

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica**

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



***Tesis presentada en opción al título de Máster en Automática
y Sistemas Informáticos***

**Título: Sistema de Bloqueo Automático ferroviario para el trecho
Esperanza-Santo Domingo.**

Autor: Ing. Miguelina María de las Mercedes Hernández Rosales

Tutor: MSc. Robby Gustabello Cogle

Santa Clara, Cuba 2019



Hago constar que la presente tesis de maestría fue realizada en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la maestría de Automática y Sistemas Informáticos, autorizo que la misma sea utilizada por la institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total, además no podrá ser presentada en eventos, ni publicada sin autorización de la UCLV.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

AGRADECIMIENTOS

A Cesilio, por ser el promotor de la maestría y no dejarme rendir.

A Arellys, por su invaluable ayuda y dedicación.

A Omar, por su guía, su tiempo, paciencia y ayuda incondicional.

A Víctor, por su inmensa y extraordinaria ayuda.

A mi tutor el profesor Robby, por su certera guía.

Al claustro de profesores de la Maestría.

A Ragnia, por amarme, su paciente ayuda y compañía en noche de vigilia.

A Alejo, por su solidaridad y aliento.

A Rubén, por su apoyo.

A Héctor, por su ayuda.

A todos los que de una forma u otra pusieron un granito de arena para permitirme llegar hasta aquí... a ustedes infinitas GRACIAS.

DEDICATORIA

Con entrañable amor a quienes han hecho ligera mi carga y me han apoyado incondicionalmente.

A mi madre, por su inmenso amor y por estar conmigo.

A mis hijos y a mi nieta, que tanto amo.

A todos aquellos que son la razón de este trabajo.

RESUMEN

La necesidad de modernización del ferrocarril cubano actual implica además del mejoramiento de la infraestructura ferroviaria existente, la necesidad de implementar sistemas automáticos de bloqueo en las vías que permitan aumentar el flujo del tráfico de trenes garantizando los niveles de seguridad exigidos para este tipo de medio de transporte. Los sistemas de bloqueo actuales (bloqueo radiotelefónico y bloqueo semiautomático) no cumplen con los requisitos anteriores y funcionan con la intervención del factor humano, lo cual no tiene en cuenta las exigencias requeridas y la disciplina tecnológica, haciendo inseguro el tráfico por la vía férrea. Para ello, la presente investigación propone diseñar un sistema seguro y económico de bloqueo automático ferroviario en el tramo Esperanza- Santo Domingo, que disminuya los intervalos de tiempo de salida de los trenes de las estaciones, aumentando la capacidad de la vía férrea. Utilizando sensores para detectar la presencia del tren, conectados a un PLC (autómata programable), que permita habilitar una sección en el tramo Esperanza- Santo Domingo para incrementar considerablemente la capacidad de la vía férrea de forma segura y eficiente. En el presente trabajo se diseña la arquitectura del sistema y los algoritmos que conforman la programación de los PLCs según la función propia del sistema. Se evalúan los resultados, así como el costo económico del diseño propuesto, destacándose fundamentalmente el incremento de la seguridad y la eficiencia de la vía, utilizando la plataforma técnica existente bajo el mismo principio de funcionamiento de nuestras condiciones reales.

SUMMARY

The necessity of modernization of the current Cuban railroad implies besides the improvement of the existent rail infrastructure, the necessity to implement automatic systems of blockade in the roads that allow to increase the flow of the traffic of trains guaranteeing the levels of security demanded for this type of half of transport. The current blockade systems (radio-phone and semiautomatic blockade) they don't fulfill the previous requirements and they work with the intervention of the human factor, that which doesn't keep in mind the required demands and the technological discipline, making insecure the traffic for the railroad. For it, the present investigation intends to design a sure and economic system of rail automatic blockade in the distance Esperanza - Santo Domingo that diminishes the intervals of time of exit of the trains of the stations, increasing the capacity of the railroad. Using sensors to detect the presence of the train, connected to a PLC (programmable robot) that allows to enable a section in the distance Esperanza - Santo Domingo to increase the capacity of the railroad in a sure and efficient way considerably. Presently work is designed the architecture of the system and the algorithms that conform the programming of the PLCs according to the function characteristic of the system. The results are evaluated, as well as the economic cost of the proposed design, standing out the increment of the security and the efficiency of the road fundamentally, using the existent technical platform under the same principle of operation of our real conditions.

ÍNDICE

Introducción.....	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL Y SEÑALIZACION FERROVIARIA.....	7
1.1 Breve historia del ferrocarril.....	7
1.2 Señalización ferroviaria.....	9
1.2.1 Nivel Integrado de Seguridad (SIL).....	11
1.2.2 Normas para la señalización ferroviaria.....	11
1.2.3 Bloqueos.....	12
1.2.4 Enclavamientos.....	15
1.2.5 Sistema de Control de Tráfico Centralizado (CTC).....	16
1.2.6 Sistema de señalización y control ERTMS.....	17
1.3 Dispositivos para determinar la presencia del tren.....	21
1.3.1 Circuitos de Vía.....	21
1.3.2 Contadores de ejes.....	27
1.4 Consideraciones finales del capítulo.....	30
CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE BLOQUEOS.....	32
2.1 Los sistemas de señalización y bloqueo del ferrocarril cubano actual.....	32
2.2 Sistema de bloqueo automático. Solución propuesta.....	37
2.2.1 Selección del sensor.....	38
2.2.2 Selección del PLC.....	40
2.2.3 Soporte de comunicaciones.....	46

2.2.4 Consideraciones finales del capítulo.....	48
CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE BLOQUEO PARA EL TRECHO ESPERANZA-SANTO DOMINGO.....	49
3.1 Arquitectura del sistema.....	49
3.1.1 Protocolo para el establecimiento de rutas en el bloqueo automático ferroviario.....	50
3.1.2 Funcionamiento general.....	52
3.2 Descripción de los algoritmos de programación.....	54
3.2.1 Algoritmo de programación de los PLCs del sistema.....	54
3.2.1.1 Algoritmo de programación del PLC CE Santo Domingo.....	54
3.2.1.2 Algoritmo de programación del PLCD1 de Santo Domingo.....	61
3.2.1.3 Algoritmo de programación del PLC1J de Jicotea.....	63
3.3 Valoración Económica.....	67
3.4 Consideraciones finales del capítulo.....	63
CONCLUSIONES.....	70
RECOMENDACIONES.....	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

Desde los primeros inicios del surgimiento del ferrocarril como medio de transporte universal los especialistas se dieron a la tarea de desarrollar sistemas (Convertronic., 2014) de señalización y bloqueo en las vías que fueran cada vez más seguros y eficientes para lograr cubrir la demanda de viajes (San-Pablo, 2017) que con el tiempo fue en aumento. Se necesitaba usar las mismas vías para el tráfico de trenes en ambos sentidos y vías auxiliares para cruces en determinados lugares del trayecto y crear mecanismos seguros para bloquear estas vías en caso necesario.

Fue necesario el desarrollo de sistemas de bloqueo para garantizar la separación necesaria entre dos trenes en movimiento. El bloqueo es el sistema de regulación que tiene por objeto impedir la ocupación de un trecho por un tren cuando está ocupado por otro. Desde el uso de señales con banderas, faroles, luego por tiempo dejando salir a los trenes de forma muy espaciada y después por distancia cuando aumentaron en frecuencia los pasos de trenes y los sistemas de agujas (Caballero, 2011) que requerían de la operación manual en las vías para cambiar las rutas o dar paso a otro tren.

