y complejas. El método de trabajo a desarrollar debe ser tal que minimice la probabilidad y severidad de fallas humanas en el proceso de diseño y revisión.

Es por eso que, en el marco de la Maestría en Sistemas Embebidos, se marcó como un objetivo central 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 1.2 se muestra una imagen ilustrativa del proceso propuesto, en el que diversas topologías son procesadas e implementadas en forma automática en una plataforma FPGA.

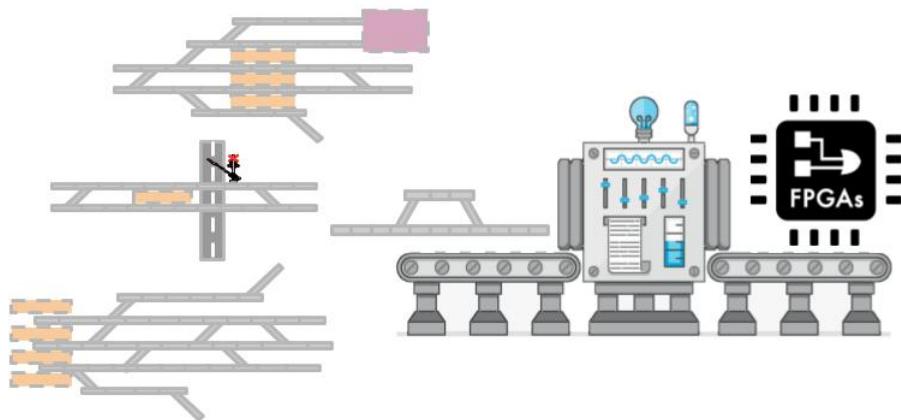


FIGURA 1.2: Proceso de generación automática de la solución electrónica.

De esta manera, la solución desarrollada parte de cualquier red ferroviaria (figura 1.3), y mediante un analizador de redes ferroviarias, diseñado e implementado en el marco de este trabajo, determina qué función cumplirá cada elemento de la red y cuántos semáforos, de cuántos aspectos, en qué orientación y en qué ubicación deben utilizarse para que el sistema sea seguro.

```

528     def generar_mapa(tabla, iniciar = True):
529         v = 0.5
530
531         print("@*25* Analizador de grafos v"+str(v)+" *+@*25*\n")
532
533         for i in range(len(archivos)):
534             secciones.clear()
535             conexiones.clear()
536
537             ax = plt.gca()
538             ax.cla() # clear things for fresh plot
539
540             print("%*25* Mapa_"+str(i)+" "+%*25)
541
542             cargar_secciones(archivos[i][0],archivos[i][1])
543
544             axis = [[-0.5,10.5],[-2.5,.5]]
545
546             axis = calcular_ejes(secciones)
547
548             #print(axis)
549
550
551             adj = .75
552             ax.set_xlim((axis[0][0]-3*r, axis[0][1]+3*r))
553             ax.set ylim((axis[1][0]-adj, axis[1][1]+adj))
554
555             if axis[0][1] > 7:
556                 ajuste = 4
557             else:
558                 ajuste = 3
559
560             buscar_vecinos()
561             clasificar_vecinos()
562             asignar_tipo()
563             cambios_herencia()
564             asignar_semaforos()
565             #imprimir_estados()
566
567             mostrar_grafo(secciones,i,gif_mode = False)
568             #ultimo_semaforo(secciones)
569             detectar_rutas(secciones)
570             #dibujar_barreira([5,5,1, b = 1, h = 3, c = [0.85,0.85,0.85]])
571
572

```

FIGURA 1.3: Analizador de redes ferroviarias desarrollado en Python.

A continuación, en base a los semáforos insertados el analizador calcula todas las rutas posibles que admite esa red y genera automáticamente la solución electrónica para ser implementada mediante una FPGA. Puede verse en la figura 1.4 un ejemplo de los archivos .vhdl generados automáticamente producto del análisis de una determinada red ferroviaria.

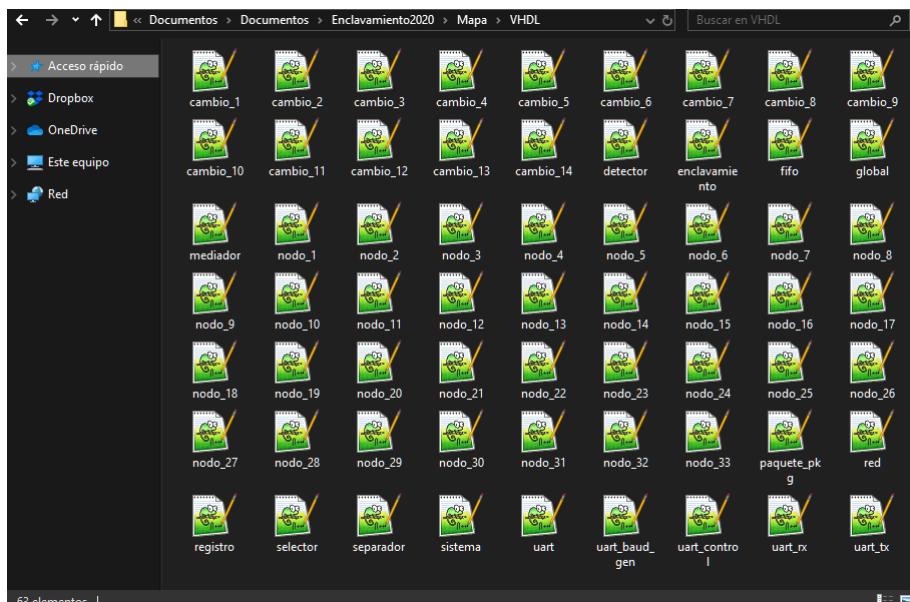


FIGURA 1.4: Archivos VHDL generados por el analizador de redes ferroviarias.

De esta forma el sistema desarrollado puede procesar en cuestión de minutos decenas de topologías ferroviarias y generar las correspondientes implementaciones de la solución electrónica. Esto se ilustra en la figura 1.5.

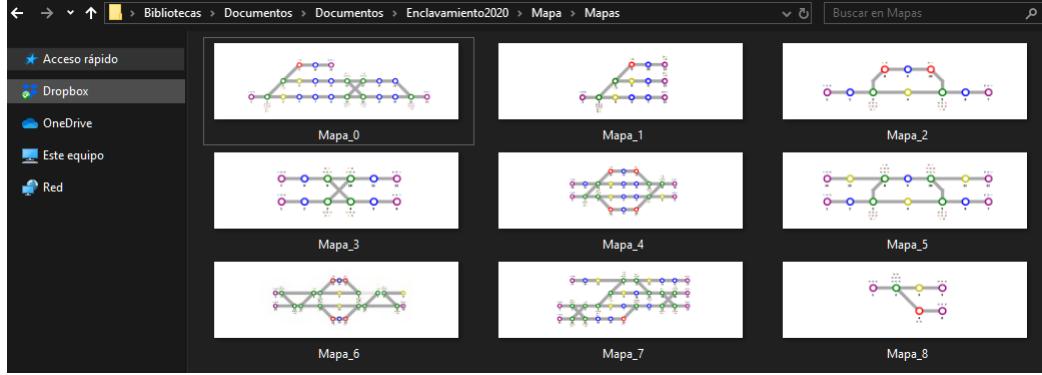


FIGURA 1.5: Ejemplos de algunas topologías luego de ser procesadas por el sistema desarrollado.

En la figura 1.6 se muestra a modo de ejemplo la solución electrónica lista para ser implementada en una FPGA que corresponde a los archivos .vhdl ilustrados en la figura 1.4.

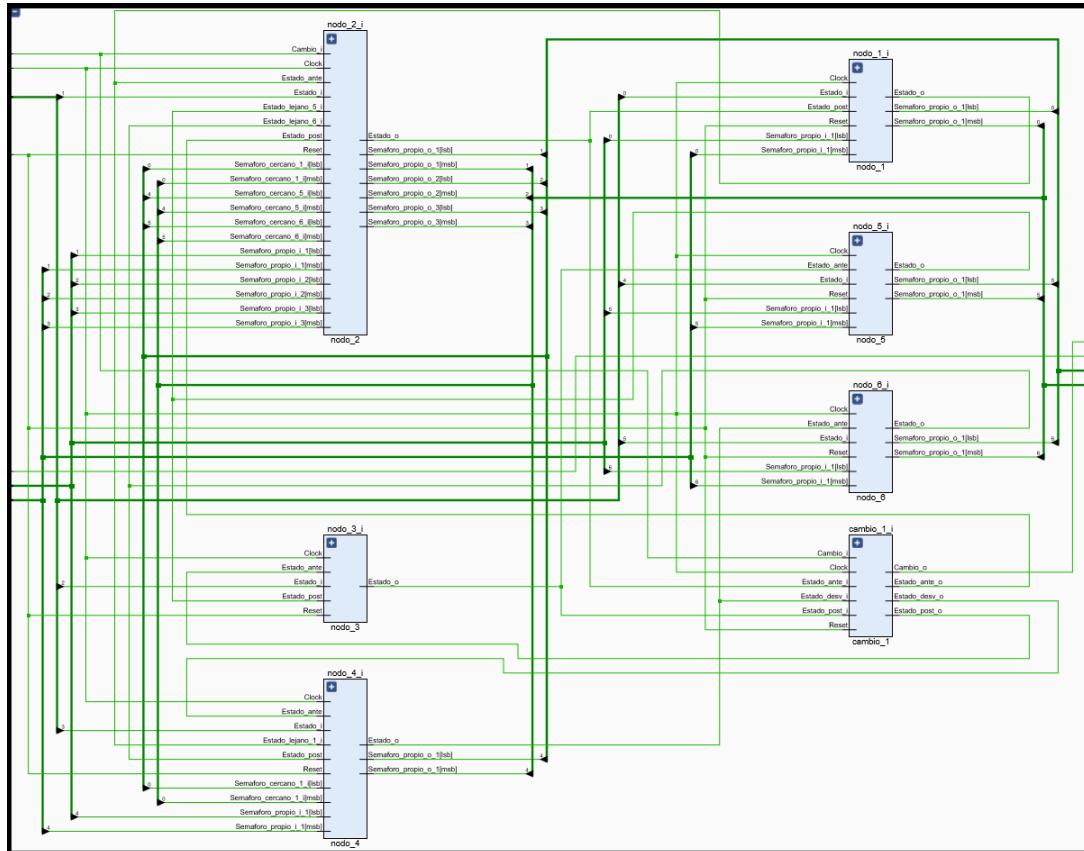


FIGURA 1.6: Esquemático generado por el analizador de redes ferroviarias.

Para poder entender mejor el funcionamiento del sistema desarrollado es necesario introducir conceptos propios del mundo ferroviario y sus componentes involucrados. Estos se describen en la siguiente sección.

1.3. Elementos del señalamiento ferroviario

En este trabajo se reutilizan las mismas definiciones de los elementos ferroviarios presentadas en la memoria del Trabajo Final de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos, ya que son las definiciones mas precisas que este autor pudo elaborar y el paso del tiempo no ha modificado su validez.

La función del señalamiento ferroviario es evitar las colisiones entre trenes y los descarrilamientos. A continuación se describen los diferentes elementos que componen el señalamiento y que fueron modelados durante este trabajo.

1.3.1. Vías

Las vías férreas (figura 1.7) consisten en el elemento esencial de la infraestructura ferroviaria y conforman el sitio por el cual se desplazan los trenes. Se encuentran separadas por una distancia fija que se mide desde sus caras internas y se denomina trocha.



FIGURA 1.7: Tramo de vía ferroviaria.

Las vías se dividen en secciones y por seguridad se establece que cada sección puede contener solo una formación por vez. Las mismas pueden tener largos variables en zonas urbanas de entre 500 a 1000 metros en zonas rurales.

Cada vía puede ser clasificada en dos grupos: vías ascendentes o vías 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 las que los trenes circulan únicamente en la dirección del kilometraje en sentido decreciente [19]. 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; esto, por medio del color del semáforo, denominado

aspecto. A diferencia de los semáforos vehiculares, en los que cada color es alternado por otro 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 1.8 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.



FIGURA 1.8: (a) Semáforo de tres aspectos
(b) Semáforo doble de tres aspectos (Estación Olivos).

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

En la figura 1.9 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 1.9: (a) Semáforo de dos 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 aquí.

1.3.3. Circuito de vías

Para poder determinar si un tramo de la vía se encuentra ocupado o libre se utilizan los circuitos de vías. Estos constituyen 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. En la figura 1.10 se ejemplifica la ocupación de las secciones por una formación (modelada con un 0) y la ausencia de formación (modelada con un 1).

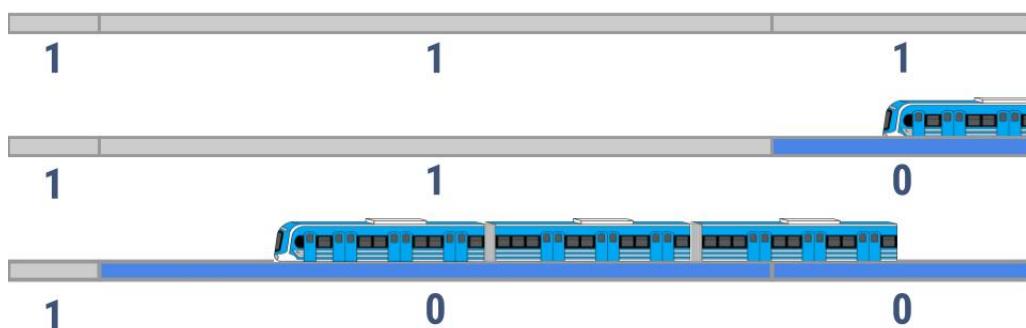


FIGURA 1.10: Ocupación de las secciones de vías.

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 este (doble recubrimiento), tal como se ilustra en la figura 1.11.

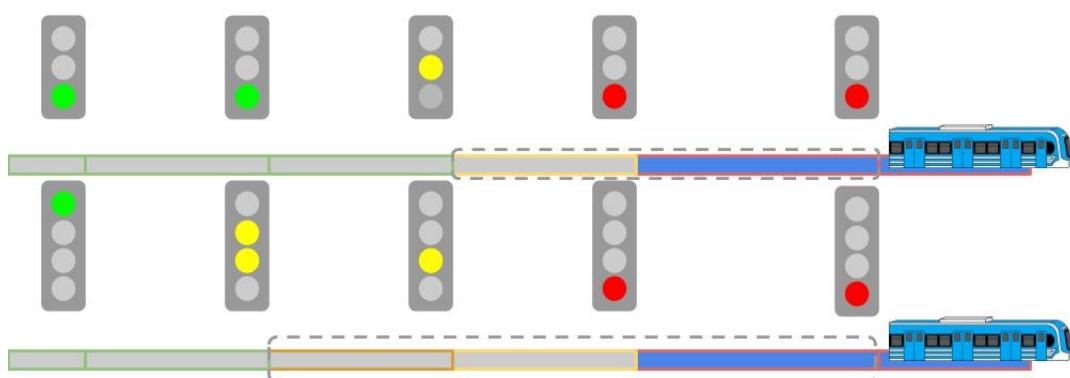


FIGURA 1.11: Estado de los aspectos ferroviarios según la ubicación del tren.

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 lo denomina *fail-safe*¹. Es decir, si por alguna razón algo falla, el sistema adopta la condición mas 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 esta en alto para permitir la circulación vehicular, como se puede ver en la figura 1.12. Si un tren ocupa las secciones amarillas de la figura 1.12 se desenergiza la barrera y comienza a descender el brazo por efecto de la gravedad. Cuando se ocupen las secciones azules de la figura 1.12, 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.

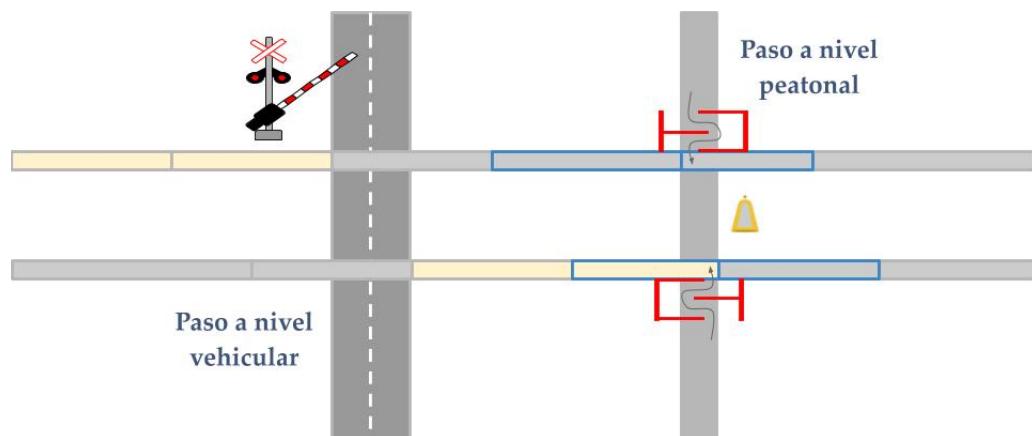


FIGURA 1.12: Pasos a nivel vehicular y peatonal sobre vía férrea.

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.

Se debe destacar que el mismo proceso de descenso de la barrera ocurrirá si esta 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 1.13) es un mecanismo utilizado para permitir el paso de las formaciones de una vía a una ramificación del recorrido principal. Esto se realiza 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.

¹*fail-safe*: falla segura.



FIGURA 1.13: Máquina de cambios de Lavallol (Línea Roca).

En la figura 1.14 se muestra el cambio de vía de la estación Matheu de la Línea Mitre. Se observa que según sea la posición de la máquina de cambios, el tren puede continuar en la misma vía o hacer el cambio a la otra vía.



FIGURA 1.14: Cambio de vías de estación Matheu (Línea Mitre).

En la figura 1.15 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.

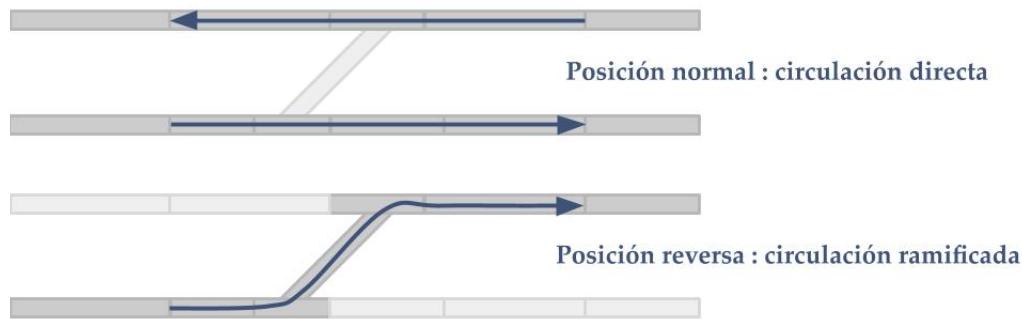


FIGURA 1.15: Posiciones normal e inversa del cambio.

1.4. Sistema de enclavamientos

A modo de ejemplo se ilustra en la figura 1.16 un sistema de cambios en una vía simple con *bypass*. Este permite que dos formaciones puedan cruzarse en sentidos opuestos sin colisionar.

FIGURA 1.16: 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. También debe evitar que las formaciones avancen sobre los cambios cuando estos aún no han terminado de posicionarse en su lugar, lo que provocaría descarrillamientos. A este control se lo denomina sistema de enclavamiento y en definitiva 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, de 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 necesitan ser repuestos, 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.