Con la aparición del telégrafo se instalaron cables eléctricos y apareció el bloqueo eléctrico de hilo galvanométrico. El funcionamiento es sencillo, mediante el telégrafo se comunicaban los jefes de estación para pedir permisos de expedición y moviendo un hilo metálico se reflejaba a través del cable en la otra estación, dando la señal así de que ya había llegado o salido el tren correspondiente.

Tras el telégrafo llegó la era del teléfono. Todo el proceso relacionado con el telégrafo se simplificó, y mediante el establecimiento de procedimientos por textos escritos (telefonemas) de petición/concesión y llegadas de trenes que se transmitía por teléfono, se reguló el bloqueo telefónico en vía única. El bloqueo telefónico en vía única evolucionó al aumentar el número de circulaciones.

Así dio paso al bloqueo eléctrico manual, sistema en el cual la intervención del Jefe de Estación se reducía y simplificaba por actuaciones y procedimientos eléctricos basados en relés de seguridad en las estaciones o puntos de cruzamiento (intersección de dos vías férreas), siguiendo de forma automática un procedimiento similar al descrito anteriormente.

Con el paso del tiempo, la aparición de elementos eléctricos hizo que apareciesen los primeros enclavamientos eléctricos para gestionar todo lo concerniente al enrutamiento de las vías para el movimiento de los trenes, lo que incluye los cambios de aguja, la apertura de señales, el control del trecho entre enclavamientos, que deber ser estrechamente coordinado con los sistemas externos de control de tráfico, con el propósito de regular con seguridad los movimientos internos y las operaciones de entrada y salida de los trenes (Gil, 2006).

Estos funcionaban con circuitos de relés combinados que deben cumplir una serie de funciones lógicas similares a las que se utilizan en la electrónica actualmente. El siguiente paso y el más importante, por todas las mejoras que supuso fue el enclavamiento electrónico. Los enclavamientos electrónicos han permitido gestionar de una forma mucho más segura las rutas de circulación.

La electrónica ha permitido que el software de los enclavamientos se desarrolle de forma dual y en base a los programas desarrollados por dos equipos independientes. De esta forma, el enclavamiento solo realizará una orden cuando la lógica de ambos programas coincida. Esto se denomina mecanismo 2 de 2, es decir, solo procesará el resultado en caso de que coincidan ambos. Los beneficios que se han conseguido son los siguientes:

- Aumento notable en seguridad.
- Mayor capacidad. Un enclavamiento electrónico actual, mediante la descentralización de bastidores que actúan como extensión de él es capaz de abarcar una línea de 170 kilómetros por sí solo.

Con el incremento del uso de ferrocarril como sistema de transporte comienza un despegue en el desarrollo ferroviario, que tiene como principal función, la de transportar

el mayor volumen posible de viajeros y mercancías por hora en el menor tiempo posible con una alta seguridad de los sistemas y con mayor eficiencia.

El gran inconveniente para lograr mejorar el avance eficiente de los trenes está en la demora del recorrido entre estaciones, que por los reglamentos y los sistemas que se establecen el tren tiene que esperar que el anterior llegue a la próxima estación para poder comenzar su recorrido, cuestión que atenta contra la eficiencia y la agilidad del tráfico.

Para la solución de este problema surgen algunos sistemas para mejorar notablemente la rapidez en el recorrido de los trenes. Lo más novedoso es la aparición de los circuitos de carrilera (Libre, 2014) para controlar la posición del tren de forma continua, en todo su desplazamiento por el trecho y los enclavamientos pero son sistemas costosos que requieren de equipamiento complementario y mantenimiento.

La modernización continua para poder asumir mayores flujos de tráfico aumenta por años, donde tanto la seguridad como la eficiencia tienen que acompañar estos sistemas, que son sumamente costosos en su instalación y explotación por lo que no es recomendable pensar en esas tecnologías para Cuba, pero sí aprovechar las posibilidades que se tienen disponibles y con un mínimo de recursos tratar de lograr un desarrollo que acerque más el sistema ferroviario cubano a estos sistemas.

En Cuba están implementado dos sistemas (F. Montes, 2015) de bloqueo. El tramo de la vía central desde Santa Clara a Santiago de Cuba usa un bloqueo radiotelefónico y el tramo La Habana-Santa Clara tiene incorporado desde inicios de los años 80 del siglo pasado un sistema de bloqueo semiautomático (BSA) entre estaciones (Mijailofni, 1980) que además de los inconvenientes que tiene al intervenir el factor humano no tiene en cuenta el bloqueo entre trechos, que es necesario implementar para lograr un aumento en el flujo de trenes pues permite la circulación de más de un tren en la misma vía entre una estación y la siguiente con los niveles de seguridad máxima exigidos para este tipo de transporte a nivel mundial.

En el recorrido de un tren de una estación a otra se consume un tiempo significativo, pues la distancia de una estación a otra es significativa y todo ese tiempo se debe

esperar hasta que la estación que recibe da la orden para la entrada del próximo tren. Esto se traduce en pérdida de tiempo, combustible, molestias a pasajeros y a la brigada de tripulación del tren, así como en un lento movimiento que hace ineficiente el sistema.

Por esta razón, se propone la tarea de implementar un Sistema de Bloqueo Automático entre estaciones que permita el flujo de trenes de forma continua en los trechos. Utilizando la plataforma técnica existente bajo el mismo principio de funcionamiento de nuestras condiciones reales, sin tener la necesidad de esperar, para enviar un tren, por la llegada del que le antecede.

Se escoge el tramo de vía de Esperanza-Santo Domingo que tiene en Jicotea un paso a nivel con el equipamiento necesario para usar la infraestructura ya instalada y los elementos que forman el sistema de comunicaciones que pueden ser empleados en la solución que se propone.

A partir de la situación anterior se plantea como **problema científico** a resolver en la presente investigación la carencia en Cuba de un sistema de bloqueo automático que permita un uso seguro y eficiente de la vía férrea.

Por lo que el **objeto de estudio** de esta investigación está vinculado a los procesos de control y gestión de sistemas de bloqueos de tráfico de trenes en la Empresa Ferrocarriles de Cuba particularmente en el tramo de Esperanza a Santo Domingo.

Como **hipótesis** de la investigación se plantea que un sistema de bloqueo automático en las vía férreas de Cuba permitirá un uso seguro (Huerta, 2017) y eficiente de la mismas, bajo el concepto de enviar un tren tras otro con un breve intervalo de tiempo entre ellos.

Para darle solución al problema planteado se plantea como **objetivo general**:

Diseñar un sistema de bloqueo automático en el ferrocarril cubano, que permita un uso seguro, eficiente y económico de la vía férrea.

Como **objetivos específicos** se tienen:

- Sistematizar los referentes teórico-metodológicos relacionados con los sistemas de bloqueo automáticos de la vía férrea.
- Analizar los sistemas de bloqueo empleados en la actualidad en el ferrocarril cubano.
- Describir los elementos de hardware que intervienen en el diseño propuesto.
- Diseñar el sistema de bloqueo automático de la vía férrea para el trecho Esperanza-Santo Domingo, capaz de cumplir con las normativas de seguridad requeridas y que mejore la eficiencia actual.
- Describir el funcionamiento general del sistema automático.
- Fundamentar mediante algoritmos de programación los mecanismos de funcionamiento de los controladores lógicos programables que intervienen en el sistema que se propone.
- Evaluar los resultados.
- Evaluar el costo económico del diseño propuesto.

Para abordar los principales **aportes** que esta investigación pudiera introducir en la Empresa de Ferrocarriles de Cuba, se tomarán en cuenta las consecuencias que se derivan de la inseguridad y obsolescencia del sistema semiautomático existente.

- Se tendrá un sistema de bloqueo automático entre tramos que garantice una mayor seguridad en el tráfico de trenes.
- Se garantizará una mayor eficiencia en el movimiento de trenes en las vías férreas.
- Disminución de los tiempos de salida de los trenes de la estación.
- Aumento del flujo de trenes en el país.

Estructura de la tesis

La tesis consta de resumen, introducción, desarrollo, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos. El desarrollo consta de tres capítulos, los cuales se describen seguidamente:

En el primer capítulo se hace una sistematización de los referentes teóricos principales que sustentan el problema científico que se propone resolver. Se hace una revisión bibliográfica sobre los sistemas de señalización y bloqueo en general, conceptos, definiciones, clasificaciones. El vínculo de la señalización ferroviaria (Altehage, 2014) con los sistemas de tráfico centralizado (CTC) y con el Sistema Europeo de Gestión del Tráfico Ferroviario (ERTMS por sus siglas en inglés).

En el segundo capítulo se hace una evaluación crítica del sistema de bloqueo semiautomático existente en Cuba y se describen los elementos de hardware que se necesitan incorporar al sistema que se propone así como sensores y sistema de comunicación ya existentes que intervienen en la solución teniendo en cuenta la integridad con las soluciones (Martínez, 2018b) propuestas en trabajos anteriores que sirven como base para definir el sistema de bloqueo entre trechos que se propone.

En el tercer capítulo se propone y se describe la arquitectura del sistema automático de bloqueo entre trechos y los algoritmos de programación para los diferentes PLCs que intervienen en el proceso de conteo de las ruedas del tren y el envío de la información para su comparación y dar de manera automática, la respuesta necesaria para bloquear o liberar la sección correspondiente según sea necesario. Se hace una valoración económica del sistema propuesto.

La puesta en funcionamiento de esta propuesta, posiciona a la Empresa de Ferrocarriles de Cuba en condiciones favorables para garantizar el movimiento de trenes de manera segura y eficiente, se mejorará el flujo de tráfico de trenes y con ellos el intervalo de tiempo de salida de los mismos de la estación emisora.

También tributa al cumplimiento de los lineamientos 132, 137 y 141 de la política del partido y el estado sobre el desarrollo y la modernización del ferrocarril cubano.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LOS SISTEMAS DE CONTROL Y SEÑALIZACIÓN FERROVIARIA

En el presente capítulo se describen las tecnologías relacionadas con los sistemas de control y señalización (Gómez, 2015) de tráfico ferroviario en el mundo, así como las normas y niveles de integrados de seguridad (INOR, 2016) que sustentan las tecnologías actuales para el movimiento seguro de trenes. Se analizan las posibilidades que tiene el uso de controladores lógicos programables (Uniovi, 2014) como centro en los sistemas automáticos de mando centralizado, como máxima expresión del despacho de trenes con una alta seguridad y eficiencia. Se analizan las diferentes variantes que se emplean para detectar la presencia de un tren en la vía, haciendo énfasis en los contadores de eje (Scalise, 2014) como tecnología a emplear para sistema que se propone.

1.1 Breve historia del ferrocarril

El ferrocarril surge a partir de la invención de la máquina de vapor por *James Watt*, en 1775, como una nueva vía de transporte de personas y cargas (F. Montes, 2015). En el año 1789 se adoptan los carriles lisos que dotan a las ruedas de pestañas exteriores para evitar descarrilamientos. La locomotora fue construida por *Richard Trevithick*, en 1804, que logra arrastrar 10 toneladas de mineral. Fue en Inglaterra que se construye la primera línea de ferrocarril pública en el año 1815, a partir de entonces el ferrocarril es considerado una alternativa de transporte necesaria y es el medio de transporte más desarrollado por el hombre y el que aporta más beneficios económicos al mismo.

En Cuba la primera línea de ferrocarril se inaugura en el año 1837 con la influencia del inventor y publicista español Marcelino Catero y vinculado de manera directa con la producción de caña de azúcar y en homenaje a la Reina Isabel II. De esta forma se convierte Cuba en el séptimo país del mundo en disponer de ferrocarril y el primero de Iberoamérica, diez años antes que la propia metrópolis.

Más que una invención genial, el ferrocarril es el resultado de un prolongado esfuerzo de creación colectiva, enmarcado dentro de un amplio proceso de desarrollo científico-técnico que revoluciona las bases del sistema productivo y financiero de aquellos momentos.

El transporte ferroviario tiene la característica de que sus móviles se desplazan por encima de dos rieles, es decir tienen una trayectoria preestablecida de la cual no es posible salir, no dejando flexibilidad a opciones de trayectoria en su movimiento. Lo anterior motiva que, a diferencia de otros tipos de transporte, el ferrocarril necesita de una organización y una disciplina estrictas para su movimiento, aunque este sea de bajas velocidades y de bajo tráfico.

El ferrocarril permite remolcar grandes volúmenes de mercancías y pasajeros con máquinas de potencia reducida a bajos costos de transportación, de ahí la expansión de su empleo en todo el mundo y la necesidad de lograr redes seguras con modernos sistemas de control y señalización.

Para manejar el tráfico de trenes logrando fiabilidad, eficiencia y seguridad (K. R. J. Ždanský, 2015) se necesita tener en cuenta los diferentes aspectos tecnológicos que garantizan el cumplimiento de las anteriores consideraciones y que se abordan de manera ordenada en los epígrafes del capítulo I del trabajo, entre ellos se tiene lo relacionado con los sistemas de señalización, bloqueos y tipos y funciones de los enclavamientos y el tipo de dispositivo que se utilice para detectar la presencia del tren en la vía.

Es importante además valorar las funciones de los centros de control centralizado para la supervisión del tráfico y tener una visión de la posición de los trenes en la vía. Lograr variantes de implementación con tecnologías de comunicación actuales garantiza regular el tráfico adecuadamente en zonas específicas.

1.2 Señalización ferroviaria

El origen de la señalización ferroviaria (San-Pablo, 2017) (Sánchez, 2013) es la consecuencia natural de la necesidad de incrementar el número de trenes circulando dentro de una sola vía con un nivel aceptable de regularidad sobre ella y la interacción segura entre trenes consecutivos. La evolución de la señalización ferroviaria inició con banderines de diversos colores que anunciaban o denegaban el paso a los trenes.

Luego, surge la señalización de tipo mecánica, la cual evoluciona a la señalización eléctrica con señales de luces laterales sobre la vía. Ya en la actualidad se cuenta con dinámicos sistemas electrónicos de información en línea que le indican al conductor las acciones a ejecutar a través de las pantallas dentro de la cabina de conducción.

Se define como señalización ferroviaria (San-Pablo, 2017) a los distintos sistemas de control, mando y protección que garantizan la circulación segura de trenes, es la técnica de control y regulación del tráfico de trenes basada en semáforos o señales, los cuales indican a un conductor si este puede avanzar o no y bajo qué condiciones de velocidad y garantizar que uno solo de los dos trenes tenga autorizado el paso mientras el otro permanece detenido frente a la señal o garantizar que el tren se frene automáticamente si no cumple el orden de parada.

Para esto se emplean sistemas de señalización y bloqueo automáticos (Mijailofni, 1980) usando semáforos donde el verde indica vía libre, el amarillo anuncio de parada en la siguiente señal y el rojo detención. También se emplean para mantener una distancia de seguridad entre dos trenes consecutivos que circulan por la misma vía o en vías de doble sentido evitar colisiones y regular el movimiento de trenes de acuerdo con la densidad de tráfico y la velocidad exigida.

La señalización debe tener en cuenta los conceptos siguientes:

Bloqueo: Acción de reservar un trecho de la vía, que permite que los trenes circulen con seguridad, de tal forma que no colisionen ni se alcance durante su marcha.