Además, 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 1.17 para comandar los cambios de vías y semáforos.



FIGURA 1.17: Sistema enclavamiento mecánico en la estación de Chascomús, hoy convertida en museo.

Una vez que se constituye una configuración de posiciones de palancas que habilitan un trayecto, estas quedan «enclavadas» mecánicamente. Es decir, su posición se bloquea y no es físicamente posible cambiarla. A medida que se van moviendo ciertas palancas, las demás que pudieran representar situaciones no seguras quedan enclavadas, y solo se pueden mover aquellas 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», aunque ya no se tengan palancas enclavadas en posiciones fijas.

1.5.2. Enclavamientos electromecánicos

A mediados del siglo XX se desarrolló el sistema de enclavamiento electromecánico. Su funcionamiento se basa en relés (figura 1.18) 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 1.18: Bastidor de relés de estación Lavallol (Línea Roca).

Los sistemas de enclavamiento electromecánicos son comandados por un operario mediante un panel de control (figura 1.19). 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 1.19: 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. La redundancia en sistemas críticos se define por medio de la abreviatura NooM, donde M representa a la cantidad de módulos de medición o decisión que posee el sistema y N la cantidad de dichos módulos que deben funcionar correctamente para que el sistema

opere normalmente [20]. De la investigación realizada surge que el 66 % de las empresas utiliza una redundancia 2oo2 o 2oo3 para alcanzar los niveles de seguridad requeridos [4, 5, 8-13, 18]. Sólo una pequeña porción de las mismas utiliza redundancias 1oo2 [6] o 2oo4 [7].

En consecuencia, se puede afirmar que una redundancia 2oo2 o 2oo3 (figura 1.20) es representativa de los sistemas analizados y puede utilizarse como esquema de partida para un diseño propio. En un sistema con redundancia 2oo3 se tendrá una salida correcta siempre que se tenga a lo sumo un fallo simultáneo [21].

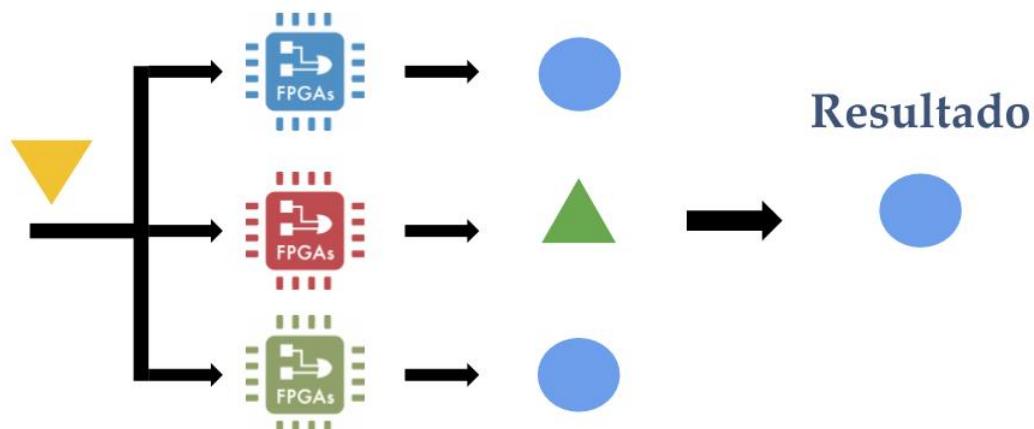


FIGURA 1.20: Redundancia por votación 2 de 3.

También se ilustra en la Figura 1.20 el concepto de diversidad de plataformas de hardware, mediante las FPGA representadas en diferente color: azul, rojo y verde. Para mitigar fallos comunes a una misma plataforma de hardware o software una posible estrategia es utilizar sistemas de diferentes proveedores o desarrollados por grupos de trabajo independientes dentro de la misma organización.

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 procuró además estudiar las tecnologías para implementar metodologías orientadas a mejorar los niveles RAMS del sistema, de acuerdo con el 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 cualquier locación.

Capítulo 2

Introducción Específica

En este capítulo se presentan las topologías típicas del sistema ferroviario y los enfoques de resolución, 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 muchas locaciones y muy diversos unos de otros. La cantidad de elementos involucrados incrementa conforme la complejidad de la topología aumenta, 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 se requiere una línea ferroviaria con vagones de carga que puedan transportar el producto. Por supuesto, 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 usar solo una no tiene el menor sentido logístico.

Es por eso que se utiliza la topología de bypass cada cierta cantidad de kilómetros de vías simples para poder permitir que trenes en sentidos opuestos se crucen sin riesgo de colisión. En la figura 2.1 se representa 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.

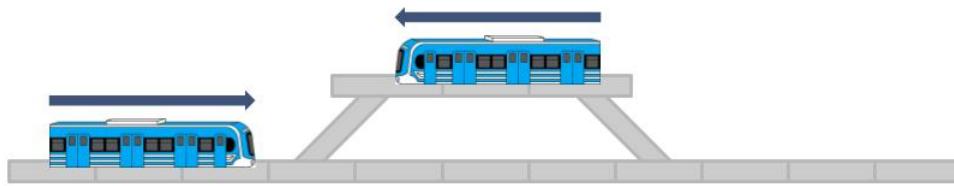


FIGURA 2.1: Topología bypass.

2.1.2. Estación

Los lugares donde se habilita a los pasajeros a ingresar o salir del tren se denominan andenes y se encuentran en las estaciones ferroviarias situadas cada cierta cantidad de kilómetros, en diferentes localidades del país. En la figura 2.2 se muestra una topología de estación simple con andén central. Es decir, el mismo andén permite utilizar trenes tanto de la vía ascendente como de la descendente. Se añadió un paso a nivel vehicular en las inmediaciones de la estación y dos cambios de vías en orientaciones opuestas para permitir a la formación realizar trayectos cortos entre terminales, utilizando la estación como terminal provisoria.

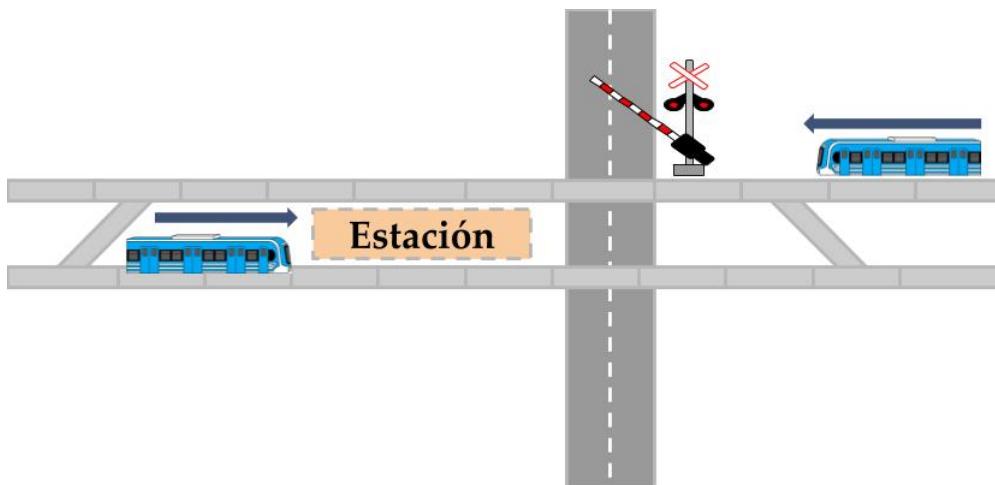


FIGURA 2.2: Topología estación con andén único.

Aunque estaciones de andén único como la estación de Gerli de la Línea Roca son comunes, también existen estaciones con dos andenes: uno puramente para utilizar la vía ascendente y alejarse de la terminal, y otro puramente descendente para viajar hacia la terminal. Tal es el caso de estaciones como Longchamps, Adrogué, Remedios de Escalada de la Línea Roca.

2.1.3. Hub

Otras topologías mas complejas incluyen una cantidad extra de andenes, como Lomas de Zamora o Temperley, que pueden recibir formaciones de varios ramales distintos (Glew/A. Korn, Ezeiza, Bosques, Quilmes, La Plata, etc.) o incluso tener accesos a playas de maniobras o talleres de reparación para poder inyectar o retirar formaciones de la red. Tal es el caso representado en la figura 2.3, donde se tiene una mayor cantidad de andenes, ingresos/egresos a talleres ferroviarios

o bifurcaciones a otros ramales, además de la rama principal de circulación entre terminales.

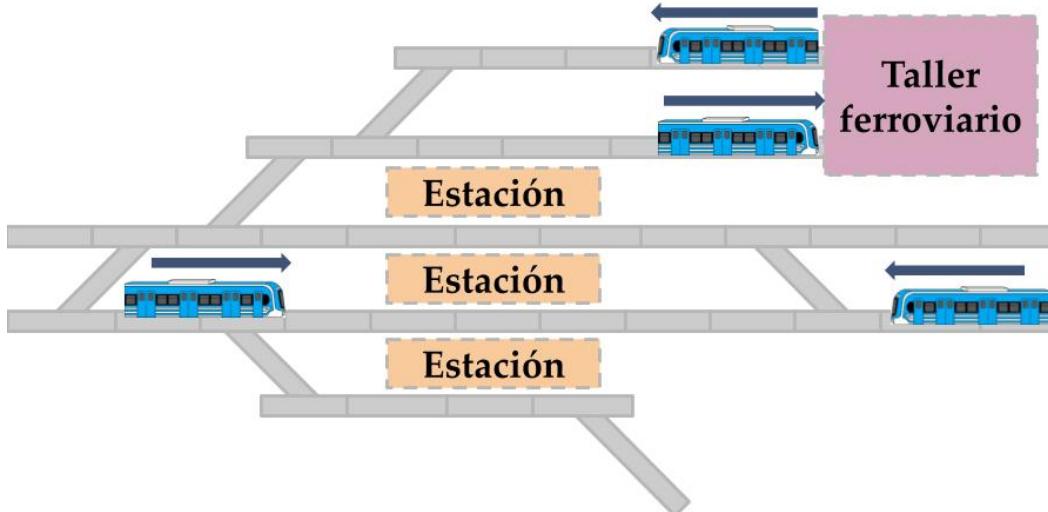


FIGURA 2.3: Topología hub.

Un buen ejemplo de esta topología es la estación Llavallol de la Línea Roca. En ella se tiene una extensa playa de maniobras como la comandada por el panel de control de la figura 1.19.

2.1.4. Terminal

Finalmente, la topología más compleja de todas es la denominada terminal, tal como se representa en la figura 2.4. En ella se encuentran numerosos andenes que pueden ser tanto de ingreso como de egreso indistintamente, presentan muchos cambios de vías para facilitar el intercambio de formaciones y permitir que las vías funcionen en ambos sentidos de circulación, además de tener ramificaciones para diversos ramales que convergen en la terminal.

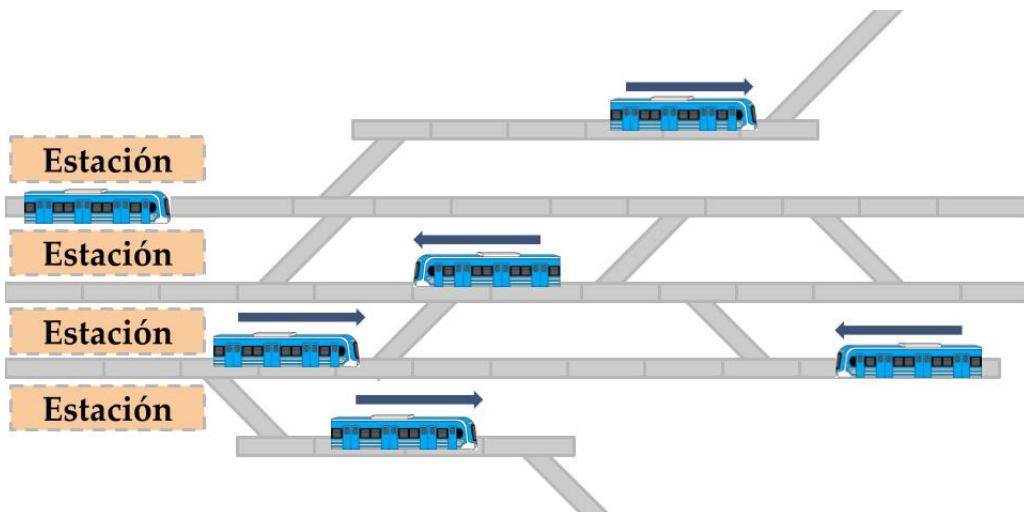


FIGURA 2.4: Topología terminal.

Ejemplos de esta topología pueden ser las estaciones Once de septiembre (Línea Sarmiento), Alejandro Korn y Constitución (Línea Roca) o Retiro (Línea San

Martín, Línea Mitre, Línea Belgrano Norte y Cargas). Incluso hay estaciones que, aunque no son el final del recorrido, pueden funcionar como terminales de ramales más cortos tales como Ezeiza, que extiende el ramal Constitución-Ezeiza hasta Cañuelas, o Glew, que extiende el ramal Constitución-Glew hasta Alejandro Korn.

2.2. Estrategias de resolución

A lo largo de la investigación se relevaron decenas de artículos, los cuales abordan el problema con dos estrategias de desarrollo muy diferenciadas, cada una con sus ventajas y desventajas: el enfoque funcional y el enfoque geográfico.

En el enfoque funcional, el desarrollo se basa en la denominada "tabla de enclavamientos". La tabla de enclavamientos define las condiciones que deben cumplirse para habilitar cada una de las rutas posibles. Cada itinerario se forma a partir de la conjunción de diferentes rutas, siempre que estas sean compatibles, lo cual también está indicado en la tabla. Este concepto se ampliará en la sección 2.3.1.

Históricamente, tanto los enclavamientos mecánicos como los electromecánicos se han definido previamente por tablas de enclavamientos, las cuales también pueden ser usadas para definir la logística de la red. Es por eso que el personal técnico está muy capacitado tanto en la lectura de la tabla como en su elaboración.

En el enfoque geográfico, en cambio, no hay una descripción macro del sistema a nivel funcional, sino una descripción a nivel de componentes. Es la interacción entre los componentes, en función de su posición geográfica en el entorno, lo que se manifiesta a nivel macro. De poder definir las reglas genéricas de cada elemento y las condiciones en las cuales interactúan, es posible definir cualquier sistema, sin tabla de enclavamientos.

Este enfoque dista de ser inmediato, ya que es necesario construir todas las herramientas de análisis de la red y diseñar cada elemento al detalle. La ventaja es que, concluida esa etapa, se independiza el enfoque de la locación, logrando una solución más flexible. Además de definir todas las funcionalidades que la red admite y no solo las necesarias para la logística.

En las siguientes secciones se profundizará en ambos enfoques, los conceptos necesarios para su plena comprensión, cómo se modifica el flujo de trabajo y el análisis de su escalabilidad. Esto último es de vital importancia a la hora de comparar ambos enfoques.

2.3. Enfoque funcional

El concepto de tabla de enclavamientos[22, 23] se introdujo en forma resumida en la sección 2.2. Sin embargo, dado que es fundamental para entender el enfoque funcional, a continuación se lo describe en detalle.

2.3.1. Tabla de enclavamientos

A la hora de establecer itinerarios se utiliza el concepto de ruta, que es el camino definido entre dos semáforos consecutivos. Pero no siempre se establecen todas las rutas posibles, sino solo las necesarias para generar los itinerarios. Por

ejemplo, en la figura 2.5 se pueden ver dos casos de definición de rutas para una misma topología de bypass.

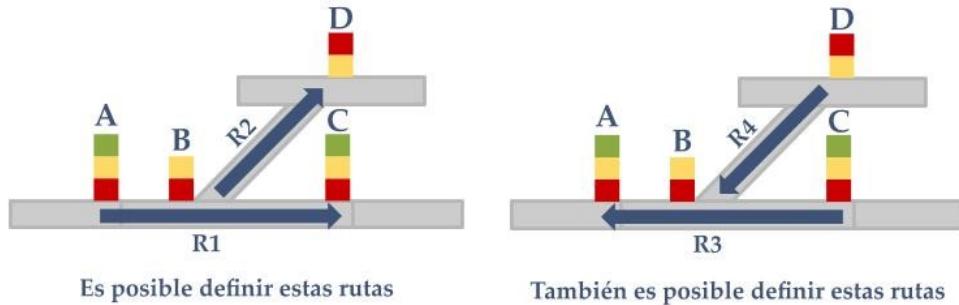


FIGURA 2.5: Ejemplo de elaboración de las rutas.

En el primer caso se indican las rutas que corresponden a utilizar las vías en el sentido de izquierda a derecha. Para la ruta R_1 el semáforo A es el inicial y el semáforo C es el final. Para la ruta R_2 el semáforo de maniobra B es el inicial y el semáforo de maniobra D es el final. Esto se presenta en la Tabla 2.1.

TABLA 2.1: Tabla de enclavamientos (izquierda a derecha)

Ruta	Señal de entrada	Señal de salida
1	Semáforo _A	Semáforo _C
2	Semáforo _B	Semáforo _D

En el segundo caso de la figura 2.5 el itinerario podría contemplar también un uso estrictamente de derecha a izquierda. Sumando así las rutas R_3 y R_4 , como se describe en la Tabla 2.2.

TABLA 2.2: Tabla de enclavamientos (derecha a izquierda)

Ruta	Señal de entrada	Señal de salida
3	Semáforo _C	Semáforo _A
4	Semáforo _D	Semáforo _B

Según el uso que se le quiera dar a la topología, ambas tablas de enclavamientos son válidas. Incluso podemos notar que ambas están incompletas porque una tabla no contempla los casos de la otra. Se puede definir entonces una nueva tabla de enclavamientos como la conjunción de ambas, como se describe en la Tabla 2.3.

TABLA 2.3: Tabla de enclavamientos (caso bidireccional)

Ruta	Señal de entrada	Señal de salida	Rutas conflictivas
1	Semáforo _A	Semáforo _C	R_2, R_3 y R_4
2	Semáforo _B	Semáforo _D	R_1, R_3 y R_4
3	Semáforo _C	Semáforo _A	R_1, R_2 y R_4
4	Semáforo _D	Semáforo _B	R_1, R_2 y R_3

Se añade a la Tabla 2.3 el concepto de ruta conflictiva. Es decir, rutas que no pueden coexistir con la ruta que se quiere pedir. Por ejemplo, R_1 y R_3 van en sentidos opuestos y por lo tanto no puede permitirse R_1 si un tren se encuentra realizando R_3 . De la misma forma, como R_1 requiere que la máquina de cambios se encuentre en posición normal, no puede coexistir ni con R_3 ni con R_4 que requieren el que el cambio se encuentre en posición reversa. Es posible deducir el resto de rutas conflictivas de forma análoga.

Cada ruta constituye una fila y presenta diferentes columnas tales como:

- Semáforos de entrada y de salida.
- Circuitos de vías que deben estar desocupados para permitir la ruta.
- Pasos a nivel que deben tener la barrera baja para permitir la ruta.
- Posición del cambio requerida para permitir la ruta.
- Rutas conflictivas que inhiben la activación de la ruta.

La necesidad de tales o cuales itinerarios puede requerir distintas tablas de enclavamientos para la misma topología. Esto puede repercutir en que, al querer añadir nuevas rutas a futuro, la tabla deba ser modificada y por lo tanto el desarrollo del sistema deba cambiar a otro más complejo.