Itinerario: Es la secuencia de señales autorizando un determinado trayecto del tren entre dos puntos.

Secciones de vía: Tramos de línea protegidos entre dos señales donde solo puede circular un tren.

Enclavamiento: Es el corazón del control de los itinerarios y desvíos, para asegurar, mediante tecnologías de seguridad, que la posición de las agujas y señales no entren en conflicto y que el tren esté protegido durante el paso por los cruces contra una hipotética colisión con otro tren. Esta técnica se conoce también como la creación de itinerarios seguros.

Entre los principales objetivos de los sistemas de señalización se tienen:

Seguridad: Es el aspecto más importante que debe caracterizar a cualquier sistema utilizado para controlar y supervisar el tráfico ferroviario (ADIF, 2013). Tanto las funciones de hardware como de software de estos sistemas deben realizar continuos chequeos de sus componentes internos y externos, con el objetivo de detectar el más mínimo fallo y tomar decisiones que aseguren el movimiento de los trenes sobre la vía. Se aplica el concepto de "Fail-Safe" (INOR, 2016) que siempre llevará al estado más seguro conocido. Sobre este principio se diseña el equipamiento de señalización ferroviaria.

Fiabilidad: Los equipos instalados en la vía y las estaciones móviles dentro del tren deben calificar bajo las más estrictas normas de seguridad y protección para entornos ferroviarios. Sus cálculos de fiabilidad exigen niveles altos de seguridad.

Interoperabilidad: Las normas de implementación de los sistemas de bloqueo y señalización deben garantizar la coexistencia de tecnologías y fabricantes dentro de un país o incluso entre países.

Calidad: Se necesita tener en cuenta para proveer al usuario el confort adecuado para su comodidad durante el viaje, información actualizada del recorrido del tren así como el horario de arribo a las estaciones e informar al pasajero sobre el estado de la vía,

posibles retrasos durante el trayecto, número de paradas, distancia de destino, etc.

Disponibilidad: Funcionamiento ininterrumpido del servicio ferroviario y sus sistemas de control y regulación del tráfico de trenes.

1.2.1 Nivel Integrado de Seguridad (SIL)

En la Unión Europea y otros países, se utilizan para evaluar la seguridad requerida por determinados sistemas el denominado concepto de Nivel Integrado de Seguridad (SIL) (Gómez, 2010; INOR, 2016). El mismo es un concepto de requisitos de seguridad para funciones, sistemas, subsistemas o componentes.

Se puede considerar que el SIL es una clasificación de la capacidad de un producto o de una Función de Seguridad (SIF) para reducir el riesgo de accidentes en un proceso. Los estándares definen cuatro Niveles de Integridad de Seguridad, SIL 1 a SIL 4, donde SIL 4 es el nivel de seguridad más alto.

Considerando todo lo anterior, resulta necesario determinar el SIL (Wigger, 2015a) que requiere un proceso que garantice la seguridad requerida.

1.2.2 Normas para la señalización ferroviaria

En Europa rigen las normas (ADIF, 2013) CENELEC, de las cuales las relacionadas con el tema son básicamente las EN 50126; EN 50128 y EN 50129. Estas normas son las versiones en español de las correspondientes normas CENELEC europeas, por lo que al tratarlas se está abordando su uso de forma general en Europa.

La Norma Española EN 5016 tiene como objetivo la puesta en práctica de un enfoque consistente de las gestiones de la fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad, representadas por las siglas RAMS para el ferrocarril y lograr su cumplimiento.

En Cuba no existen normas vigentes relacionadas con el tema por lo que se toman estas normas españolas como referente en los trabajos (Martínez, 2018a) (Castro, 2018a) relacionados con la señalización ferroviaria y la protección automática de pasos a nivel. Las tecnologías y equipamiento en Cuba son normalmente importados de estos

países donde se utilizan estas normas y que son tratadas de forma resumida en este trabajo (Castro, 2018b; Martínez, 2018b).

1.2.3 Bloqueos

El bloqueo ferroviario es la acción de impedir que un tren ocupe un trecho que ya esté ocupado por otro tren.

En general, el bloqueo del (Soroko, 1976) trecho de vía entre dos estaciones colaterales abiertas, requiere establecer una relación de dependencia entre ambas, que permita expedir circulaciones de una a otra en condiciones seguras. La relación puede establecerse a través de acuerdos bilaterales o de instalaciones diseñadas al efecto.

Los principios básicos (ADIF, 2013) de los bloqueos son los siguientes: a) Dos trenes que circulen por la misma vía y en el mismo sentido, irán separados a una distancia que garantice que no se va a producir un alcance. b) Cuando un tren esté circulando por una vía, no se expedirá otro en sentido contrario por la misma vía desde la estación colateral. c) Las instalaciones garantizarán la seguridad necesaria para compatibilizar las maniobras que se realicen por la banda de una estación, con la llegada de un tren por dicha banda.

Los tipos de bloqueo (Kazakob, 1980) vienen definidos principalmente por el tipo de vía en la que se implementan (única o doble), por la posibilidad de utilizar las vías en ambos sentidos y por su automatización en la autorización de permisos de circulación.

Tipos de bloqueos automáticos existentes:

- Bloqueo automático en vía única (BLAU, por sus siglas en inglés): Bloqueo situado en una vía señalizada en ambos sentidos de circulación. Entre bloqueos tienen un único cantón, sin señales intermedias. El tramo de vía se define usando contadores de ejes que garantizan que el sistema sea totalmente automático en lugar de cambiavías.

Bloqueo automático en vía doble (BLAD, por sus siglas en inglés): Bloqueo situado en dos vías, cada una de ellas señalizada en un solo sentido de circulación. Los trenes circularán siempre en el mismo sentido, y si tuvieran que hacerlo en sentido contrario

(contravía) se emplea un bloqueo telefónico normal. No necesita un cantón libre entre estaciones para expedir un tren pues el bloqueo esta siempre establecido con el uso de cambiavías o señales intermedias para dividir los trayectos en secciones que aumentan la capacidad de transporte.

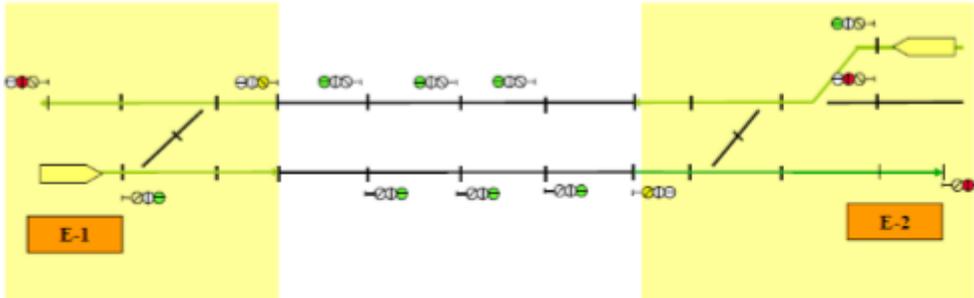


Fig. 1.1 Bloqueo automático en vía doble y un solo sentido de circulación

- Bloqueo automático de vía doble banalizada (BLAD): Bloqueo situado en vía doble, en la que los trenes pueden circular en cualquier sentido en cualquiera de las dos vías. Cada vía está señalizada en los dos sentidos y la detección del tren se hace en todo el trayecto con el empleo de circuitos de vía y señales intermedias que dividen el trayecto en secciones que aumentan la capacidad de tráfico, es totalmente automático y se emplean en zonas de gran densidad de tráfico.

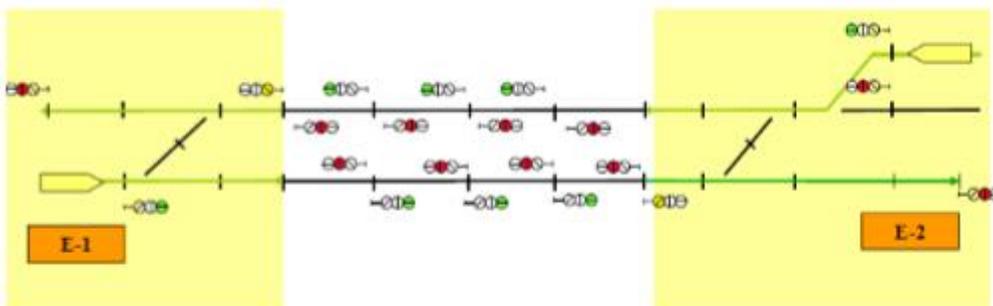


Fig. 1.2 Bloqueo automático de vía doble y doble sentido de circulación

- Bloqueo de liberación automática (BLA): Este es un bloqueo similar al bloqueo automático. La única diferencia está en la utilización de contadores de ejes. El cantón no queda libre hasta que el contador de ejes no cuenta los mismos ejes de entrada y de salida. Al igual que los bloqueos automáticos, existe el bloqueo de liberación automática en vía única y el bloqueo de liberación automática en vía doble.
- Bloqueos de control automático (BCA): Bloqueos donde los cantones o secciones no están delimitados por señales. Estos bloqueos son controlados por la distancia entre trenes y la velocidad de cada uno de ellos. El maquinista es informado de la velocidad a la que debe de ir en cada momento. Es necesario considerar que cada tren tiene una capacidad de frenado dependiente de la velocidad a la que circule y de su desaceleración. Los trenes tienen que frenar sin que la distancia de parada a la velocidad máxima permitida afecte a la circulación de los demás trenes.

Existen dos formas de liberación de los bloqueos.

Liberación normal: Se produce por la secuencia de ocupación y liberación de los circuitos del trayecto, anulándose automáticamente al rebasar el último eje del tren la señal de entrada de la estación receptora, siempre que no haya salido otro tren de la estación expedidora o no se haya establecido un nuevo itinerario de salida de la citada estación.

Liberación artificial: Se produce para los casos en que solo esté establecido el bloqueo, ya que se puede anular este. Si no se puede realizar la anulación normal del itinerario de salida, se procederá a la anulación artificial o a la de emergencia, si fuera preciso.

Como sistema, el bloqueo automático está integrado a otros sistemas que complementan un sistema único para el seguimiento del posicionamiento del tren, cuya responsabilidad la asume el Control de Tráfico Centralizado (CTC) (Lambert, 2009), que se comenta en adelante.

Otro importante eslabón en el bloqueo automático lo constituyen los enclavamientos

(Medina, 2018), por cuanto es el lugar al cual va la información de campo del bloqueo donde se procesa para el envío de la misma al CTC y para las operaciones propias del bloqueo de autorización y liberación de los cantones.

1.2.4 Enclavamientos

El enclavamiento (Segura, 2013) constituye un elemento vital para la seguridad al impedir la formación de rutas y la autorización de movimientos entre trenes con itinerarios conflictivos. Cuando un elemento se enclava, significa que no puede ser maniobrado por ningún procedimiento eléctrico o manual mientras persista el enclavamiento. Al enclavar una ruta, queda fijada. Esto impide realizar el cambio de la posición de las agujas y el estado de las señales hasta que no sea disuelta. La disolución se produce progresivamente y de forma automática a medida que el tren avanza por la ruta. También existen procedimientos de disolución artificial y de emergencia.

Clasificación de los enclavamientos según la tecnología empleada:

Enclavamientos mecánicos: Sus dependencias se basan en la utilización de llaves, palancas, levas y barras verticales y horizontales siendo la transmisión de la posición de agujas y señales generalmente mecánica para lograr el enrutamiento de una vía de una forma segura.

Enclavamientos eléctricos: Utilizan lógica de relés y según la arquitectura empleada pueden ser modulares o de cableado libre. Existen relés vitales de potencia para actuar sobre los elementos de campo, modificando su estado.

Los circuitos a base de relés impiden actuar sobre los distintos elementos de campo siempre que no cumplan con alguna de las condiciones de seguridad necesarias. A cada itinerario (Itinerario 11 de la Unión de Ferrocarriles de Cuba, 2015) se le asocia un relé y también se usan para la detección del tren.

Los motores que accionan las agujas actúan por mando eléctrico del enclavamiento, para establecer una ruta se requiere cambiar de posición una aguja, el enclavamiento

bloquea el circuito de mando a base de relés que actúa sobre el motor de la aguja, impidiendo de esta forma que la aguja pueda ser maniobrada por cualquier clase de procedimiento eléctrico mientras no sea desenclavada.

La evolución de los enclavamientos eléctricos permite llegar al mando automático que logra el establecimiento automático de la ruta completa al actuar sobre dos botones, uno de comienzo y otro de final de ruta. Con esto se mejora notablemente la seguridad del movimiento de trenes.

Enclavamientos electrónicos (ENCE, por sus siglas en inglés): Se basan fundamentalmente en sistemas inteligentes que usan ordenadores y microprocesadores, tienen construcción modular y se ubican en armarios normalizados que ocupan menos espacio.

Están formados por:

Unidad lógica: Basada en microprocesadores. Lleva a cabo el control en tiempo real de la operación del enclavamiento.

Módulos de entrada/ salida: Constituyen la interfaz con los elementos del campo. Los módulos de entrada reciben del campo la información sobre la posición de las agujas, el estado de los circuitos de vías y señales semaforicas, como elementos fundamentales del enclavamiento. Los módulos de salida actúan sobre relés, para modificar el aspecto de las luces de las señales y accionar los motores de las agujas. Cada elemento de campo tiene uno o más módulos independientes de E/S asociados.

1.2.5 Sistema de Control de Tráfico Centralizado (CTC).

El sistema CTC (ERTMS, 2014) se crea a partir de la necesidad de tener una visión generalizada de la posición de los trenes, así como la disposición en cada instante de los desvíos y las rutas establecidas, con el objetivo de actuar sobre los mandos de señales y de rutas y regular adecuadamente el tráfico en una zona específica. Es un centro de gestión de tráfico que controla y coordina, supervisa y regula la explotación ferroviaria, para garantizar la circulación de trenes según los planes de transporte. El sistema CTC se apoya en los sistemas de telecomunicaciones y telefonía celular. Para la red ferroviaria se utilizan el Sistema Global para Comunicaciones Móviles para

ferrocarriles, GSM-R (por sus siglas en inglés), y los canales de radiocomunicación Tren-Tierra. Los enclavamientos como elemento de campo garantizan la seguridad de las operaciones de ruta de los trenes a lo largo de las vías de una línea y sus estaciones.

El CTC dispone de prioridad en el mando sobre cada uno de los enclavamientos y solamente se transfiere el mando a los operadores de cada enclavamiento si se presenta alguna incidencia en el CTC, o se realizan trabajos de maniobra dentro de las estaciones que interfieran las vías principales controladas por el despachador de tráfico centralizado. Es en el CTC donde se reciben las señales transmitidas desde los sistemas en línea para desde allí tomar las órdenes de derecho o bloqueo de vías según sea el caso.