2.3.2. Modelo del sistema

En el enfoque funcional se utiliza la tabla de enclavamientos como elemento central de decisión para el diseño y funcionamiento del sistema. Es la ruta la que impone qué acciones deben ser tomadas y cuáles prohibidas, y por lo tanto se abstrae de la topología una vez definida la tabla. En la figura 2.6 se presenta un modelo del sistema con enfoque funcional.

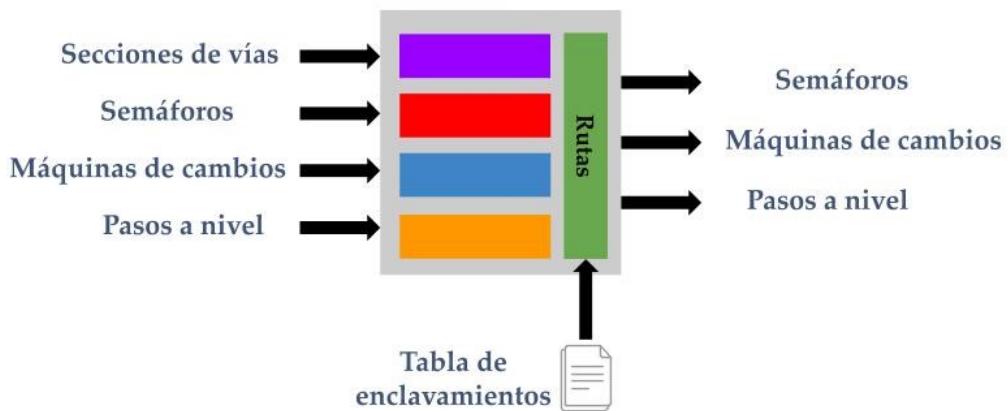


FIGURA 2.6: Enfoque funcional.

Cada bloque horizontal en diferentes colores representa máquinas de estados que modelan los elementos de entrada indicados. Todos ellos, gobernados por una máquina de estados general representada en un bloque se diseña en base a la tabla de enclavamientos (indicado en color verde en la figura 2.6).

La salida del sistema actúa sobre todo el señalamiento, menos la ocupación de los tramos de vías porque son elementos de solo lectura. Puede verse que conforme se añadan mas rutas a la tabla de enclavamientos, las máquinas de estados serán mas complejas y de mayor tamaño.

2.3.3. Flujo de trabajo

En el enfoque funcional, la tabla de enclavamientos es la piedra angular de todo el proceso, sin ella no se puede realizar ningún diseño. En la figura 2.7 se ilustra el flujo de trabajo para este enfoque.

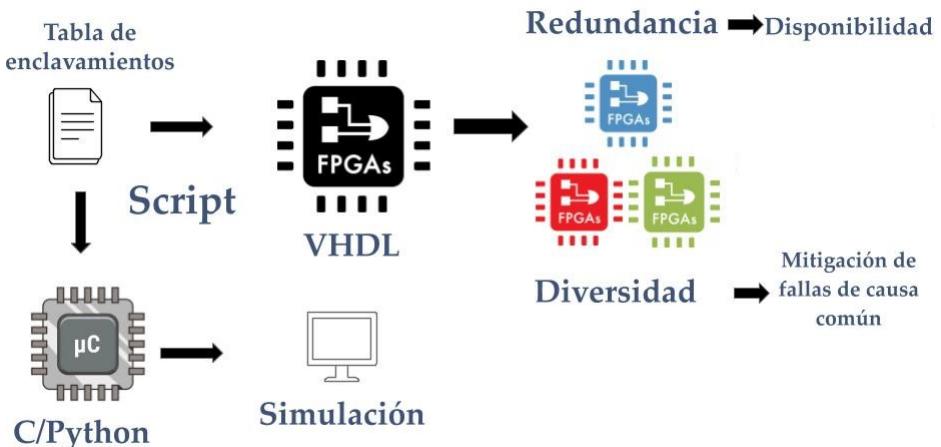


FIGURA 2.7: Esquema de trabajo en el enfoque funcional.

En la sección 2.2 se resaltó que el diseño nace de la tabla de enclavamientos, y para evitar que cualquier error en esta impacte negativamente en la seguridad del sistema, varios profesionales ferroviarios se encargan de diseñarla y revisarla. Además, su validación puede ser automatizada mediante *scripts* que busquen errores en las mismas.

El proceso culmina con la redundancia de los sistemas diseñados y la diversificación de plataformas, sin lo cual no se podrían alcanzar los niveles de disponibilidad y seguridad necesarios.

2.3.4. Escalabilidad de la estrategia

Automatizar el proceso de generación del código es inmediato ya que la tabla de enclavamientos define todas las funcionalidades necesarias. Pero al hacerlo se llegó a la conclusión de que los bloques que contenían las máquinas de estados crecen de tamaño hasta volverse inmanejables las conexiones. En la figura 2.8 se representa el concepto del crecimiento del sistema conforme la topología se vuelve más compleja.

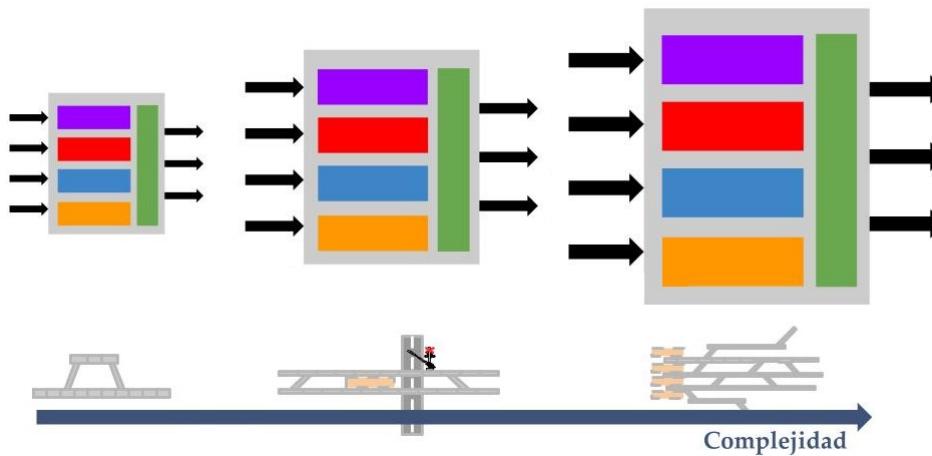


FIGURA 2.8: Escalabilidad del enfoque funcional.

Es importante destacar que a medida que la topología se complejiza la cantidad de bloques para modelarla sigue siendo la misma. Lo que se incrementa es la cantidad de estados en cada bloque y la densidad de conexiones internas y externas a los bloques.

El uso de bloques monolíticos que crecen velozmente perjudica el desarrollo de los tests, los cuales deben ser reescritos por completo cada vez que la topología cambia, incluso ante el cambio más mínimo.

Otro problema encontrado es el de la incompletitud, que se detalló al inicio de la Sección 2.3. Si la red admite M rutas pero solo se definieron N como necesarias (donde $N \leq M$), entonces se podrían tener N tests que las validen y el sistema se certifica para N rutas. Pero si en un futuro se necesitan $N+1$ rutas, se deberá hacer todo el proceso de validación desde cero, lo que encarece todo el proyecto.

La ventaja central de este enfoque es que, teniendo la tabla de enclavamientos correctamente definida, es inmediato pasar de la tabla a la implementación del sistema. La desventaja es que el uso de memoria es excesivo y desde el punto de vista del testing y la validación es incompleto.

2.4. Enfoque geográfico

En el enfoque geográfico el énfasis está puesto en la interacción entre los componentes a partir de su posición en la red y no en su funcionalidad a nivel de sistema. Por ende el enfoque geográfico no necesita una tabla de enclavamientos que defina su comportamiento, sino definir genéricamente los componentes y establecer una representación matemática de las conexiones entre ellos. En ese sentido, este enfoque requiere un nivel de análisis previo mucho mayor y, por lo tanto, un mayor tiempo de desarrollo. No obstante, su flexibilidad a la hora de escalar a topologías de mayor tamaño es notable.

Por todo lo expuesto, se remueve el concepto de ruta como elemento central del desarrollo y el foco se pone en modelar los elementos discretos de la red ferroviaria (semáforos, barreras, cambios, circuitos de vía). En la figura 2.9 se representa la idea central de este enfoque: la variedad de elementos es finita; el foco del desarrollo está centrado en el análisis de la red ferroviaria.

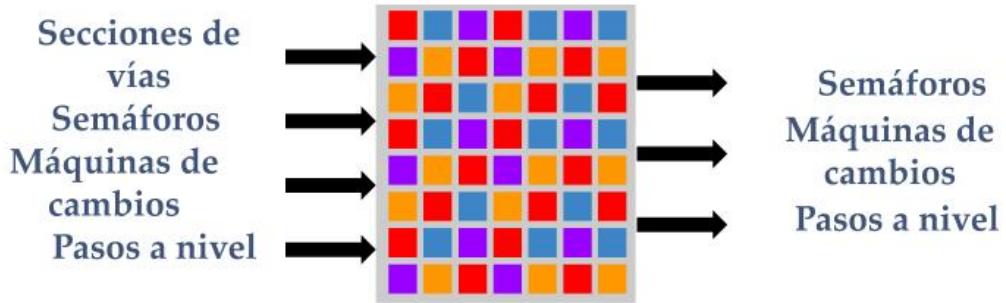


FIGURA 2.9: Enfoque geográfico.

En la figura 2.9 los bloques de cada color representan un determinado elemento ferroviario. Así, un bloque cualesquiera se comportará a otro de iguales características y será su posición relativa a los otros bloques lo que determinará la funcionalidad a nivel general.

2.4.1. Análisis de grafos

Para representar las conexiones entre los elementos ferroviarios, se introduce el concepto de grafo. Un grafo es una representación matemática de las relaciones (aristas) entre componentes (nodos) de una red. Utilizado ampliamente en ciencias de la computación y matemática, es sencillo llegar a un modelo de grafos partiendo desde una topología como la de la figura 2.10, donde a cada tramo de vía se le asignó un nodo y cada arista del grafo representa el vínculo que existe entre ese tramo y sus vecinos.

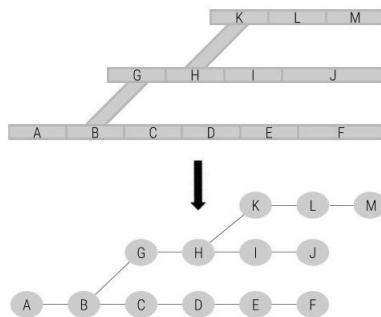


FIGURA 2.10: Pasaje de topología ferroviaria a grafo.

Por ejemplo, el nodo B posee un cambio de vías que vincula los tramos A y C si el cambio se encuentra en posición normal y los tramos A y G si el cambio se encuentra en posición inversa. Por lo tanto, en el grafo, el nodo B posee aristas que lo vinculan con los nodos A,C y G.

La topología de la figura 2.10 puede ser analizada por el algoritmo creado para este trabajo utilizando como información únicamente el grafo que la modela. Todos los nodos que tengan un solo vecino son extremos de la red, mientras que los que tengan tres vecinos se asumirá que poseen un cambio de vías. Los nodos que tengan dos vecinos serán analizados según su posición relativa a cambios cercanos. El resultado de analizar esta topología se muestra en la figura 2.11.

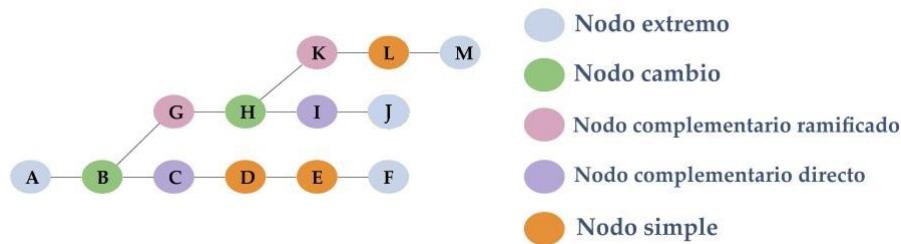


FIGURA 2.11: Análisis del grafo ferroviario.

Nodos como el G y el K deben analizarse por su posición relativa a los nodos B y H, que son la raíz del cambio. Al desprenderse de la rama principal de circulación son categorizados como complementos de rama. En cambio los nodos C e I, al continuar el trayecto que tienen los nodos A-B y G-H, son complementos directos de la rama, porque la extienden mas allá de los segmentos indicados.

Otros nodos como D,E y L no tienen ninguna característica especial en este ejemplo, pero bien podrían categorizarse de otra manera si por los tramos de vías que representan se tuviese un paso a nivel.

2.4.2. Flujo de trabajo

El procedimiento se puede repetir para cualquier topología, ya que sin importar la cantidad de elementos o sus conexiones todos los vínculos entre componentes pueden ser representados mediante un grafo. En la figura 2.12 se ilustra el esquema de trabajo seguido para el enfoque geográfico.

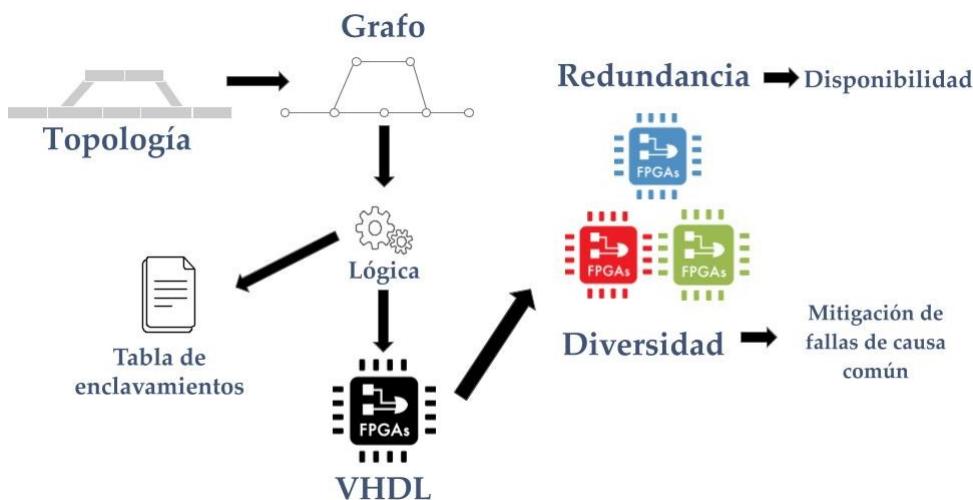


FIGURA 2.12: Esquema de trabajo en el enfoque geográfico.

A diferencia del enfoque funcional, en el enfoque geográfico la tabla de enclavamientos ocupa un rol secundario al ser un historial del proceso de conversión entre el gráfico y la implementación electrónica del sistema. La tabla de enclavamientos del enfoque funcional (al ser incompleta) debe estar contenida en la tabla de enclavamientos del enfoque geográfico, al considerar todas las rutas que admite la red. Aunque ambos enfoques parten de conceptos distintos, deben converger y brindar resultados comparables, cuya consistencia pueda ser comprobada.

El proceso de implementación de la solución a un sistema ferroviario mediante el enfoque geográfico se inicia con el pasaje del layout al grafo. Este es analizado por el algoritmo que detecta cuántos semáforos, de cuántos aspectos, en qué orientación y dónde deben situarse para que el sistema sea seguro. Esto, además de detectar la posición de todos los cambios y barreras, permite encontrar todas las rutas soportadas por la red y genera como resultado una tabla de enclavamientos completa.

El proceso culmina de forma idéntica al enfoque funcional: aplicando estrategias de redundancia y diversidad se buscará alcanzar un nivel de disponibilidad y seguridad apropiado.

2.4.3. Escalabilidad de la estrategia

En el caso del enfoque geográfico el análisis de escalabilidad da un resultado muy diferente al obtenido para el enfoque funcional. En el enfoque geográfico al aumentar la complejidad y tamaño de las topologías, el tamaño de cada bloque se mantiene constante. Lo que se incrementa es la cantidad de bloques necesarios para implementar el sistema. Esto es ilustrado en la figura 2.13.

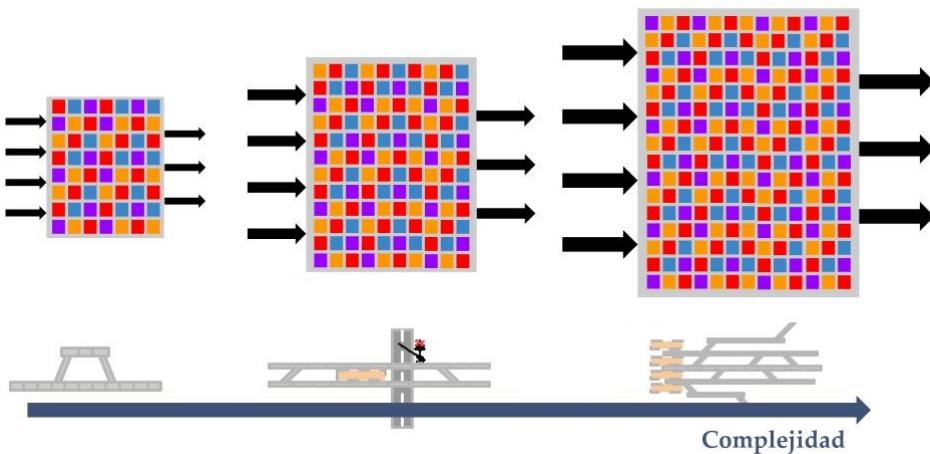


FIGURA 2.13: Escalabilidad del enfoque geográfico.

Todos los tests unitarios, referidos a cada bloque del mismo color que modelan un mismo espacio físico (que puede o no contener una barrera, un cambio o varios semáforos). De esta forma se elaboran una única vez, sin importar la cantidad de elementos idénticos presentes en la topología. Sumado a que, como en este enfoque se identifican todas las rutas y por lo tanto se pueden generar todos los tests necesarios, la batería de ensayos que otorga este enfoque es completa. Es decir, siempre se tendrá una cantidad de tests mayor o igual que la necesaria para cualquier necesidad presente o futura.

Una desventaja de este enfoque es que se debe implementar el analizador de redes ferroviarias y un conversor que a partir de un grafo genere toda la estructura de archivos necesaria para implementar el circuito electrónico en una FPGA. Ya que no existen esas herramientas para uso masivo. Por lo tanto, la complejidad y, en consecuencia, el tiempo de desarrollo son mayores.

2.5. Consideraciones generales

En el presente trabajo se optó por implementar el sistema bajo el enfoque geográfico, dado que se consideró que sus ventajas superan a sus desventajas, en particular en lo referente a la mayor escalabilidad y reusabilidad que provee.

Los módulos del sistema fueron implementados con máquinas de estado finitas con camino de datos (FSMD, del inglés *Finite State Machine with Data path*), que son máquinas de estado finitas (FSM, del inglés *Finite State Machine*) y circuitos secuenciales y combinacionales que constituyen el camino de datos. La FSMD (figura 2.14) posee dos partes diferenciadas: el camino de control y el camino de datos. El camino de control se compone de una FSM que, según las entradas de control y el estado interno que posee, genera señales internas que controlan los circuitos secuenciales del camino de datos. Estos, a su vez, contienen los bloques que procesan las entradas y actúan sobre las salidas.