Fig. 1.3 Control de Trafico Centralizado

1.2.6 Sistema de señalización y control ERTMS.

El Sistema Unificado de Control de Tráfico,(ERTMS, 2014) E.R.T.M.S. (por sus siglas en inglés) está constituido por los subsistemas E.T.C.S (subsistema europeo de control de trenes) y GSM–R. Este sistema puede instalarse en tres versiones diferentes (1, 2, 3) que se definen por los niveles de seguridad, capacidad y velocidad con que se realiza el mando y control del tráfico, abarca todo lo concerniente a la señalización. El GSM-R efectúa las comunicaciones mediante los canales de radio propios del sistema. El ERTMS es la unión de los sistemas de señalización con el de comunicación, este último actúa como soporte para el envío de información inherente a la señalización.

La relación entre el conductor del tren y el mundo exterior se facilita en el ERTMS a través de la integración, en el pupitre de la cabina de conducción, de la información ofrecida por la señalización con funciones propias del GSM-R. El sistema global de comunicación móvil aplicado al ferrocarril, es un sistema abierto, que está definido por la banda de frecuencias reservadas, dentro del espectro radioeléctrico, a las comunicaciones de seguridad del ferrocarril.

Ver arquitectura del equipamiento de a bordo de la locomotora y de la vía en el Anexo 1, figuras 1.1 y 1.2.

Tabla 1. Características de los niveles ERTMS

NIVEL	CARACTERÍSTICAS
1	1. Intercambio puntual de información 2. Velocidad máxima: 300 k/h 3. Intervalo entre trenes: 5'30"
2	4. Sistema de cantones fijos 5. Intercambio de información vía GSM-R 6. Velocidad máxima: 350 km/h 7. Intervalo entre trenes: 2'30"
3	8. Sistema de cantones móviles 9. Utiliza GPS para determinar la posición del tren 10. Aún en fase de desarrollo

Características del nivel 1

- Balizas sin otro equipamiento. Lazos de inducción, radio o balizas extras
- Permiten hacer llegar la variación de las señales a la cabina de la locomotora, antes de llegar a las balizas y por lo tanto no se requiere reducir la velocidad
- Se mantienen los semáforos en la vía.
- El movimiento es autorizado a través de balizas.

La Baliza es un dispositivo electrónico sencillo y eficiente que cumple la función del chequeo del paso del tren y su integridad. Es un sistema de transmisión puntual que transporta la información de forma segura entre la infraestructura de la vía y el tren.

Su función principal es transmitir y/o recibir a través de radiocomunicación. La baliza es un dispositivo montado sobre la vía que se comunica con el tren cuando este pasa por encima.

La baliza contemplada de forma aislada no es más que un dispositivo físico con una serie de prestaciones electromagnéticas que es necesario integrar dentro de un sistema que se encargue de recibir, decodificar, procesar o ejecutar órdenes en función de la información recibida.

La información de la baliza se suministra del tren únicamente por la unidad de antena.

La integridad y la posición del tren se obtienen por los circuitos de vía.

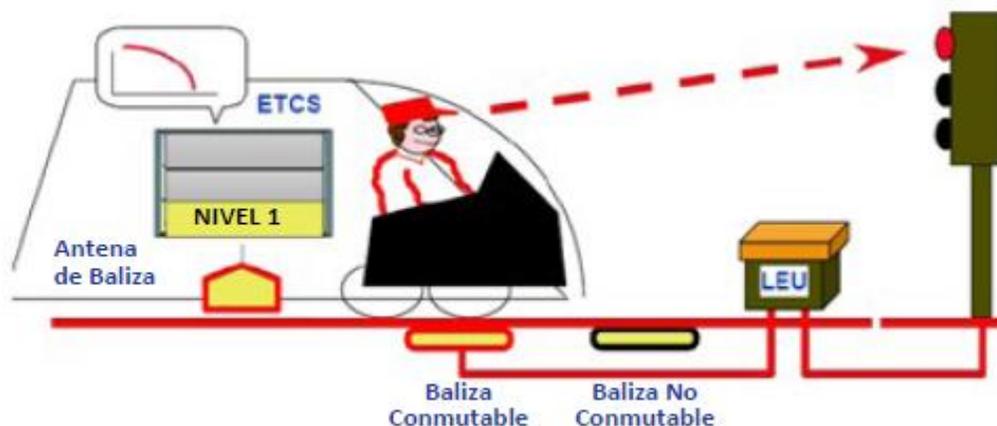


Fig. 1.4 Nivel 1

Características del nivel 2

- Eurobalizas con GSM-R y RBC (Radio Block Centre, *por sus siglas en inglés*).
- No se requieren señales en la vía
- El movimiento es autorizado por el GSM-R.
- La posición del tren en la vía es controlada por las Eurobalizas.

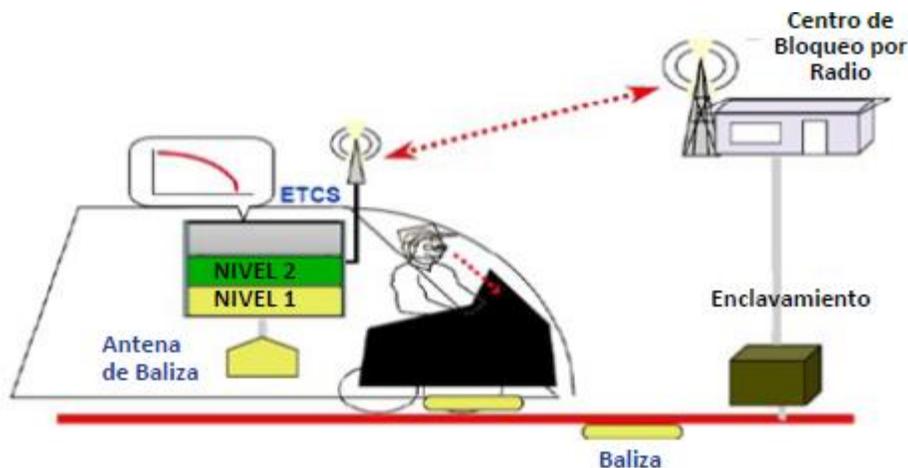


Fig. 1.5 Nivel 2

Características del nivel 3

- Eurobalizas con GSM-R y RBC (por sus siglas en inglés).
- El movimiento es autorizado por el GSM-R (GRS, 2016).
- La posición del tren en la vía es controlada por las Eurobalizas.
- Todo el control se realiza en el mismo tren por lo que no se requieren circuitos de carrilera.
- Los tramos de bloqueo son móviles.
- Los módulos de transmisión y los equipos instalados en la cabina, son capaces de transcribir los mensajes generados por la señalización ferroviaria tradicional, en cada Estado, al nuevo sistema de conducción segura.

El propósito final es lograr que el transporte ferroviario sea transfronterizo e ininterrumpido y evitar tiempos de espera en las fronteras, minimizar el número de sistemas de control del tren para el transporte transfronterizo y que mantenga la misma composición de origen a destino sin necesidad de sustituir las locomotoras, vagones o coches y que el servicio lo preste un mismo equipo de trabajadores a bordo.

GSM-R es el nuevo sistema de radio para comunicaciones de voz y basado en la tecnología GSM estándar, pero usando frecuencias específicas del sector

ferroviario y con ciertas funciones avanzadas.