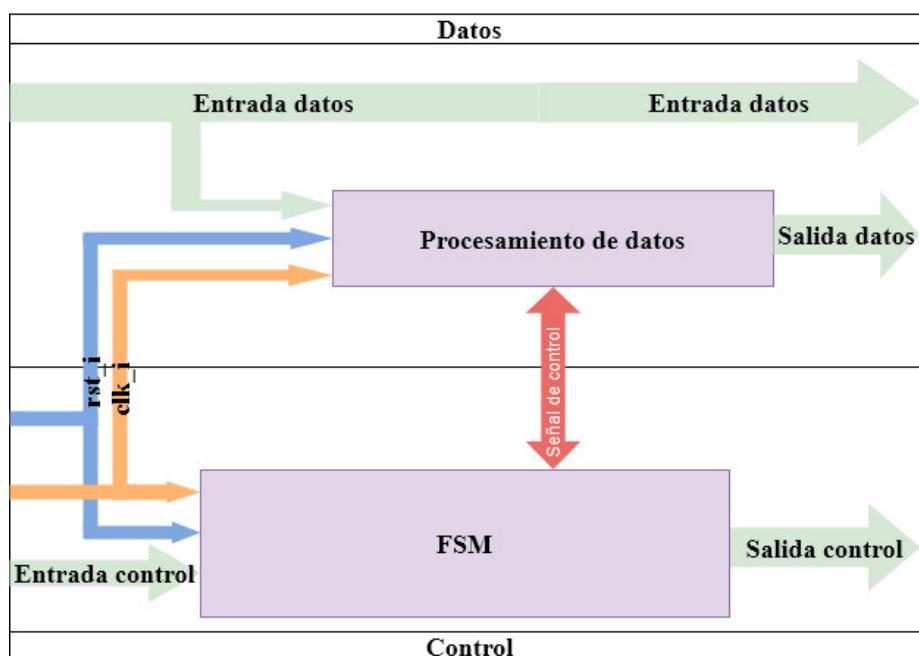


FIGURA 2.14: Diagrama en bloques genérico de una FSMD

Siguiendo los lineamientos recomendados, una FSMD debe ser diseñada, implementada y simulada de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Definición del algoritmo a implementar.
2. Definición de entradas y salidas de la FSMD.
3. Diseño del camino de datos.
4. Diseño de interfaz entre camino de datos y camino de control.
5. Definición de los estados de la FSM.
6. Diseño de la FSM.
7. Implementación del diseño.
8. Diseño e implementación de los ensayos.

Esta metodología puede inferir mas tiempo de desarrollo que el habitual, pero ya ha demostrado ser exitosa en el proyecto realizado por el Mg. Ing. Facundo Larosa, codirector de este trabajo. Por lo que se aprovechó su experiencia y conocimiento para resolver esta etapa del desarrollo. Los beneficios son un mayor control del diseño a bajo nivel, una mayor portabilidad y un mas eficiente uso de los recursos de la plataforma electrónica.

2.6. Plataforma utilizada

Se utilizó una plataforma FPGA, a diferencia de las empresas mencionadas en el capítulo 1 que utilizan microprocesadores, ya que se busca aprovechar la concurrencia y mayor seguridad inherentes a esta tecnología [24-26] para la implementación de sistemas críticos.

Por razones de disponibilidad se utilizó el kit de desarrollo Arty Z7 (figura 2.15), el cual posee 17600 LUT's, 35200 FF's, 32 BUFG's y 100 IOB's [27]. Se lo utilizó como base para sintetizar el diseño y extraer conclusiones que permitan dimensionar los recursos lógicos necesarios para un desarrollo de estas características.

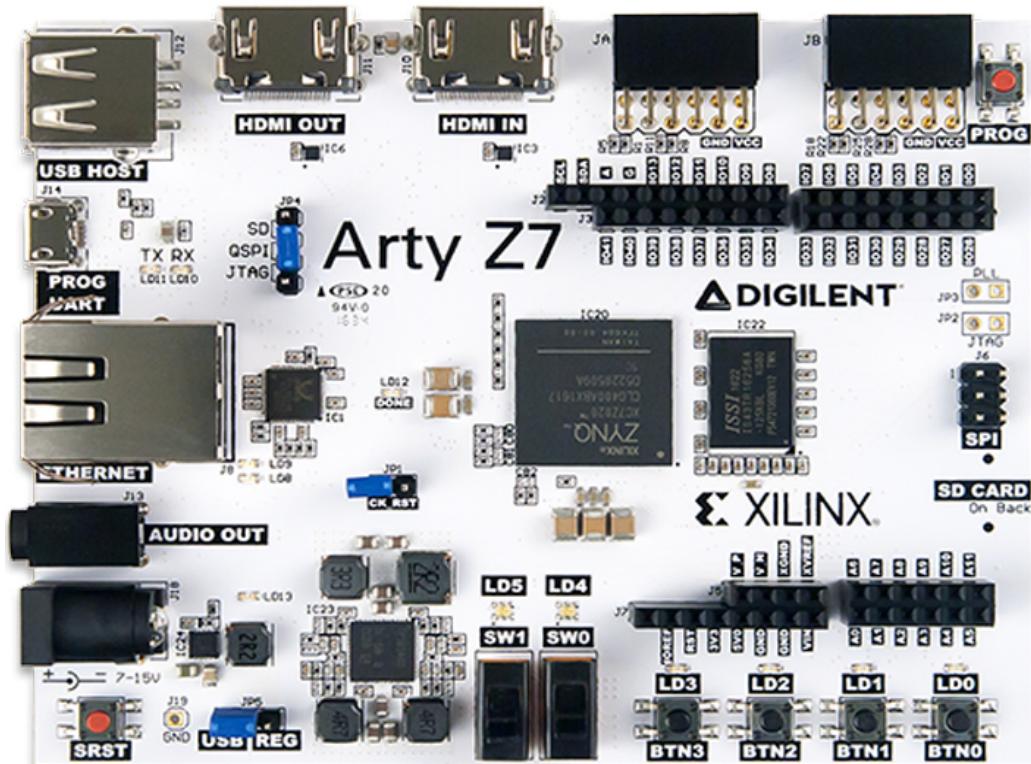


FIGURA 2.15: FPGA Arty Z7-10 de Digilent

Capítulo 3

Diseño e Implementación

En este capítulo se presentan las decisiones de diseño adoptadas para concretar el desarrollo del trabajo. Además, se describen en forma genérica los módulos necesarios tanto del sistema de enclavamiento como de los bloques auxiliares para concretar una comunicación exitosa entre el sistema y el exterior.

3.1. Analizador de redes ferroviarias

En el marco de la Especialización de Sistemas Embebidos se utilizó el enfoque funcional basado en la tabla de enclavamientos, con las limitaciones ya expuesta en el capítulo 2. Algunos de los artículos encontrados utilizan ese enfoque [28-31], mientras otros artículos mas recientes abordan el modelado de los sistemas sin utilizar tablas de enclavamiento [32-35].

Los diversos artículos que modelan los sistemas ferroviarios en base a la topología utilizan estrategias muy dispares. Por ejemplo, no existe una idea en común de que herramienta matemática utilizar: algunos recurren a las redes de Petri, mientras que otros a los grafos. Incluso dentro del subgrupo de los artículos que sugieren utilizar grafos no existe un criterio unificado de qué representa cada nodo y cada arista, ni tampoco cómo analizar la red ni cuáles son los elementos básicos que necesita para estar definida.

En base a la bibliografía relevada, se llegó a la conclusión de que todo grafo ferroviario necesita dos datos para estar definido. El primero es la lista de relaciones entre nodo inicial y nodo final, y el segundo es la posición absoluta del nodo en el grafo junto con datos adicionales, como si posee un paso a nivel o si es bidireccional.

Con esa información fue posible realizar un analizador de redes ferroviarias. Un script implementado en el lenguaje Python que procesa archivos de texto plano donde se indican las conexiones entre ellos y cuyos resultados son:

- Análisis de red ferroviaria:
 - Determina qué cantidad de semáforos son necesarios.
 - Determina dónde deben situarse los semáforos.
 - Determina cuántos aspectos deben tener cada semáforo.
 - Determina qué orientación debe tener cada semáforo.
 - Identifica todos las máquinas de cambios.

- Identifica los extremos de la red, sean absolutos o relativos.
- Identifica todas las rutas soportadas por la red.
- Genera una tabla de enclavamientos con todos los datos obtenidos.
- Implementación de la red ferroviaria en VHDL:
 - Genera todos los archivos necesarios.
 - Interconecta todos los módulos creados.
 - Adapta el tamaño de todas las señales a lo que la topología necesite.
- Interfaz de comunicación con la red ferroviaria:
 - Genera todos las tramas necesarias para la comunicación.
 - Brinda un menú de opciones para modificar las tramas en tiempo real.
 - Envía las tramas al sistema implementado en la FPGA.
 - Actualiza la interfaz con los datos devueltos por la FPGA.

Todas las topologías de la sección 2.1 pueden ser analizadas por el programa y generar, de forma automática, el código en VHDL que sea necesario para el correcto funcionamiento del sistema. A modo de ejemplo se incluye el caso de la figura 3.1, grafo de una red ferroviaria bypass, antes de ser procesado. El analizador de redes ferroviarias devuelve el grafo procesado tal como se presenta en la figura 3.2.

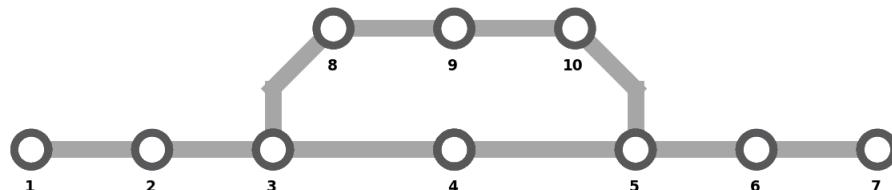


FIGURA 3.1: Grafo antes de ser analizado por el algoritmo

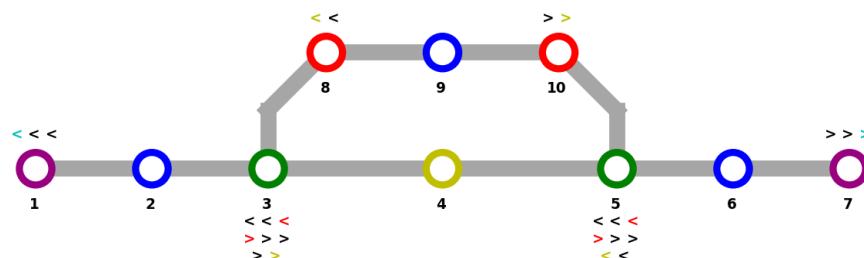


FIGURA 3.2: Grafo luego de ser analizado por el algoritmo

Los nodos 1 y 7 se encuentran pintados de violeta porque, al tener un único vecino cada uno, se consideran nodos extremos. Los nodos 2, 6 y 9 son nodos simples y están pintados de azul. Estos no poseen semáforos, barreras o máquinas de cambios, ni tampoco relación con los nodos que presentan mas de dos vecinos. Los nodos que sí tienen una importancia central en el análisis son los nodos que poseen tres vecinos: el nodo 3 y el nodo 5, que están pintados en verde y se consideran "cambios raíz".

Luego el nodo 4 se categoriza como nodo de cambio directo por ser la continuación de los segmentos 2-3 y 5-6 de tener el cambio de vía en posición normal, permitiendo la circulación directa. En este caso el nodo 4 es compartido por ambos cambios.

Los nodos 8 y 10 son vecinos de los cambios 3 y 5 pero no comparten ninguna coordenada espacial con ellos, son nodos de cambios ramificados. Es decir, solo permitirán la secuencia de nodos 2-3-8 o 9-8-3 si la máquina de cambios se encuentra en posición inversa. El mismo análisis puede hacerse para el nodo 5.

La asignación de semáforos se realiza solo sobre los nodos extremos, cambios raíz y cambios ramificados. Los extremos necesitan los semáforos para permitir la salida de las formaciones de la red, ya que la red ferroviaria continúa mas allá del nodo 1 y del 7; de ser nodos extremos absolutos (fin de red) no corresponde que se les asigne un semáforo.

Los nodos de cambios son los que presentan mayor cantidad de semáforos. Necesitan dos semáforos de tres aspectos para permitir la circulación directa sobre el cambio cuando se encuentra en posición normal y un semáforo de dos aspectos para permitir la circulación en la ramificación del recorrido, pero con precaución por ser una zona crítica. Por último, los nodos de cambios ramificados solo presentan un semáforo de doble aspecto como complemento al otro semáforo de maniobras, en función de utilizar la ramificación para volver al recorrido principal a una velocidad moderada.

El haber desarrollado un criterio propio para modelar las topologías tuvo como consecuencia el tener que diseñar tanto la herramienta de análisis, como así también la arquitectura y funcionalidad de cada uno de los módulos expuestos a continuación.

3.2. Arquitectura de la solución propuesta

La implementación del enclavamiento en la solución propuesta se realiza en una FPGA, como se explicó en la sección 2.6. La FPGA debe contar como entrada con los datos de ocupación de vía, estado de las señales, etc. y debe proveer como salida las señales de control de cambios, señales, etc.

Dada la gran cantidad de señales involucradas y la limitada cantidad de puertos disponibles en la FPGA, la información debe ser ingresada y leída de la FPGA en formato serie. Para eso se utilizan módulos de recepción y transmisión, junto con memorias FIFO, como se ilustra en la figura 3.3.

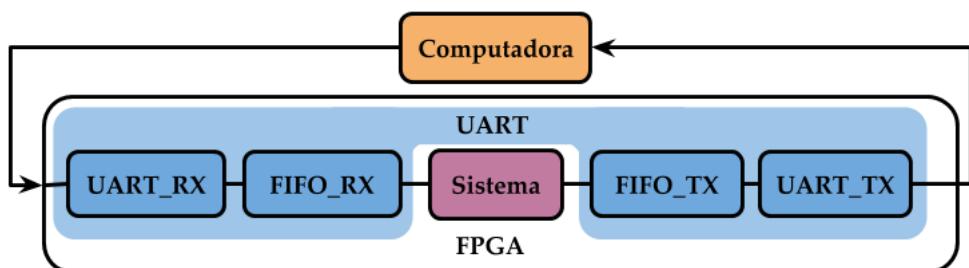


FIGURA 3.3: Diagrama de conexión del sistema a la computadora.

Estos módulos, ilustrados en celeste en la figura 3.3, conforman la UART. La UART (del inglés, *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) es la unidad encargada de recibir y transmitir las tramas desde la computadora hasta la plataforma FPGA.

Las memorias FIFO dependen de las características particulares de la comunicación serie utilizada. El sistema de enclavamiento propiamente dicho está dentro del bloque indicado como "Sistema" en el centro de la figura 3.3. Este bloque "Sistema" puede ser utilizado bajo distintos formatos de comunicación serie cambiando únicamente los módulos UART y FIFO según resulte necesario.

La arquitectura propuesta para la implementación del bloque "Sistema" en la FPGA se muestra en la Figura 3.4.

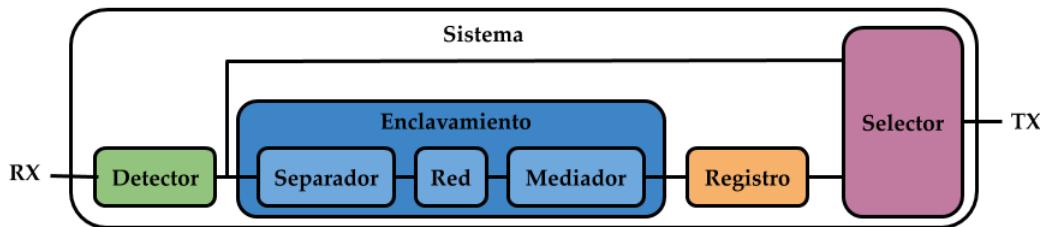


FIGURA 3.4: Diagrama general del sistema.

El módulo "Detector" recibe las tramas en formato serie, comprueba su integridad y en caso de que los datos de ocupación de vía, estado de las señales, etc. recibidos sean válidos los entrega al módulo "Separador".

El módulo "Separador" toma esos datos y los separa de modo de entregarlos al módulo "Red" en la entrada que corresponda a cada dato.

El módulo "Red" está conformado por la implementación de los nodos y las máquinas de cambio, junto con sus respectivas interconexiones.

Las interconexiones de los nodos y las máquinas de cambios surgen como resultado del análisis que realiza en forma automática el Analizador de redes ferroviarias, de acuerdo a lo explicado en la sección 3.1.

El módulo "Mediador" toma las salidas de control de cambios, señales, etc. generadas por el bloque "Red", las agrupa apropiadamente y se las suministra al bloque "Registro".

El módulo "Registro" transforma cada elemento de la señal en un carácter imprimible para enviar a la UART.

Finalmente, el módulo "Selector" se usa exclusivamente a los fines de comprobar el correcto funcionamiento de la comunicación serie, quitando del sistema a los módulos Separador, Red, Mediador y Registro.

Finalmente, es importante resaltar que en la figura 3.4 se ha indicado como "Enclavamiento" al subsistema conformado por los módulos Separador, Red y Mediador. Esto se debe a que el funcionamiento del Enclavamiento está dado no sólo por el módulo Red, sino por la forma en que las señales son distribuidas en las entradas de los distintos elementos del módulo Red y la forma en que las señales de salida del módulo Red son entregadas a cada uno de los elementos en campo (máquinas de cambio, señales, etc.).

Para poder verificar el funcionamiento del sistema a nivel general, primero es necesario verificar que cada bloque se comporta como debe. En la siguientes secciones se abordará el diseño e implementación de cada uno de los bloques.

3.3. Módulo de nodos

El módulo de nodos corresponde al módulo principal en esta implementación. Por cada nodo en el grafo se tiene un módulo de nodos equivalente, cuyas conexiones a otros módulos estarán definidas por las aristas del grafo.

Tal como se explicó en la sección 2.4.1, se definió que cada nodo del grafo representa un tramo de vía, con todos los elementos que posea ese tramo en la realidad. Es decir, si el tramo incluye semáforos o barreras serán modeladas dentro del módulo de nodo. Con excepción de las máquinas de cambios que por su naturaleza tendrán un módulo aparte.

Como cada tramo puede tener diferentes cantidades de elementos, existen diversos tipos de nodos en el sistema. Para exemplificar se describirá el funcionamiento de un nodo genérico con la máxima cantidad de funcionalidades, de forma tal de cubrir todos los casos.

Un módulo de nodo (cuyo diagrama de bloques se presenta en la figura 3.5) recibe los estados de ocupación de sus vecinos ("Estado_post_i" y "Estado_ante_i") y de sí mismo ("Estado_i") desde el exterior, además del estado de los semáforos que posee("Sem_s_i[N_SEM]").

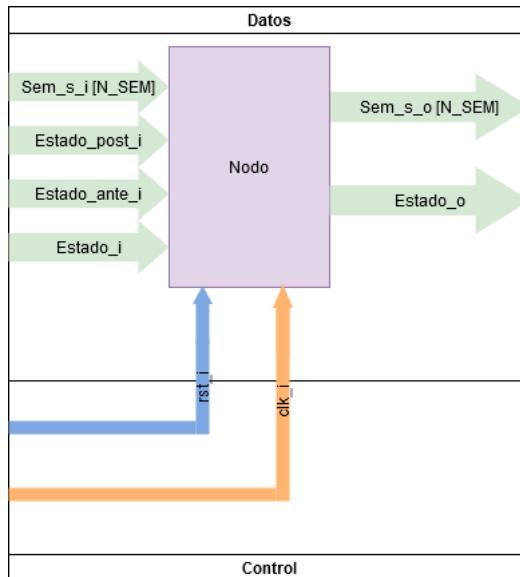


FIGURA 3.5: Diagrama en bloques del módulo de nodo genérico

Internamente debe informar su estado de ocupación a sus vecinos ("Estado_o") y decidir los aspectos que deben tener sus semáforos ("Sem_s_o[N_SEM]") de la siguiente manera:

- Si el tramo propio está ocupado: el semáforo propio debe estar en aspecto rojo.
- Si el vecino está ocupado: el semáforo propio debe estar en aspecto rojo.

- Si el vecino está desocupado:
 - Si el semáforo vecino está en rojo: el semáforo analizado debe estar en aspecto amarillo.
 - Si el semáforo vecino está en amarillo: el semáforo analizado debe estar en aspecto verde.

3.4. Módulo de la máquina de cambios

Una decisión de diseño importante fue que, a pesar de que los nodos del grafo pueden tener desde uno hasta seis vecinos, los módulos de nodos solo tienen dos posibles vecinos: el anterior y el posterior. Esto se hizo para que todos los nodos pudiesen ser modelados desde la misma plantilla base, agilizando la automatización del proceso.

Esto llevó a la necesidad de disponer de un módulo que conmute las conexiones en el caso de tener nodos con mas de dos vecinos. Este bloque es el módulo de la máquina de cambios.

Un cambio de vías conecta un tramo A con un tramo B o con un tramo C. El módulo de la máquina de cambios tiene como función conectar un nodo anterior (A) con un nodo posterior (B) o un nodo del desvío (C), según la posición de la máquina de cambios, como se muestra en la figura 3.6.

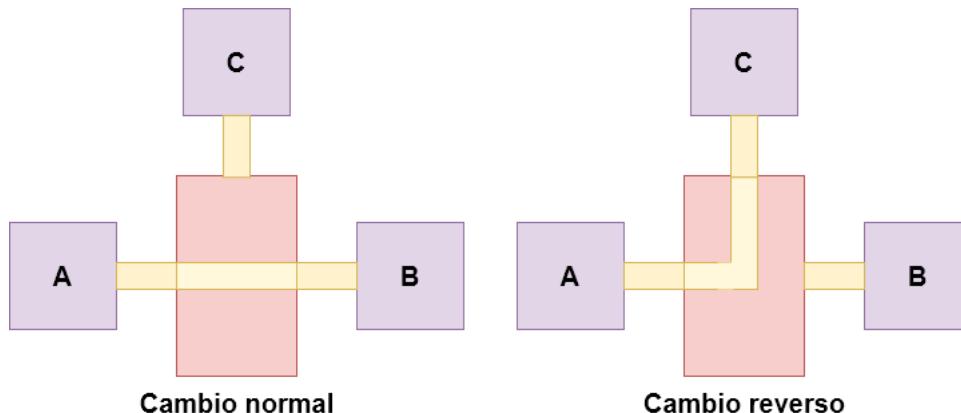


FIGURA 3.6: Conexión del módulo de la máquina de cambios

De esta manera, el nodo A ejemplificado en la figura 3.6 tendrá como vecino posterior al que le indique la máquina de cambios. Si la posición del cambio es normal, entonces el nodo A tendrá como vecino posterior al nodo B. Si la posición del cambio es reversa, entonces el nodo A tendrá como vecino posterior al nodo C.

De la misma manera los nodos B y C verán como nodo "anterior" al nodo A o a ningún nodo, según el cambio se encuentre en posición normal o reversa respectivamente.

En la figura 3.7 se ilustra el diagrama en bloques del módulo de la máquina de cambios.

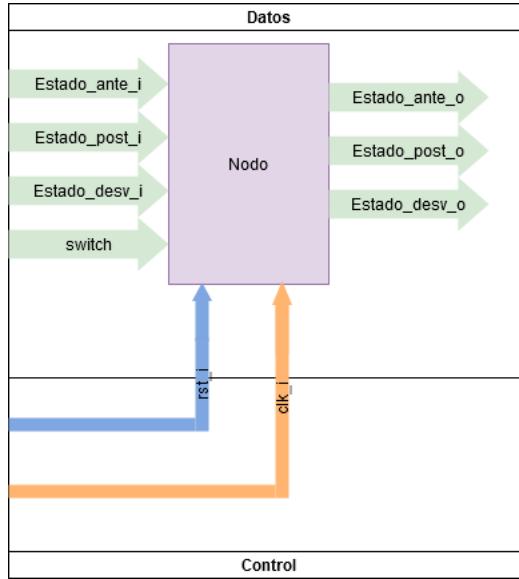


FIGURA 3.7: Diagrama en bloques del módulo de máquina de cambios

3.5. Módulo de comunicación UART

En el diseño de los módulos para la interface UART con el exterior se utilizó un modelo aportado por los docentes, pero fue necesario modificarlo para poder automatizarlo y cumplir con las siguientes premisas:

- Se deben tener dos FIFOs distintas, una de entrada y la otra de salida.
- El tamaño de las FIFOs debe adaptarse a la topología: redes mas grandes necesitarán FIFOs mas grandes y redes mas pequeñas requerirán FIFOs mas pequeñas.
- Ambas FIFOs no pueden tener tamaño idéntico.
- Se deben incluir señales que indiquen al sistema si se tienen nuevos datos del exterior o si es posible recibir nuevos datos procesados para su posterior impresión.
- Cada cierto tiempo ambas FIFOs deberán vaciarse en su totalidad.

Se presenta en la figura 3.8 un diagrama en bloques de la UART.

Los bloques de recepción y transmisión son funcionalmente idénticos, pero instanciados de forma diferente para que adopten tamaños distintos y sean conectados a señales distintas, ya que su rol no es el mismo. La FIFO de entrada es la encargada de almacenar los valores ingresados (conector amarillo) en la plataforma con un *baud-rate* definido y envía su contenido al sistema junto con una serie de pulsos para indicar cuándo deben ser leídos. La FIFO de salida, en cambio, debe almacenar los resultados del sistema según una serie de pulsos generada por el mismo sistema, para luego imprimir el resultado por el puerto serie (conector rosa) con el *baud-rate* definido.

La FIFO de entrada se utiliza para almacenar una trama de la forma '<Mensaje de largo N>' (conector negro) por lo que espera al menos N+2 bytes, mientras que la FIFO de salida espera mensajes de la forma 'Mensaje de largo M' (conector

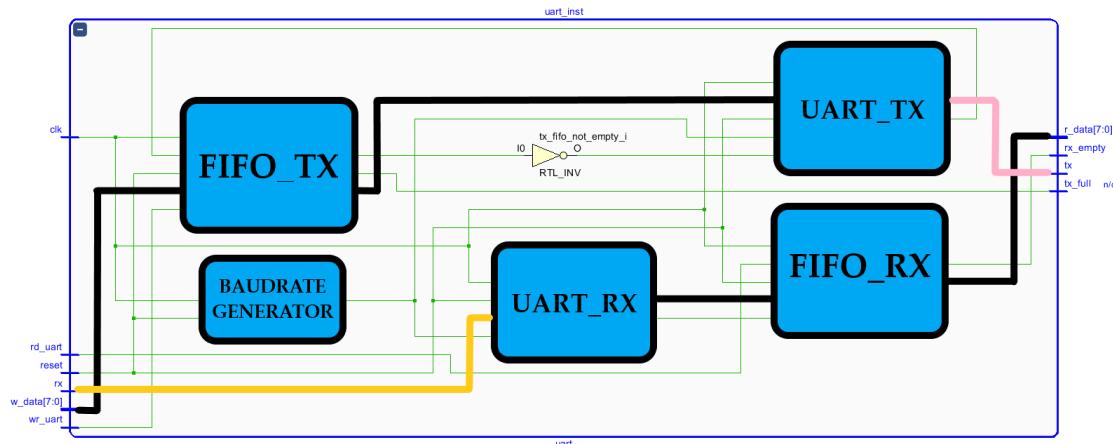


FIGURA 3.8: Diagrama en bloques de la UART

negro). Ya que $N > M$ es claro que $N + 2 > M$ en la mayoría de los casos. Aunque también puede ocurrir que la diferencia entre ambos no sea tanta y al implementar el tamaño de las FIFOs en potencias de 2 terminen ambas FIFOs con el mismo tamaño.

Con este criterio de diseño, en todos los demás casos, la FIFO de salida tendrá el mismo tamaño que la FIFO de entrada o a lo sumo será 50 % menor, lo que representa un ahorro de 25 % de los recursos estimados. Por ejemplo, si se necesita que la entrada tenga 15 elementos y la salida 7 elementos y se le asigna el mismo tamaño a ambas FIFOs; tanto la FIFO de entrada como la de salida necesitarán 16 bits cada una, dando un total de 32 bits. Pero si se aplica el criterio de tamaños desacoplados, entonces para la FIFO de salida podrían asignarse solamente 8 bits, dando un total de 24 bits, un 25 % menos que los 32 bits que necesitaría si ambas FIFOs quedaran definidas según los datos de la entrada.

3.6. Módulos de procesamiento de tramas

Durante el desarrollo del trabajo de la Especialización en Sistemas Embebidos se había considerado la estrategia de obtener las señales de forma paralela, es decir, para cada elemento se tenía asignado un pin que monitoreaba su estado. Esto resultó ser un problema a la hora de implementar topologías mas grandes, donde se necesitó hasta cinco veces la cantidad de entradas digitales que la FPGA tenía disponibles. Por lo tanto, se decidió cambiar a una lectura y escritura en serie.

Sin embargo, utilizar una lectura serie implica que debe indicarse cuál es el inicio y el final de cada mensaje, además de un criterio para determinar si el mensaje recibido es fiable. La solución desarrollada se presenta a continuación en esta sección.

3.6.1. Módulo detector

El módulo detector tiene como función recibir una secuencia de caracteres y armar una salida con un vector de elementos booleanos. Un diagrama en bloques del funcionamiento del módulo se muestra en la figura 3.9

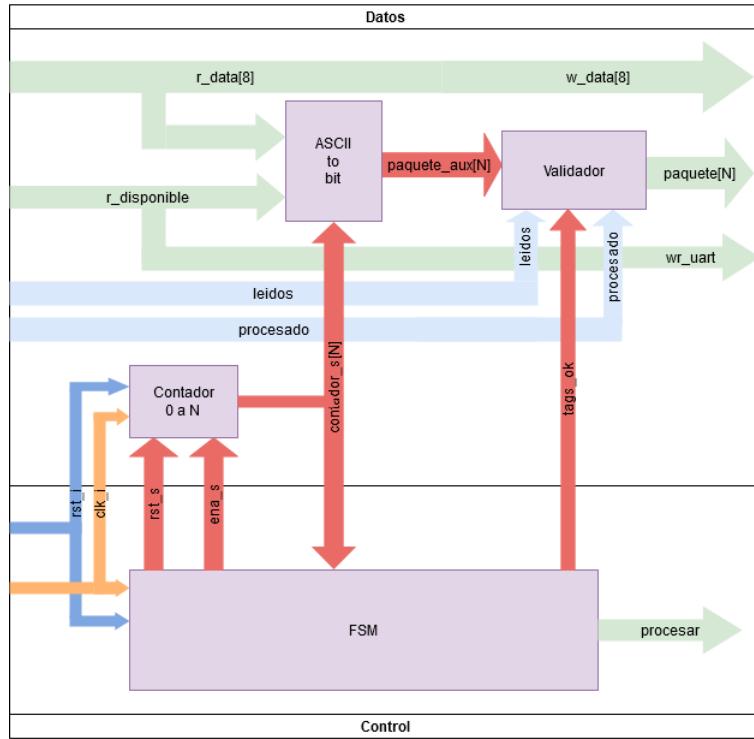


FIGURA 3.9: FSMD del módulo detector

La UART envía secuencialmente un carácter por medio de la señal *r_data* (8 bytes) y un pulso (*r_disponible*) para informar que un nuevo dato ha sido enviado, además de indicar por medio de la señal *N* la cantidad de caracteres que serán enviados.

El proceso de detección se ilustra en la figura 3.10.

En la figura 3.10 se tiene un estado inicial en el cual se espera el carácter de inicio de la trama ("<") que provoca una transición al estado de lectura. En dicho estado se recibirán hasta *N* caracteres mientras se actualiza un contador interno. Cuando el contador interno iguale la cantidad *N*, se verifica si el próximo carácter es el de fin de trama (">").

Si el carácter leído es el de final de trama, se pasa al estado final, donde el paquete es considerado válido y enviado a la próxima etapa junto con su pulso de validación del dato. Si el carácter leído es distinto, entonces se descarta toda la trama y se vuelve al inicio a la espera de otro carácter de inicio de trama, reiniciando todas las variables auxiliares.

Internamente se tienen diversas variables auxiliares para controlar si se han recibido los delimitadores y si la cantidad recibida es correcta. Eso cobra gran importancia al realizar los ensayos, porque se puede diferenciar rápidamente la fuente de posibles errores.

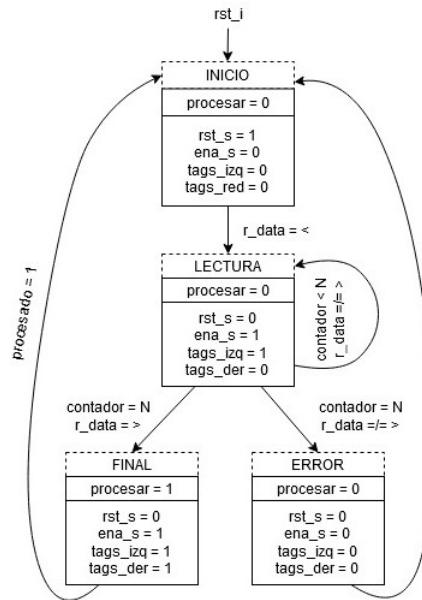


FIGURA 3.10: Estados del módulo detector

3.6.2. Módulo registro

Así como el módulo de detección realiza una conversión de caracteres (1 byte) a booleanos (1 bit), el módulo de registro (figura 3.11) hace la operación inversa. Dado un vector de elementos booleanos, el módulo debe generar M caracteres '0' o '1' según corresponda en base al vector, y enviarlos a la UART para su posterior impresión.

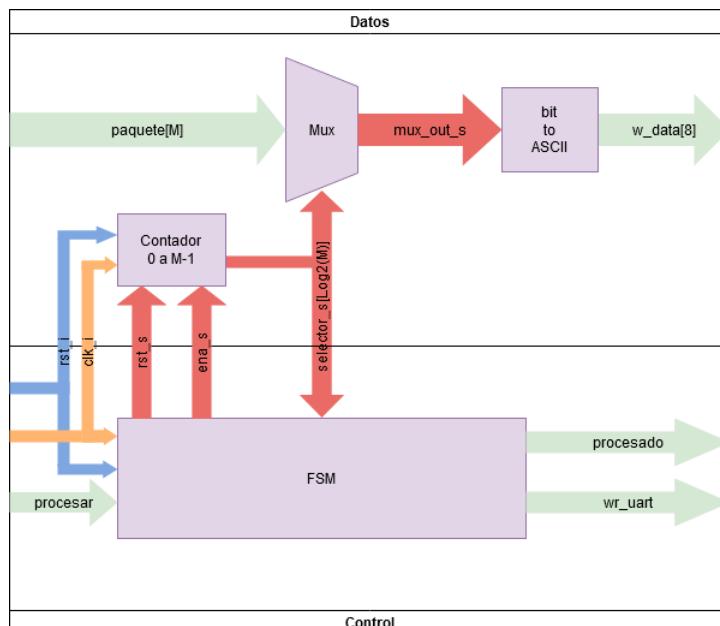


FIGURA 3.11: FSMD del módulo registro

La máquina de estados (FSM) desarrollada se encarga de generar cada dos ciclos de reloj un pulso para poder enviar secuencialmente los caracteres detectados. A la vez que el multiplexor va seleccionando cada elemento del vector paquete[M] según el valor del contador vigente, que se incrementa cada pulso del reloj interno generado.

Finalmente se envía un carácter ASCII '1' si el elemento i -ésimo del paquete es '1' lógico y un "0" si lo recibido es un '0' lógico. Junto con el carácter se envía la señal "wr_uart" para indicarle a la UART que ese dato debe ser guardado en una estructura de memoria llamada FIFO (del inglés, *First-In,First-Out*) de salida y la señal "procesado" para indicarle al módulo de detección que ya puede recibir nuevas tramas.

La máquina de estados se ilustra en la figura 3.12.

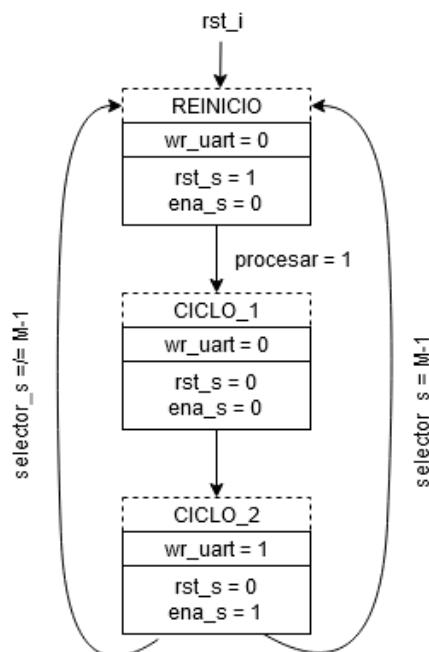


FIGURA 3.12: Estados del módulo registro

Se añadieron dos estados para generar el pulso de reloj necesario para mantener sincronizadas las tramas. Al estado de reinicio se accede cuando el contador haya recorrido todos los elementos del paquete, igualando el valor de M , la cantidad de elementos esperados.

La señal "procesar" se recibe de las etapas anteriores. Si la trama ingresada es incorrecta, o si ya fue impresa, entonces esa señal será '0' y el registro dejará de enviar datos a la UART. En caso afirmativo ("procesar" = '1') el proceso continuará hasta que la UART indique que no pueda recibir mas datos o que alguna etapa previa informe de algún error en el proceso.

3.6.3. Módulo selector

Para facilitar el proceso se añadió la posibilidad de elegir con uno de los switches del kit de desarrollo el puntear completamente el enclavamiento. En la figura 3.13 se ilustra brevemente el módulo diseñado para lograr este objetivo.

El módulo selector permite que ante un cambio en la posición del switch la salida sea una copia exacta de la entrada, lo cuál permitió diseñar todo el proceso de detección, lectura y escritura en la UART de forma independiente al enclavamiento. Mientras que con la otra posición del switch se enviaba la señal de entrada al sistema de enclavamiento y la salida era la consecuencia de haber pasado por este proceso.

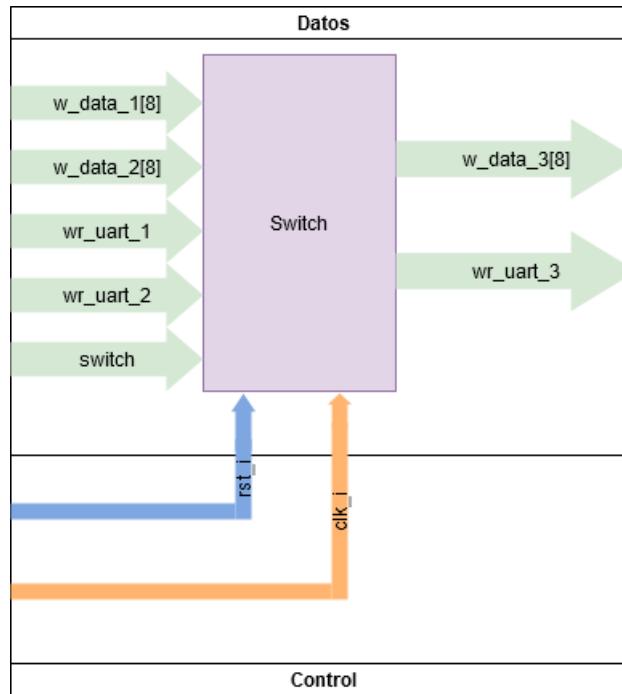


FIGURA 3.13: Diagrama de bloques del módulo selector

La implementación permite enviar la entrada a una salida u otra según la posición del switch, de forma asincrónica. Aunque no solo envía el dato sino también la ráfaga de pulsos asociada para su correcta escritura en la UART.