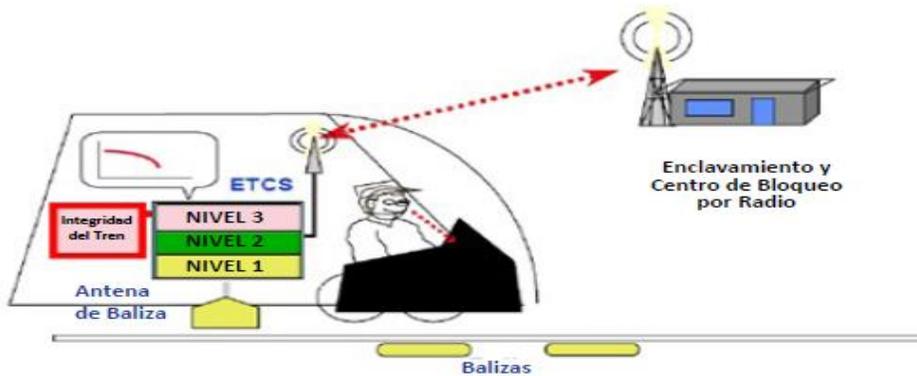


Fig. 1.6 Nivel 3

1.3 Dispositivos para determinar la presencia del tren

Los sensores para la detección de la presencia del tren juegan un papel fundamental en un sistema de protección automática de pasos a nivel, ya que la presencia del tren es la que debe desencadenar todo el proceso automático del sistema.

Existe una amplia gama de sensores dedicados a este fin desde los circuitos de vía clásicos basados en relés hasta los más modernos mediante contadores de ejes o balizas. Seguidamente se describe el funcionamiento de varios de los más usados en los sistemas de señalización ferroviaria.

1.3.1 Circuitos de Vía

Desde que comenzó la señalización ferroviaria (F. Montes, 2015) se hizo necesario detectar la presencia del tren en determinada región, zona o bloque de la vía férrea. Para ello se divide la vía en secciones de determinada longitud, separadas por juntas aislantes de modo que cada una de ellas queda aislada de la contigua, a esto se le denomina circuitos de vía que pueden ser de corriente directa, corriente alterna, una combinación de ambas o pueden ser de audiofrecuencia para determinar la presencia o no de un tren en la vía. El principio de funcionamiento (León, 2007) consiste en que a través de los rieles se hace circular una corriente eléctrica que energiza un relé

mientras no hay presencia de un tren en el circuito de vía, cuando un tren ocupa dicho circuito de vía establece un cortocircuito entre los rieles que impide que le llegue la corriente suficiente al relé por lo que este se desenergiza. Mediante los contactos correspondientes del relé se dan las señales necesarias a los distintos dispositivos del sistema de señalización sobre la ocupación o no de la vía. Una representación simplificada de lo dicho se muestra en las figuras 1.7 y 1.8.

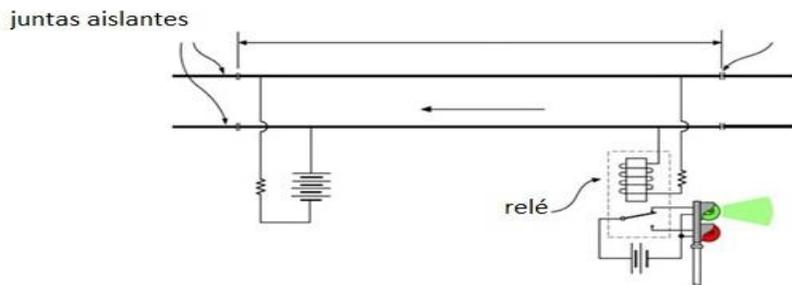


Fig. 1.7 Circuito de vía desocupado

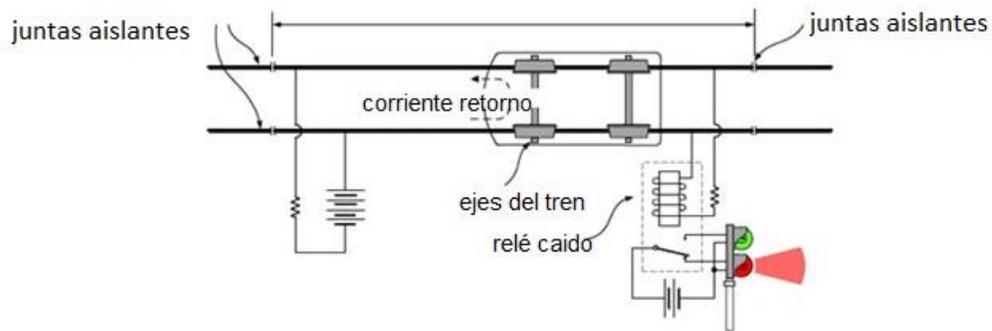


Fig. 1.8 Circuito de vía ocupado por el tren

La figura 1.8 representa un circuito de vía simplificado (Scalise, 2014) ocupado por un tren. En este caso la corriente de la batería circula por los rieles hasta llegar a las ruedas del tren y a través de sus ejes retorna a la batería y no llega, o llega muy débilmente a la bobina del relé por lo que este se desenergiza, su armadura cae y con ello se abren los contactos que indicaban la desocupación de la vía y se cierran los de

vía ocupada, pasando a una señal restrictiva, que en la figura se representa por una luz roja indicando parar porque la zona controlada se encuentra ocupada por un tren.

Circuitos de vía de corriente directa (CD)

El circuito de vía de CD fue inventado por el Dr. William Robinson y por primera vez fue puesto en uso en una aplicación ferroviaria en 1872. Una de las ventajas fundamentales de este circuito es su condición de seguridad (Gil, 2006) ante fallos (FAIL SAFE) ya que cualquier fallo en el circuito tal como: pérdida de la alimentación, rotura de un carril, rotura de un conector (se muestra en la figura 1.9), apertura de la bobina del relé, etc., trae como consecuencia la caída de la armadura del relé y con ello sus contactos pasan a la posición segura, es decir, la señal más restrictiva que prohíbe el movimiento hacia esa sección de la vía, o en el caso de que se utilice como sección de aproximación a un paso a nivel indicaría el cierre del mismo.



Fig. 1.9 Conector de continuidad de carril

Por otra parte, este circuito controla (Sharkey, 2014) la integridad del carril, ya que si este se parte, el relé se desenergiza adoptando también la posición segura de prohibir la circulación hacia esa zona evitando con ello un posible descarrilamiento.

La desventaja fundamental de este circuito es que la corriente tiende a disminuir en circuitos largos o que se presente condiciones de bajo aislamiento de la vía.

Por otra parte, se requiere un buen mantenimiento del mismo, ya que es necesario mantener íntegras las soldaduras de los conectores que le dan continuidad a un carril

con otro eléctricamente para que la corriente circule en todo su recorrido hasta el relé. Otra desventaja de este circuito es que requiere la colocación de juntas aislantes (se ilustra en la figura 1.10) para delimitar un circuito de vía de otro contiguo, lo que además debe hacerse alternando la polaridad para cumplir con el principio FAIL SAFE ya que si ocurre la perforación del material aislante es necesario evitar que un circuito alimente a otro contiguo pudiendo darse una falsa desocupación de la vía.



Fig. 1.10 Ilustración de junta aislante

Circuitos de vía de corriente alterna (CA)

Los circuitos de vía de CA difieren del anterior en que al final del circuito un rectificador alimenta al relé, como puede apreciarse en la figura 1.11.