3.7. Módulos de adaptación a enclavamiento

Para el modelo de los estados de las barreras, circuitos de vías y máquinas se cambió la convención de la Tabla 3.1.

TABLA 3.1: Convención para elementos ferroviarios I

Estado	Barrera	Máquina de cambios	Circuito de vía
'0'	Baja	Posición normal	Ocupado
'1'	Alta	Posición inversa	Desocupado

En el caso de los semáforos, dependiendo de la cantidad de aspectos, pueden tenerse tres o cuatro estados. Por lo tanto la convención que se definió es la que se muestra en la Tabla 3.2.

Queda de manifiesto que se pueden enviar tramas conformadas únicamente por ceros y unos de forma serializada a la plataforma FPGA. De esta manera, luego

TABLA 3.2: Convención para elementos ferroviarios II

Estado	Semáforo [2 aspectos]	Semáforo [3 aspectos]	Semáforo [4 aspectos]
'00'	Rojo	Rojo	Rojo
'01'	Amarillo	Amarillo	Amarillo
'10'	-	-	Doble amarillo
'11'	-	Verde	Verde

se podría procesar la trama e ir dividiendo cada porción de datos en información a la zona que le corresponda.

Una forma de organizar la trama de entrada fue la adoptada en la Tabla 3.3. En la misma, se envían en orden todos los estados de ocupación, seguidos de todos los estados de los semáforos (intercalando el bit mas significativo con el menos significativo), los estados de las barreras y finalmente los estados de las máquinas de cambios.

TABLA 3.3: Trama de entrada [N]

Ocupación	Semáforos	Barreras	Cambios
-----------	-----------	----------	---------

La trama de salida se definió que sea muy similar, salvo que los estados de ocupación no serán un dato a transmitir ya que son de solo lectura y se asume que el mismo no ha cambiado durante el tiempo de procesamiento. La trama se definió en la Tabla 3.4.

TABLA 3.4: Trama de salida [M]

Semáforos	Barreras	Cambios
-----------	----------	---------

El módulo de enclavamientos espera como entradas las señales de estado de cada elemento en paralelo. Pero, como ya se definió en las Tablas 3.3 y 3.4, la entrada del sistema es serializada. Por lo tanto, es necesario tener dos módulos que adapten ambas etapas:

- Módulo separador: encargado de convertir las entradas seriales en señales en paralelo y distribuir los datos según donde sean requeridos.
- Módulo mediador: encargado de serializar las señales en paralelo que genera el enclavamiento, según el orden requerido.

3.7.1. Módulo separador

El módulo separador diseñado se puede ver en la figura 3.14. Este debe recibir el vector de elementos booleanos de tamaño N ("paquete[N]") y la orden de que debe procesarlo ("procesar").

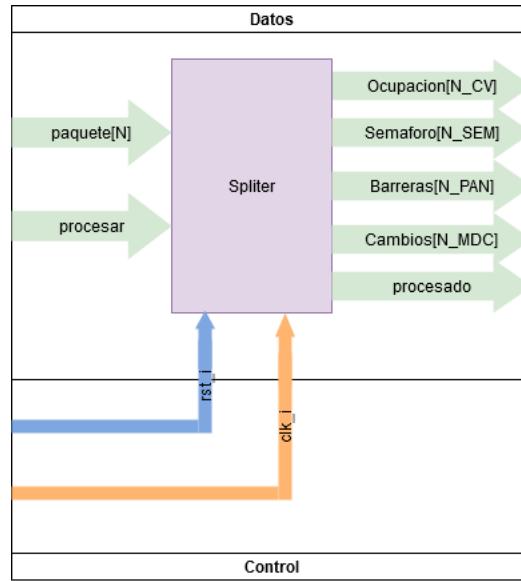


FIGURA 3.14: Diagrama de bloques del módulo separador

A continuación, como el generador de código sabe previamente la cantidad de cada uno de los elementos ferroviarios, puede descomponer los elementos del vector paquete[N] en vectores más pequeños según corresponda.

3.7.2. Módulo mediador

El módulo mediador diseñado, que se puede visualizar en la figura 3.15, tiene como función volver a generar el vector de elementos booleanos que ya han sido procesados por el enclavamiento.

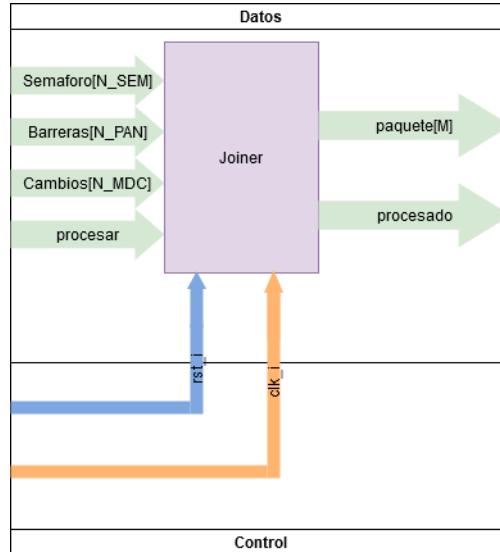


FIGURA 3.15: Diagrama de bloques del módulo mediador

El módulo mediador recibe la salida del enclavamiento y la orden de generar el paquete ("procesar"). Una vez que el vector ("paquete[M]") ha sido creado, se envía una variable de control ("procesado") a la siguiente etapa para poder coordinar todo el sistema con un solo reloj.

3.8. Interfaz de comunicación Python

El algoritmo analizador de redes ejecuta la conexión de la consola utilizada con la plataforma FPGA. Presenta al usuario un menú de opciones para ocupar/deocupar ciertos tramos de la vía, cambiar el aspecto de ciertos semáforos, pedir que una barrera suba o baje o incluso modificar la posición de una máquina de cambios.

En la figura 3.16 se ilustra el menú diseñado para ingresar los comandos al sistema. Ya que existe una interfaz mucho mas avanzada desarrollada por otra parte del equipo de investigación en UTN Haedo, no se ha invertido demasiado tiempo en tener una interfaz propia para realizar pruebas a mayor escala.

```
conexión al puerto serie -----
Ingrese el puerto serie, ejemplos: /dev/ttyUSB0 , COM1
o bien ingrese 'l' para /dev/ttyUSB0, o 'w' para COM9
w
COM9 abierto.

Comandos disponibles -----
'h' (help) Imprime esta lista de comandos.
'q' (quit) Salir del programa.
'l' Insertar tren
'r' Remover tren
'm' Modificar aspecto de semáforo
'c' Modificar posición de la máquina de cambios
'>' Avanzar todos los trenes
'<' Retroceder todos los trenes
```

FIGURA 3.16: Menú de opciones para comunicarse con el sistema-

Todos los cambios repercuten en el grafo mostrado en pantalla (figura 3.17), que cambiará los colores de los semáforos y de los nodos para representar la ocupación del tren; así como también el color de las aristas para indicar la posición de los cambios.

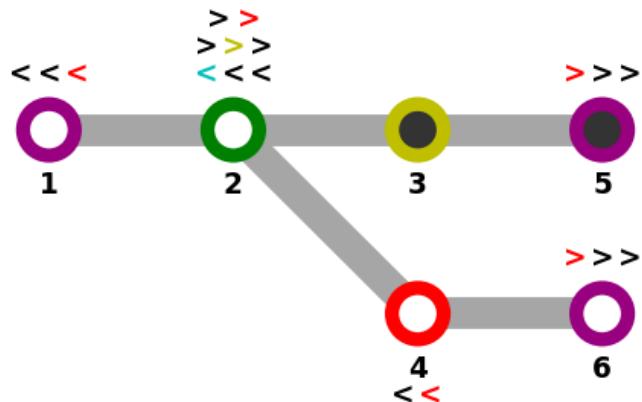


FIGURA 3.17: Grafo modificado en tiempo real por la FPGA.

De esta forma es posible simular el comportamiento de toda la topología: posición de cada semáforo, aspectos de las señales y su orientación, clasificación de cada nodo, posición de las máquinas de cambios, etc. Esto permite verificar con mayor facilidad que el comportamiento sea el esperado.

En el siguiente capítulo se presentarán los ensayos y resultados que permiten analizar el funcionamiento del proceso automatizado de implementación desarrollado.

Capítulo 4

Ensayos y Resultados

4.1. Verificación del análisis automático de redes ferroviarias

Para verificar el correcto funcionamiento del análisis automático de las redes ferroviarias se generaron diversas topologías representativas, tales como: estaciones simples, estaciones complejas, bypass, playa de maniobras y aleatorias. Para cada una de ellas se generó automáticamente una tabla de enclavamientos, las cuales fueron comparadas con tablas de enclavamientos realizadas de la forma tradicional por el Ingeniero Ramiro Ghignone de la UTN Facultad Regional Hae-do.

A modo de ejemplo, en la figura 4.1 se presenta una topología creada aleatoriamente con diversos elementos tales como cambios en cruceta (nodos 14 a 17), bypass (entre los nodos 2-5 y 21-22) y ramificaciones complejas (nodos 2, 5 y 9) de una playa de maniobras hacia un hipotético taller ferroviario (nodo 13).

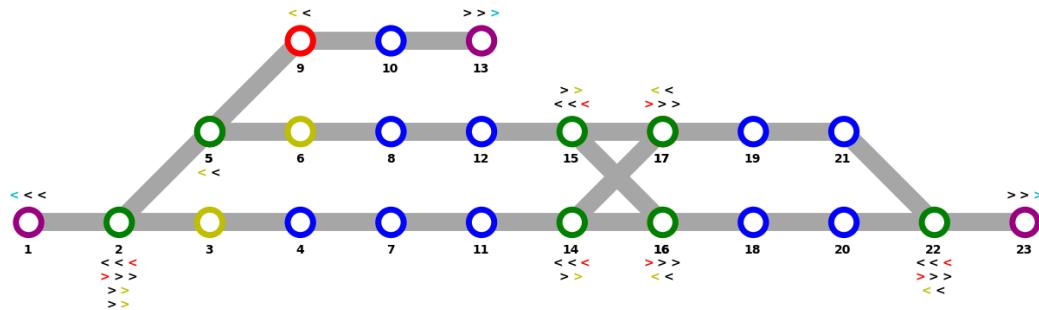


FIGURA 4.1: Topología aleatoria generada para probar el análisis automático de redes ferroviarias.

La tabla de enclavamientos generada automáticamente mediante el analizador de redes ferroviarias desarrollado se presenta en la Tabla 4.1. Ésta contiene el listado de todas las rutas, los semáforos que intervienen, la secuencia de nodos que abarca cada ruta y el sentido de la ruta.

Paralelamente, el ingeniero Ramiro Ghignone generó de forma manual la tabla de enclavamientos para la misma topología, que se presenta en la Tabla 4.2.

TABLA 4.1: Tabla de enclavamientos generada automáticamente

Ruta	Semáforo inicial	Semáforo final	Secuencia	Sentido
1	2	1	2-1	<
2	2	14	2-3-4-7-11-14	>
3	2	15	2-5-6-8-12-15	>
4	2	13	2-5-5-9-10-13	>
5	5	1	5-2-1	<
6	9	1	9-5-5-2-1	<
7	14	22	14-16-18-20-22	>
8	14	21	14-17-19-21	>
9	15	21	15-17-19-21	>
10	15	22	15-16-18-20-22	>
11	16	2	16-14-11-7-4-3-2	<
12	16	5	16-15-12-8-6-5	<
13	17	5	17-15-12-8-6-5	<
14	17	2	17-14-11-7-4-3-2	<
15	21	23	21-22-23	>
16	22	16	22-20-18-16	<
17	22	17	22-21-19-17	<
18	22	23	22-23	>

TABLA 4.2: Tabla de enclavamientos construida manualmente

Ruta	Semáforo inicial	Semáforo final	Secuencia	Sentido
1	2	1	2-1	<
2	5	1	5-2-1	<
3	9	1	9-5-5-2-1	<
4	16	2	16-14-11-7-4-3-2	<
5	17	2	17-14-11-7-4-3-2	<
6	16	5	16-15-12-8-6-5	<
7	17	5	17-15-12-8-6-5	<
8	2	13	2-5-5-9-10-13	>
9	2	14	2-3-4-7-11-14	>
10	2	15	2-5-6-8-12-15	>
11	22	16	22-20-18-16	<
12	22	17	22-21-19-17	<
13	14	21	14-17-19-21	>
14	15	21	15-17-19-21	>
15	14	22	14-16-18-20-22	>
16	15	22	15-16-18-20-22	>
17	21	23	21-22-23	>
18	22	23	22-23	>

Se observa que ambas tablas son idénticas, salvo el orden de las rutas, que es irrelevante para el funcionamiento del sistema. Por lo tanto se concluye que la construcción automática de la tabla de enclavamientos es consistente con la construcción manual. Esta consistencia se comprobó en todos los casos en que comparó el resultado del análisis automático con el análisis realizado en forma manual.

4.2. Verificación de la implementación del nodo

La generación automática de código instancia, dentro del bloque "red", diferentes tipos de nodos, tal como se explicó en la sección 3.3. A la hora de realizar los ensayos de verificación de la implementación del nodo se utilizó como bloque de prueba el nodo mas completo, que corresponde al nodo perteneciente al tramo de vía que incluye la máquina de cambios. De esta forma se tiene la mayor cantidad de semáforos, interacciones, vecinos y comportamientos posibles.

4.2.1. Testbench del módulo nodo

Se diseñó un testbench para probar de forma exhaustiva todas las condiciones posibles de funcionamiento, definidas en la Tabla 4.3, además de la posición del cambio de vías próximo.

TABLA 4.3: Combinaciones posibles

Tramo propio	Tramo vecino	Aspecto vecino
Ocupado	Ocupado	Rojo
Ocupado	Ocupado	Amarillo
Ocupado	Ocupado	Verde
Ocupado	Libre	Rojo
Ocupado	Libre	Amarillo
Ocupado	Libre	Verde
Libre	Ocupado	Rojo
Libre	Ocupado	Amarillo
Libre	Ocupado	Verde
Libre	Libre	Rojo
Libre	Libre	Amarillo
Libre	Libre	Verde

Los semáforos asociados al nodo deberán pasar a un aspecto rojo cuando la posición del cambio o la ocupación de su sección o la sección vecina impidan el movimiento del tren sin colisionar o descarrillar. Para las demás combinaciones, el aspecto dependerá de la ocupación y aspectos presentados por sus vecinos, para presentar el doble recubrimiento exigido por las normas ferroviarias, tal como se explicó en la sección 1.3.3.

4.2.2. Resultados obtenidos

En la figura 4.2 se muestra el resultado obtenido. Siempre que el tramo está ocupado el semáforo cambia su aspecto a rojo. Si el tramo analizado está desocupado se desprenden varios casos:

- Si el vecino está ocupado: el semáforo analizado estará en aspecto rojo.
- Si el vecino está desocupado:
 - Si el semáforo vecino está en rojo: el semáforo analizado estará en aspecto amarillo.

- Si el semáforo vecino está en amarillo: el semáforo analizado estará en aspecto verde.

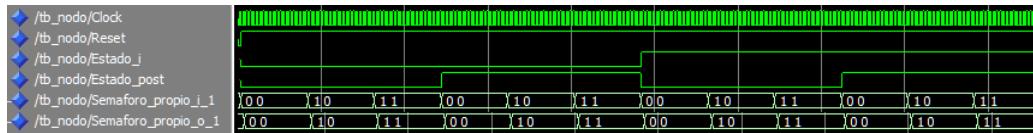


FIGURA 4.2: Simulación de un nodo.

Dado que se validó el nodo genérico que incluye todos los posibles estados que pueden tener los nodos más simples, se considera que el ensayo fue exitoso.

4.3. Verificación de la implementación de la máquina de cambios

El módulo de la máquina de cambios, incluido dentro del bloque "red", tiene como función conectar al estado de ocupación del nodo anterior con el del nodo posterior o al estado de ocupación del nodo anterior con el del nodo desvío según la posición del cambio de vías, como se indica en la Tabla 4.4.

TABLA 4.4: Combinaciones posibles

Posición del cambio	Estado anterior	Estado posterior	Estado desvío
Normal	Ocupado	Ocupado	Ocupado
Normal	Ocupado	Ocupado	Libre
Normal	Ocupado	Libre	Ocupado
Normal	Ocupado	Libre	Libre
Normal	Libre	Ocupado	Ocupado
Normal	Libre	Ocupado	Libre
Normal	Libre	Libre	Ocupado
Normal	Libre	Libre	Libre
Inversa	Ocupado	Ocupado	Ocupado
Inversa	Ocupado	Ocupado	Libre
Inversa	Ocupado	Libre	Ocupado
Inversa	Ocupado	Libre	Libre
Inversa	Libre	Ocupado	Ocupado
Inversa	Libre	Ocupado	Libre
Inversa	Libre	Libre	Ocupado
Inversa	Libre	Libre	Libre

4.3.1. Testbench del módulo de la máquina de cambios

Se diseñó un testbench para probar de forma exhaustiva todas las condiciones posibles de funcionamiento definidas en la Tabla 4.4 para una topología de medio bypass con un único cambio, para simplificar la presentación de los resultados.

4.3.2. Resultados obtenidos

En la figura 4.3 se visualizan los resultados del ensayo. Cuando la posición de la máquina de cambios es normal entonces el estado anterior y el posterior están comunicados y cada uno puede ver tanto la ocupación como los semáforos del otro. Cuando la posición de la máquina de cambios es inversa entonces los estados vinculados son el anterior y el estado del nodo perteneciente al desvío.

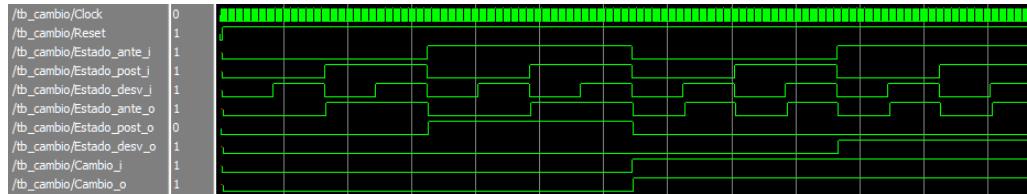


FIGURA 4.3: Simulación de la máquina de cambios.

El nodo de cambios funciona de manera sincrónica y se comprobó que vincula correctamente los estados de los nodos involucrados. A diferencia de los bloques de nodos donde todas las implementaciones tienen la misma cantidad de funciones que el ensayado o menor, todos los cambios tienen las mismas funcionalidades sin ninguna limitación, por lo que este ensayo es representativo del conjunto de máquinas de cambios y es suficiente para validar su correcto funcionamiento.

4.4. Verificación de la implementación de la UART

En el diseño del sistema se contempló utilizar uno de los switches de la placa de desarrollo para poder puentejar todo el enclavamiento y probar el funcionamiento de la UART sin el efecto del enclavamiento. En esta sección se realizó el ensayo con el switch en la posición en la cual la salida recibe el mensaje de la entrada directamente, sin pasar por ningun otro bloque.

4.4.1. Testbench del módulo UART

Se diseñó un testbench en el cual se inyecta la entrada de la UART directamente a la salida de la UART, teniendo una prueba de bucle cerrado. Todos los mensajes ingresados, siempre que sean válidos, pasarán a la salida para ser publicados en la terminal desde donde se originaron.

4.4.2. Resultados obtenidos

En la figura 4.4 se presentan los datos obtenidos en el ensayo. Se puede ver que las tramas inyectadas son presentadas idénticamente en la salida, con un pequeño retardo temporal. Además se puede apreciar el tren de pulsos que envía la UART de un extremo al otro del módulo, primero para indicar la lectura de la FIFO de recepción y luego para indicar la escritura de la FIFO de transmisión.

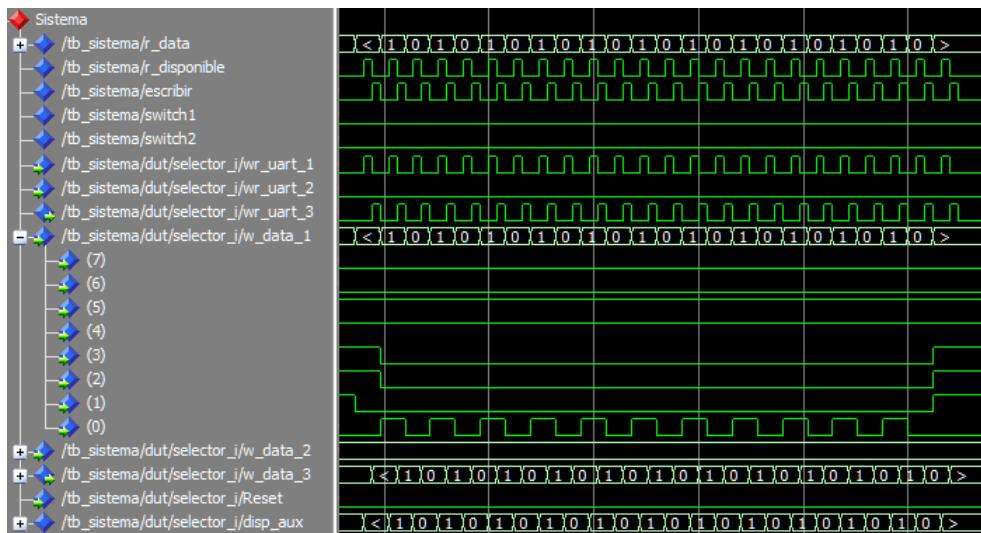


FIGURA 4.4: Simulación de la UART.

Solo después de superado este ensayo se pudo avanzar con la inclusión de los demás módulos. Esto se debe a que no tenía sentido implementar sistemas complejos sin la certeza de que la transmisión y recepción de datos de la computadora a la plataforma era fiable.

4.5. Verificación de la implementación del detector

El bloque detector tiene como función descartar todas las tramas que no cumplan con el requisito definido de poseer tag inicial y final, además de que el mensaje debe tener una cantidad de elementos indicado por la UART.

Para probar el sistema se deberán enviar:

- Tramas con tags incorrectos
- Tramas con ausencia de alguno o ambos tags
- Tramas con menos datos de los indicados
- Tramas con mas datos de los indicados
- Tramas correctas de elementos nulos, con un solo elemento válido en todas las posiciones posibles.

4.5.1. Testbench del módulo detector

Se diseñó un testbench que inyecta las señales necesarias para probar la detección de las tramas correctas y el descarte de las incorrectas. Además deberá enviar las señales de activación/desactivación de las próximas etapas, así como recibir las señales inhibidoras necesarias. Por una cuestión de espacio se recortó parte del algoritmo presentado.

4.5.2. Resultados obtenidos

En la figura 4.5 se puede visualizar una parte de los resultados del ensayo. Este ensayo corresponde al envío de cuatro paquetes distintos y el módulo va alternando los estados según el evento ocurrido.

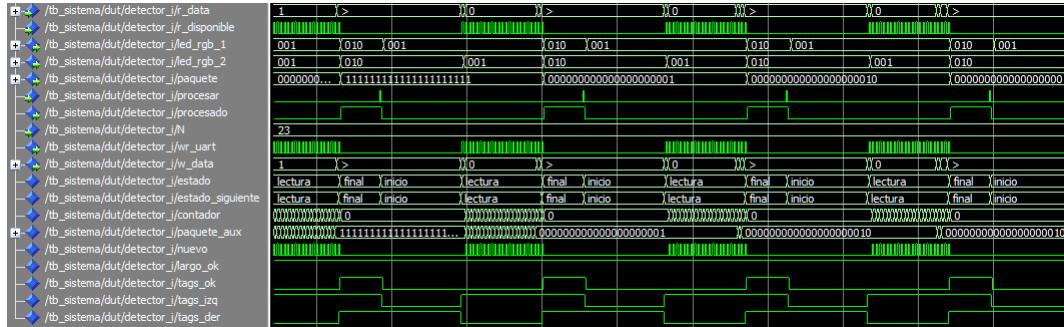


FIGURA 4.5: Simulación del detector.

Cuando se recibe el tag inicial ('<') el sistema pasa al estado de lectura y debe recibir la cantidad de elementos indicada por la señal N (en este caso 23). El elemento número 24 leído deberá ser el tag final('>'), que al recibirla se pasa al estado final (en caso contrario pasa al estado error) a la espera de que la transmisión termine.

Para la transmisión, cada carácter (byte) leído deberá ser convertido en un booleano (bit) para ser empaquetado en un vector de booleanos. Esto puede verse en la señal auxiliar paquete_aux que luego de validada toda la trama se envía por w_data al próximo bloque, junto con el tren de pulsos wr_uart para indicar el ciclo de lectura de la señal.

El ensayo fue exitoso y todas las tramas listadas como erróneas al comienzo del ensayo fueron descartadas de acuerdo a lo previsto.

4.6. Verificación de la implementación del enclavamiento

Utilizando el mismo algoritmo que para validar la UART, pero con el switch en la posición contraria, se pueden enviar las señales del módulo detector al enclavamiento. De esta forma se pueden probar los bloques separador, enclavamiento y mediador.

4.6.1. Testbench del módulo enclavamiento

Se diseñó un testbench para ensayar los módulos mencionados. En este caso se inyectan diferentes señales para comprobar que el módulo separador puede justamente separar las señales en vectores manejables. Luego de ser procesados por el enclavamiento, las señales son enviadas al mediador para volver a unificarlas en una sola señal. Finalmente el registro convierte cada elemento de la señal en un carácter imprimible que será enviado a la UART.

4.6.2. Resultados obtenidos

En la figura 4.6 se puede visualizar como la trama principal es separada en los diferentes vectores que serán recibidos por el enclavamiento. La separación es exitosa al ser un módulo de cuya dificultad radicaba en su automatización, mas

no en su funcionamiento. El haber separado esta funcionalidad del resto del enclavamiento fue beneficioso para todo el diseño.

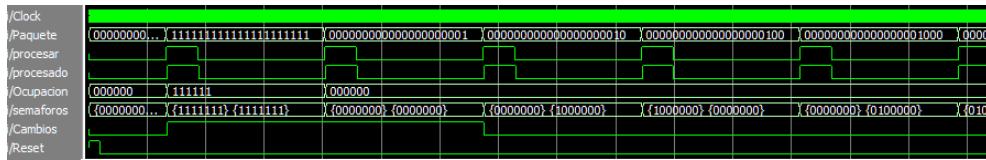


FIGURA 4.6: Simulación del separador.

En la figura 4.7 se visualiza el comportamiento del enclavamiento ante las señales que fueron enviadas por el separador. En base al aspecto de los semáforos relevados en campo (sem_s_i) y a la ocupación de los tramos de vías (cv_s) el enclavamiento determina que el aspecto de los semáforos para que no ocurran colisiones ni descarrilamientos es el que indica en la señal sem_s_o.

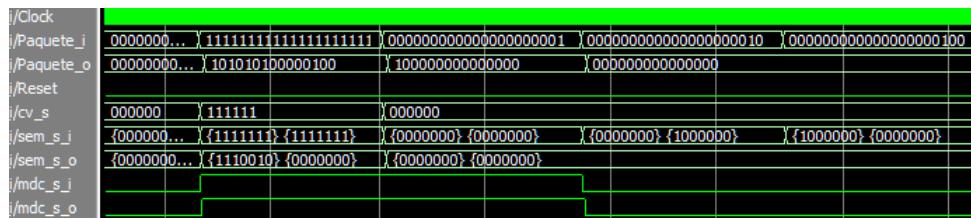


FIGURA 4.7: Simulación del enclavamiento.

En la figura 4.8 se presenta el proceso inverso del módulo mediador, donde las señales del enclavamiento son combinadas en una única señal.

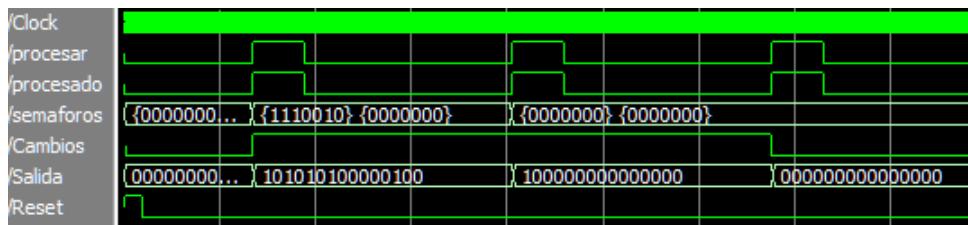


FIGURA 4.8: Simulación del mediador.

Los módulos separador, enclavamiento y mediador son parte de un módulo mayor, al funcionar los tres correctamente se ha comprobado que también funciona de forma el bloque que los integra.

4.7. Verificación de la implementación del registro

El módulo de registro tiene la función de recibir una señal de M elementos booleanos y devolver M caracteres que correspondan al valor del vector en cuestión. Además de generar un tren de pulsos para coordinar la correcta escritura de los caracteres en la UART para su posterior impresión en la consola.

4.7.1. Testbench del módulo registro

Se diseñó un testbench en el cual se ingresan diferentes tramas y se comprueba que a la salida se obtenga la secuencia de caracteres esperada.

4.7.2. Resultados obtenidos

En la figura 4.9 se visualiza el resultado del ensayo, para una trama aleatoria.

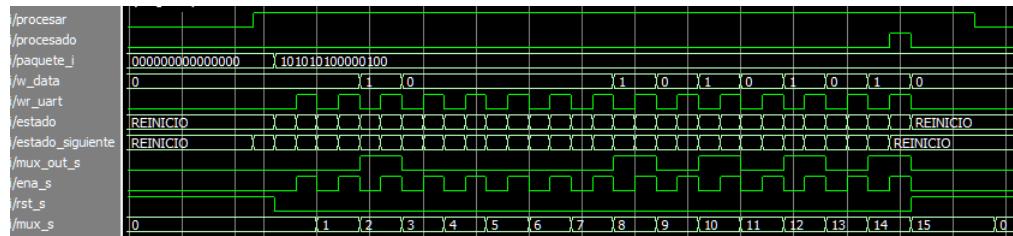


FIGURA 4.9: Simulación del registro.

Cuando la señal procesar se encuentra en alto, la señal paquete_i se invierte y en cada ciclo ena_s se envía el carácter equivalente al elemento del paquete_i en la posición mux_s. A su vez la señal ena_s se envía a la UART a través de wr_uart para indicarle el ciclo de escritura en la FIFO.

Al finalizar la operación se envía la señal procesado para indicarle al bloque detector que el paquete ingresado ya ha sido enviado, de forma tal de iniciar otro ciclo de lectura y procesamiento. De esa forma la señal procesar pasa a un estado bajo a la espera de dicha lectura.

El bloque se desempeñó tal como fue diseñado y responde con una latencia muy baja de 2 ciclos de reloj. Por lo que tendríamos un espaciado entre tramas de hasta un mínimo de 16 nanosegundos, lo cual es muy positivo a la hora de tener un sistema que debe responder de forma rápida a los cambios en el exterior.

4.8. Verificación de la implementación del selector

Al módulo selector pueden llegar señales por dos caminos: directamente desde el módulo detector la señal de entrada sin procesar junto con su tren de pulsos asociado o las mismas señales pero procesadas previamente por el sistema de enclavamiento. Es tarea del módulo selector el enviar a la UART las señales de una u otra fuente, según la posición del switch.

4.8.1. Testbench del módulo selector

Se diseñó un testbench que inyecta dos señales idénticas, una mientras el switch se encuentra en posición alta y otra mientras se encuentra en posición baja.

4.8.2. Resultados obtenidos

En la figura 4.10 se visualiza el comportamiento del sistema con el switch en estado alto. Se puede comprobar que ambas señales llegan al módulo: w_data_1 y wr_uart_1 son la señal con información y el tren de pulsos que corresponden a no procesar la señal; mientras que w_data_2 y wr_uart_2 son las mismas pero luego de haber sido procesadas por el sistema de enclavamiento.

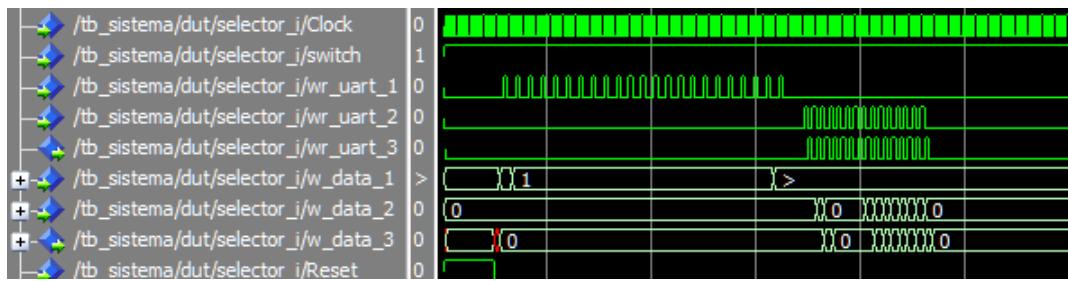


FIGURA 4.10: Simulación del selector.

Las señales `w_data_3` y `wr_uart_3` son la salida del bloque selector, que se puede apreciar copian exactamente a `w_data_2` y `wr_uart_2`. Cuando el switch se encuentra en estado bajo la salida copiará a `w_data_1` y `wr_uart_1`.

4.9. Prueba de integración: topología bypass

Finalmente se realizó una prueba de integración sobre una topología bypass, que se muestra en la figura 4.11.

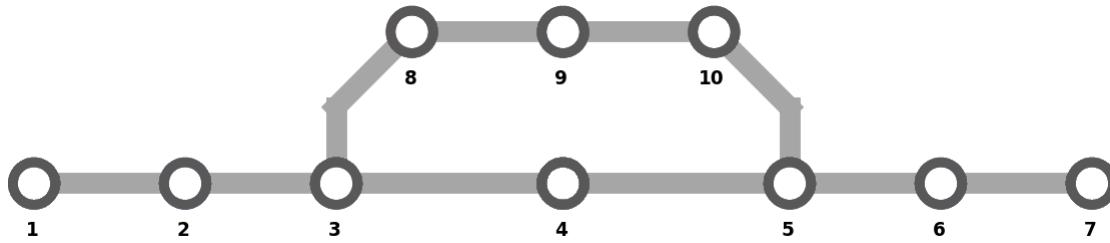


FIGURA 4.11: Topología bypass sin procesar.

Una vez que el analizador de redes ferroviarias analiza la topología, se clasifican sus nodos y se determinan los semáforos asociados. El resultado del análisis se presenta en la figura 4.12.

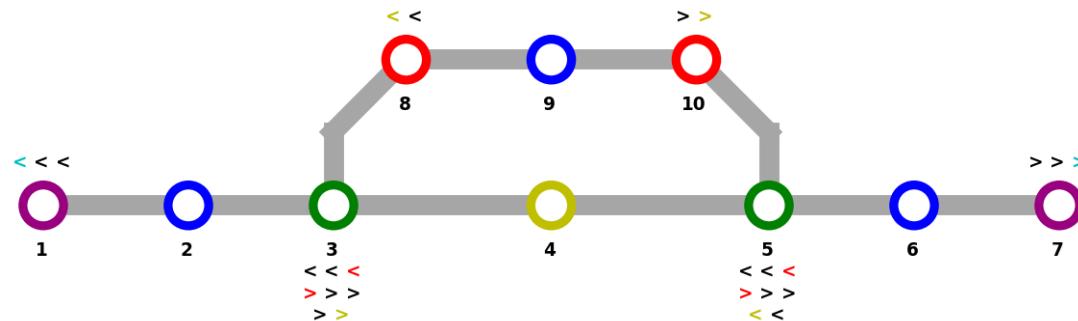


FIGURA 4.12: Topología bypass procesada.

El programa utiliza todos los semáforos creados para generar todas las rutas soportadas por la topología. Además, sólo a los fines de poder hacer la comprobación manual, genera la tabla de enclavamientos, tal como se muestra en la Tabla 4.5.

En la Tabla 4.5 pueden verse todas las ocho rutas posibles que permite este tipo de topología. Por ejemplo, la ruta 1 permite desplazar la formación desde el nodo 3

TABLA 4.5: Tabla de enclavamientos de la topología bypass.

Ruta	Semáforo inicial	Semáforo final	Secuencia	Sentido
1	3	1	3-2-1	<
2	3	5	3-4-5	>
3	3	10	3-8-9-10	>
4	5	3	5-4-3	<
5	5	8	5-10-9-8	<
6	5	7	5-6-7	>
7	8	1	8-3-2-1	<
8	10	7	10-5-6-7	>

hasta el nodo 1, pasando por el nodo 2. El resto de las rutas planteadas se pueden analizar de la misma manera.

Se generan los archivos de VHDL que describen el sistema, como se muestra en la figura 4.13.

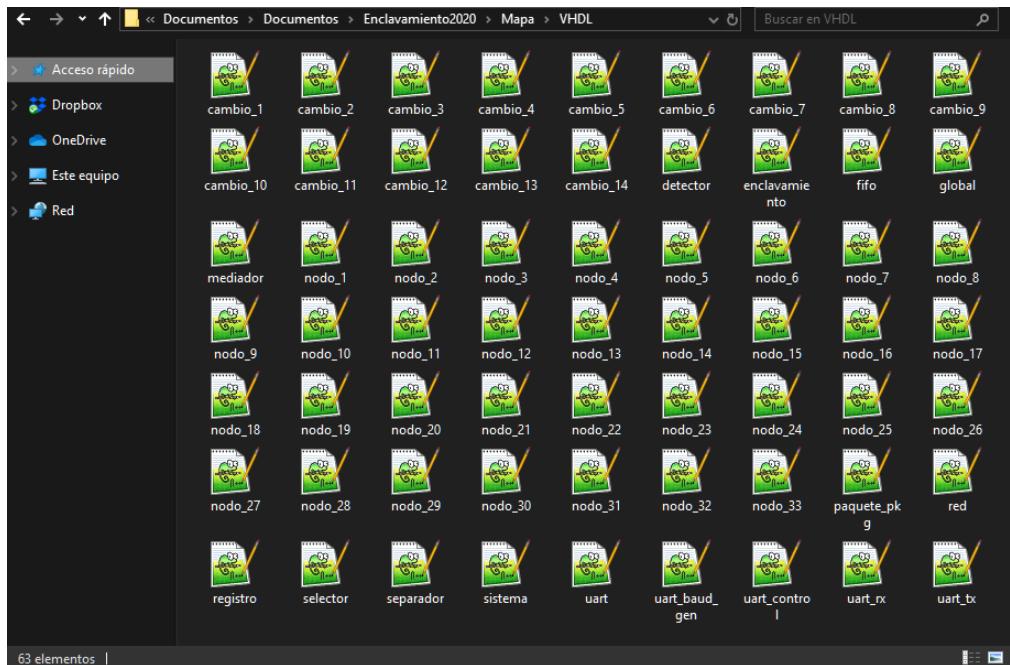


FIGURA 4.13: Archivos .VHDL generados.

En base a dichos archivos .vhdl se crean todos los bloques necesarios para implementar el sistema en la plataforma FPGA. A modo de ejemplo se presenta en la figura 4.14 las conexiones del bloque "red". En el mismo se muestran diez bloques de nodos y dos de máquinas de cambios.

Según la clasificación del analizador de redes ferroviarias, los bloques de nodos tendrán diferentes tamaños. Así, por ejemplo, los nodos que incluyen las máquinas de cambios (3 y 5) tendrán un tamaño mucho mayor que los nodos simples (2, 6 y 9), ya que su complejidad es mayor al incluir el manejo de los semáforos y circulación y los de maniobra.

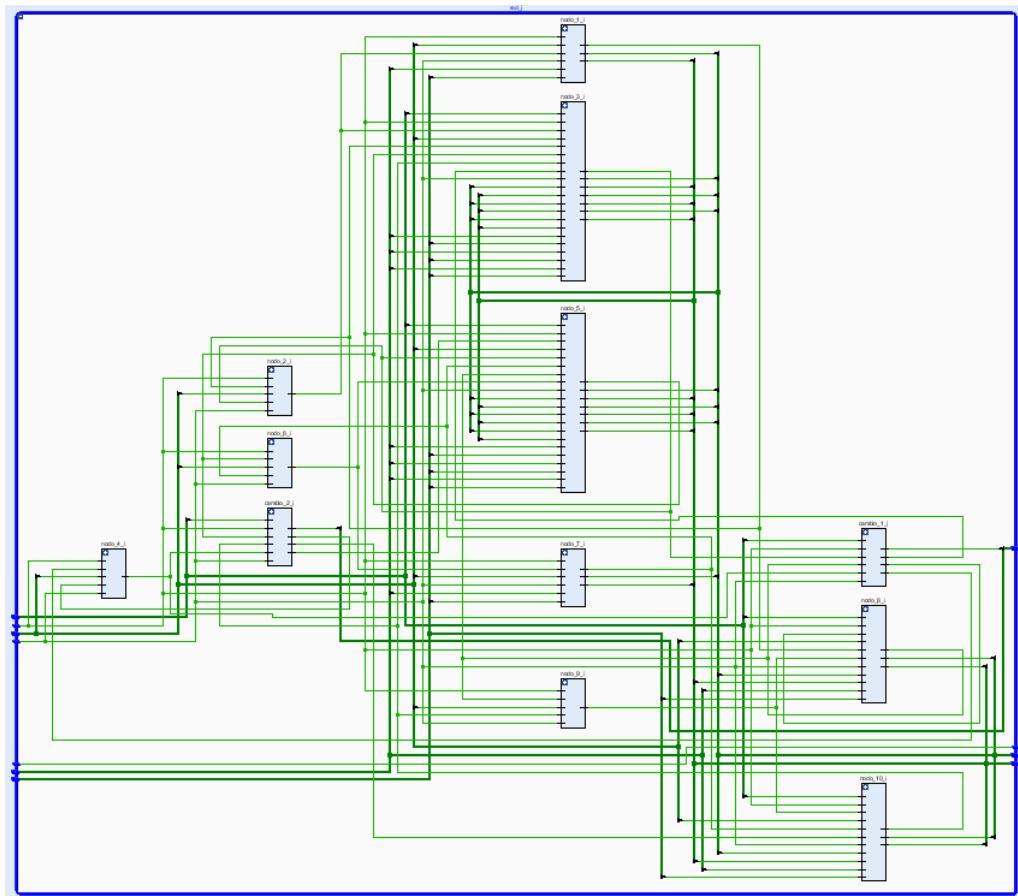


FIGURA 4.14: Módulo de red generador.

La cantidad de conexiones es tan grande que queda de manifiesto la complejidad de realizar esta labor de forma manual. De esta manera, se aprecia la ventaja del desarrollo del analizador de redes ferroviarias, incluyendo la automatización de la generación de código, lo cual es una ventaja a la hora de abordar topologías mas complejas. Ya que la implementación se lleva a cabo sin elevar el tiempo de desarrollo ni incrementar las posibilidades de introducir errores humanos.

Para analizar el funcionamiento del sistema de enclavamiento para la configuración bypass se establece una conexión entre la computadora y la plataforma FPGA por medio del analizador de redes ferroviarias. De esta forma es posible solicitar en la computadora distintas rutas y visualizar a través de una interfaz cómo es el comportamiento del sistema de enclavamiento para distintas condiciones de ocupación y estados de las máquinas de cambio.

A modo de ejemplo en la figura 4.15 se muestra el estado de todas las señales de acuerdo a lo que indica el sistema de enclavamiento implementado en la FPGA para el caso en que se considera que únicamente el nodo 10 está ocupado y ambas máquinas de cambios están en posición reversa. Las aristas con un tono mas claro entre los nodos 3 y 4, y 4 y 5 representan la no conexión entre ambos tramos de vías, debido a la posición del cambio.

Como en el enfoque funcional no existe el concepto de ruta, no hay una trayectoria definida por la que la formación circulará. En cambio, los semáforos indicarán que acciones estarán permitidas y cuáles estarán prohibidas.

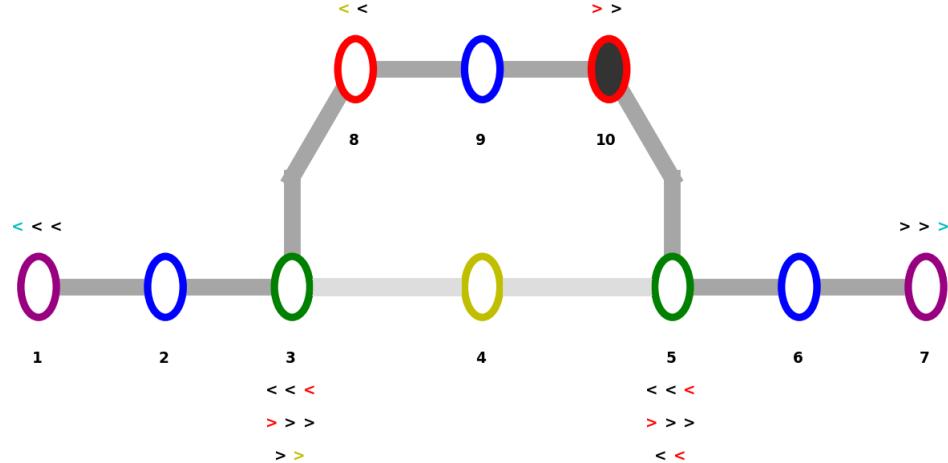


FIGURA 4.15: Bypass con circulación inversa y nodo 10 ocupado.

A modo de recordatorio, las acciones que el enclavamiento no debe permitir son aquellas que conlleven al descarrilamiento de la formación y a colisiones entre formaciones. Las acciones no permitidas serán indicadas con aspectos rojos en los semáforos, mientras que todas las demás acciones están permitidas, indicadas con semáforos amarillos o verdes.

Del análisis de la figura 4.15 se concluye que la formación que ocupa el nodo 10 se encuentra protegida de colisiones desde el nodo 9, ya que el semáforo de ingreso al nodo 10 presenta un aspecto rojo. También se encuentra protegida de colisiones desde el nodo 5 al tener el semáforo de maniobra del nodo 5 en aspecto rojo.

No obstante, la formación que se encuentra en el nodo 10 tiene permitido tanto avanzar en sentido 10-5-6-7 como en sentido 10-9-8-3-2-1 ya que ningún semáforo se lo impide. En ambos casos la formación puede abandonar la red por medio de los nodos 7 y 1, que presentan semáforos con aspecto verde. Es importante destacar que los semáforos de tres aspectos de los nodos 3 y 5 solo impiden el ingreso desde los nodos laterales y no impiden la salida. Por lo tanto, la formación no está impedida de acceder al nodo 3 desde el nodo 8, de modo tal que ésta pueda continuar su recorrido hacia el nodo 2 y análogamente para la secuencia 10-5-6.

Otra de las acciones no permitidas es circular desde el nodo 3 o el nodo 5 hacia el nodo 4, ya que la posición del cambio desconecta ambos tramos de vías.

Habiendo analizado todas las situaciones del ejemplo de la figura 4.15, se concluye que todas las situaciones peligrosas han sido correctamente detectadas y prohibidas por el sistema de enclavamiento implementado en la FPGA, según se pudo observar mediante la interfaz de visualización desarrollada en Python. De esta forma se permite solamente la circulación segura de la formación en los dos sentidos posibles.

Para el ejemplo de la figura 4.15 se probaron todas las combinaciones de ocupaciones y posiciones de cambios posibles y en todos los casos el comportamiento fue el esperado. Además se hicieron pruebas en topologías más complejas, como por ejemplo la presentada a comienzo del capítulo 4, y en todos los casos se obtuvo el comportamiento esperado.

De esta forma concluye este capítulo, en el cual se presentaron los ensayos realizados y los resultados obtenidos.

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas y los logros alcanzados, además de un resumen de los elementos del proyecto que no se incluyeron en la memoria.

5.1. Resultados obtenidos

A lo largo de todo el proyecto se han visitado una gran cantidad estaciones, talleres, oficinas y áreas de pruebas. Se ha establecido relación con decenas de profesionales del área que, con sus conocimientos y experiencias, han sabido aportar a la resolución del problema abordado. Esto, combinando tanto el esfuerzo propio como la ayuda de los integrantes del CONICET-GICSAFe, permitió implementar de forma exitosa un prototipo del sistema de enclavamiento electrónico.

Los conocimientos en el área de las FPGAs sirvieron para materializar los diseños planteados, llegando a obtener no solo un sistema seguro y funcional, sino también escalable, y además la implementación de un sistema que brinda la generación automática de la solución.

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 cualquiera sea la locación.
- Diseño e implementación de un generador de tramas para comandar la plataforma FPGA desde Python, que facilita el testeo de los sistemas generados.
- Publicación de artículos en IEEE Latin America y el Congreso Argentino de Sistemas Embebidos 2019 [36].
- Se completó con éxito una beca de Maestría UBACyT.
- Se obtuvo una beca de doctorado en desarrollo estratégico de CONICET 2020-2025 en la que se continuará el desarrollo, abordando los aspectos relativos a redundancia y diversidad, y además se espera probar la solución desarrollada en una locación real.

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. Sin embargo, 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 desarrollado, con el fin de abarcar topologías mas complejas que las presentadas.
- Integración con la interfaz gráfica desarrollada en UTN Facultad Regional Haedo [37].
- Realización de pruebas en paralelo con la estación Olivos, gracias al desarrollo del sistema modular del Mg. Ing. Lucas Dórdolo [38].
- Ampliación de la batería de ensayos, para abarcar mas casos en topologías mas complejas.
- Automatización de los ensayos, para evitar realizar pruebas de fuerza bruta exhaustivamente.
- Ampliación del generador de tablas de enclavamiento, para abarcar mas condiciones de funcionamiento.
- Aplicación de técnicas de redundancia y diversidad por votación para aumentar la seguridad del sistema.
- Realización de pruebas en una locación real.
- Determinación de los niveles RAMS alcanzados para así establecer si el sistema diseñado puede ser utilizado en aplicaciones reales, o en su defecto cuáles son los aspectos en los que debe ser mejorado.

Bibliografía

- [1] I. G. Fiad, *Inversiones para la transformación en ferrocarriles*, Disponible: 2020-04-05, 2019. dirección: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/20171018\presentacion\amcham.pdf>.
- [2] ——, *Avances del plan en infraestructura ferroviaria y su impacto en el desarrollo del país*, Disponible: 2020-04-05, 2019. dirección: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/20170724\presentacion_g.fiad_.pdf.
- [3] SIEMENS, *Siemens proveerá la señalización de una nueva línea ferroviaria principal en Argelia*, Disponible: 2018-11-28, 2011. dirección: <http://www.aan.siemens.com>.
- [4] Siemens, *Trackguard Westrace Mk II. (2014) Flexible safety processor*. Disponible: 2020-04-05, 2019. dirección: <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/rail-automation/electronic-interlockings/trackguard-westrace-mk2-en.pdf>.
- [5] ——, *Trackguard WESTLOCK. Cost-effective, highly available and reliable*. Disponible: 2020-04-05, 2013. dirección: <https://www.mobility.siemens.com\\mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/rail-automation/electronic-interlockings/trackguard-westlock-en.pdf>.
- [6] Alstoms, *Alstoms Smartlock equipment at the heart of modular signalling project in the UK*. Disponible: 2020-04-05, 2011. dirección: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2011/3/Alstom-Smartlock>.
- [7] Hitachi, *Computer based interlocking*. Disponible: 2019-11-27, 2019. dirección: <http://sts.hitachirail.com/en/products-services/business-segments/computer-based-interlocking>.
- [8] AZD Praha, *Systemy pro kolejovou dopravu*, E. S. T. E. 33, ed., Disponible: 2020-04-05, 2018. dirección: <https://www.azd.cz/admin-data/storage/get/198->.
- [9] Thales, *Route Control Systems*, L. E. L90, ed., Disponible: 2020-04-05, 2019. dirección: <https://www.thalesgroup.com/en/route-control-systems>.
- [10] Bombardier Transportation, *Rail Control Solutions (RCS)*, Disponible: 2020-04-05, 2015. dirección: http://www.irse.org/knowledge/publicdocuments\\Bombardier\%2001\%20IRSE_BT_RCS_Introduction_\%20November\\%202015\%20final.pdf.
- [11] Kyosan, *Railway Signaling Solutions. Interlocking Equipment*, Disponible: 2020-04-05, 2019. dirección: <https://www.kyosan.co.jp/english/product/signal03.html>.
- [12] ——, *Kyosan history*, Disponible: 2020-04-05, 2019. dirección: <https://www.kyosan.co.jp/english/company/history02.html>.
- [13] Hima, *COTS Rail Applications*, Disponible: 2020-04-05, 2019. dirección: <https://www.hima.com/en/industries-solutions/cots-rail-references>.
- [14] Asociación Española de Normalización (UNE), *UNE-EN 50126-1:2018*, Disponible: 2018-09-12, 2018. dirección: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma>.

- [15] ——, UNE-EN 50128:2012, Disponible: 2012-03-21, 2012. dirección: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma>.
- [16] ——, UNE-EN 50129:2005, Disponible: 2005-03-16, 2005. dirección: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma>.
- [17] CONICET-GICSAFE, *Grupo de Investigación y Control para la Seguridad y Aplicaciones Ferroviarias*, Disponible: 2018-11-28, 2018. dirección: www.conicet-gicsafe.com.ar.
- [18] Trenes Argentinos, Disponible: 2020-04-05, 2019. dirección: <https://www.argentina.gob.ar/transporte/trenes-argentinos>.
- [19] RITO, *Reglamento Interno Técnico Operativo*, Disponible: 2018-11-28, 1993. dirección: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/rito.pdf>.
- [20] R. Dobias and H. Kubatova, *FPGA based design of the railways interlocking equipments*, E. S. on Digital System Design), ed., 2004.
- [21] Radek Dobias, Hana Kubatova, *FPGA based design of the railway interlocking equipment*, D. of Computer Science y C. T. U. P. Engineering, eds., 2004.
- [22] U. Yildirim, M. S. Durmus, y M. T. Soylemez, *Automatic Interlocking Table Generation for Railway Stations using Symbolic Algebra*. n. IFAC Proceedings Volumes vol 45, ed., Disponible: 2020-04-05, 2012. dirección: <http://dx.doi.org/10.3182/20120912-3-BG-2031.00035>.
- [23] M. Banci y A. Fantechi, *Geographical Versus Functional Modelling by Statecharts of Interlocking Systems*. v. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, ed., Disponible: 2020-04-05, 2005. dirección: <http://dx.doi.org/10.1016/j.entcs.2004.08.055>.
- [24] Altera Corporation, *8 Reasons to Use FPGAs in IEC 61508 Functional Safety Applications*. Altera., ed., 2013.
- [25] Xilinx, *Triple Module Redundancy Design Techniques for Virtex FPGAs*. V. Series, ed., 2006.
- [26] F. L. Kastensmidt, L. Sterpone, L. Carro, y M. S. Reorda, *On the Optimal Design of Triple Modular Redundancy Logic for SRAM-based FPGAs*. Automation y T. in Europe, eds., Disponible: 2020-04-05, 2005. dirección: <http://dx.doi.org/10.1109/DAT.2005.229>.
- [27] Digilent inc., *Arty Z7 Reference Manual*. Disponible: 2020-04-05, 2018. dirección: <https://reference.digilentinc.com\\reference/programmable-logic/arty-z7/reference-manual>.
- [28] Michele Banci,Alessandro Fantechi,Stefania Gnesi, *Some experiences on Formal specification of Railway Interlocking Systems using Statecharts*, 2005.
- [29] Radek Dobias, Hana Kubatova, *FPGA Based Desing of the Railway's Interlocking Equipments*, 10.1109/DSD.2004.1333312, 2004.
- [30] Michele Banci, Alessandro Fantechi, *Geographical Versus Functional Modelling by Statecharts of Interlocking Systems*, 10.1016/j.entcs.2004.08.055, 2005.
- [31] Kirsten Winter, Neil J. Robinson, *Modelling Large Railway Interlockings and Model Checking Small Ones*, 2003.
- [32] Inge Bethke, *Selecting sets of disjoint paths in a railway graph*, 2005.
- [33] Dong Wang,Xiangxian Chen,Hai Huang, *A graph theory based new approach to route location in railway interlocking*, 10.1016/j.cie.2013.09.019, 2013.
- [34] Wai Wong, *A Simple Graph Theory and Its Application in Railway Signalling*.
- [35] Muhammet Ali Nur Oz, Ibrahim Sener, Ozgür Turay Kaymakci, Ilker Ustoglu, Galip Cansever, *Topology Based Automatic Formal Model Generation for Point Automation Systems*, 10.5755/j01.itc.44.1.7382, 2015.

- [36] Martín Nicolás Menendez,Ariel Lutenberg,Nicolas Alvarez,Facundo Larosa,Ramiro Ghignone, «FPGA implementation of a critical railway interlocking system,» *Special Issue on Embedded Systems*, vol. 18, n.º 2, 2020.
- [37] R. Ghignone,F. Larosa,H. Mendes Gouveia,L. Chang,M. N. Menendez,A. Lutenberg, *Generación automática de modelos y código para sistemas electrónicos de enclavamiento ferroviario*, 2019. dirección: <https://drive.google.com/file/d/1FDtRL4We4daZ7XrJ81sL2f6HrZbYlOuG/view>.
- [38] L. Dórdolo, «Visualizador del estado del sistema de señalamiento ferroviario,» Tesis doct., Universidad de Buenos Aires, 2019. dirección: <http://laboratorios.fi.uba.ar/lse/tesis/LSE-FIUBA-Trabajo-Final-MSE-Lucas-Dordolo-2019.pdf>.