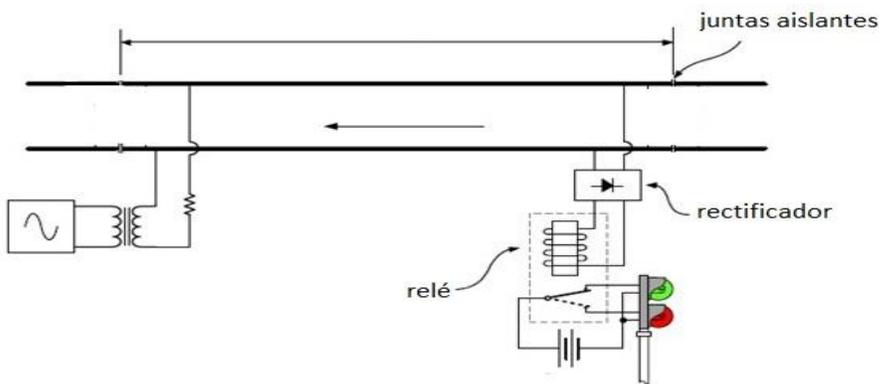


Fig. 1.11 Circuito de vía de corriente alterna

Circuitos de vía de Pedales electrónicos

Los pedales electrónicos son otra forma de determinar la presencia del tren en la vía, estos se colocan a la entrada y a la salida de un circuito o sección de vía a controlar (Scalise, 2014) (Altehage, 2014) realizándose el conteo de los ejes que entran o salen de dicha sección, siempre que el resultado de dicho conteo sea diferente de cero el circuito se considera ocupado por el tren.

La figura 1.12 representa un circuito de vía de este tipo. A cada lado del carril se colocan dos pares de cabezas emisoras y receptoras de una señal de audiofrecuencia, cuando no existe presencia de una rueda la señal es captada por la cabeza receptora, cuando una rueda se interpone entre la cabeza emisora y la receptora modifica el campo magnético y la cabeza receptora no recibe la señal, lo que es interpretado por el sistema como la presencia de una rueda.

Puesto que seguidamente se encuentra otro par de cabezas emisora y receptora, cuando la rueda avanza ocurre el mismo proceso, lo que se interpreta como que pasó una rueda. De esta forma, si la rueda entró al circuito se incrementa en el conteo y si salió se decrementa. Cuando el conteo es diferente de cero (puede ser porque hay ejes dentro o por un error de conteo, esto último para que sea FAIL SAFE) el circuito se considera ocupado y cuando llega a cero se asume desocupado. La figura 1.13 muestra lo expresado referente a la modificación del campo magnético, donde se observa que al interponerse la rueda del tren la señal no llega al lado receptor.

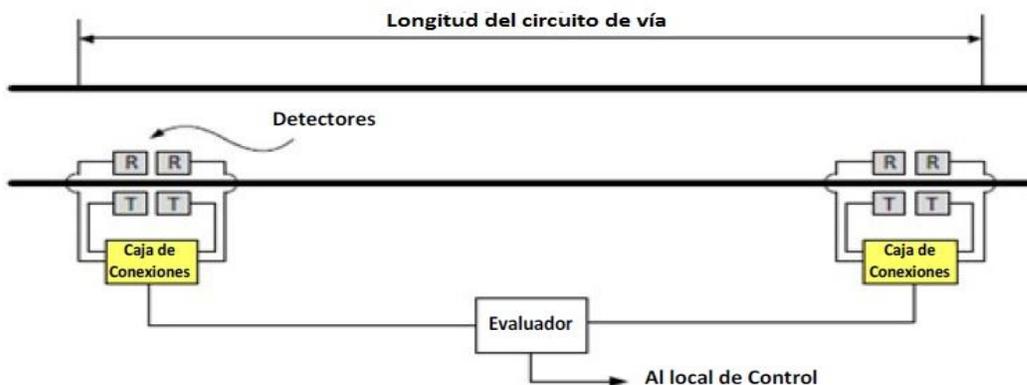


Fig. 1.12 Circuito de vía de pedales electrónicos

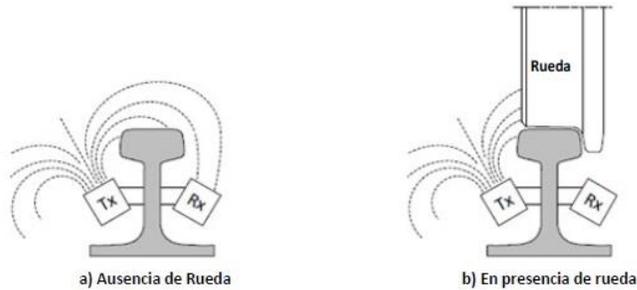


Fig. 1.13 Campo magnético del pedal

Un ejemplo práctico de un sistema de pedales electrónicos (ELECTRANS, 2016) es ELECTRANS. La figura 1.14 muestra un juego de cabezas detectoras de este tipo.



Fig. 1.14 Pedales electrónicos ELECTRANS

Otro sistema de pedales electrónicos utilizado en el mundo es el FRAUSHER (Frauscher., 2006), en la figura 1.15 aparece un pedal electrónico modelo RSR-122 que se puede utilizar indistintamente como detector de rueda o como contador de ejes para controlar una zona de la vía como un circuito de vía de la forma ya explicada. También es utilizado en los enclavamientos ferroviarios como circuitos de vía.



Fig. 1.15 Pedal electrónico FRAUSHER RSR-122

1.3.2 Contadores de ejes

Paralelamente a la evolución de los circuitos de vía, se han desarrollado sistemas de contadores de ejes (Ltda., 2012) para la detección del tren (Figura 1.16). A través de unos detectores de ruedas se cuenta el número de ejes que entran y salen por cada sección.

El balance tiene que ser cero para confirmar que el tren ha liberado tal sección. Estos sistemas, independientes de los carriles, permiten secciones de longitud más larga y eliminan algunos de los problemas e interferencias. El campo de aplicación de estos equipos puede ser complementario al de los circuitos de vía y su uso depende en gran medida del tipo de aplicación y de las especificaciones de las compañías ferroviarias.



Fig. 1.16 Contadores de ejes para detectar la ocupación de la vía

El principio de funcionamiento de estos dispositivos consiste en la ubicación de un par de sensores de ejes (pedales) en cada uno de los extremos del tramo de bloqueo

para la detección de cada uno de los ejes de las ruedas del tren ya sea de entrada o de salida (Figura 1.17).

Cada sensor está formado a su vez por uno o dos sensores inductivos internos para poder determinar el sentido de circulación del tren, si entra o sale. Al pasar los ejes de un tren sobre la sección de vía donde están instalados los pedales, se modifican las características de acoplamiento magnético de los mismos.

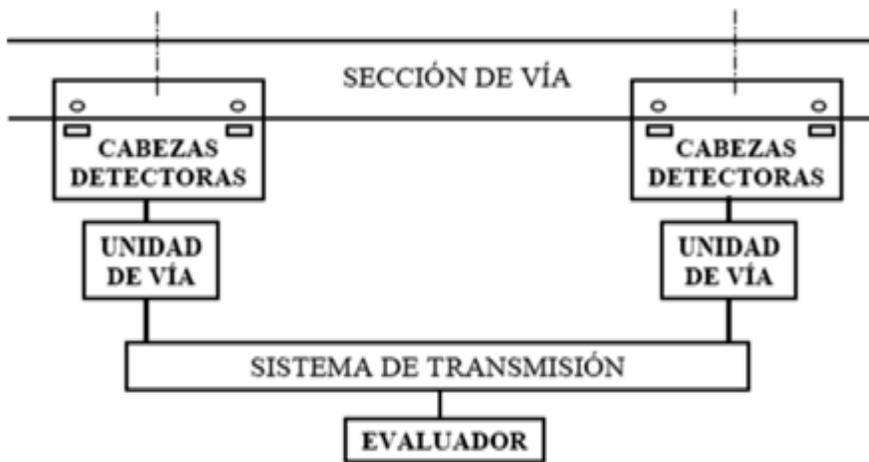


Fig. 1.17 Contador de ejes que determina la presencia del tren en una sección de la vía

Estos contadores asignan al conteo un signo positivo en el caso de ser un tren entrante en la sección de vía y un signo negativo en el caso de ser un tren saliente de la misma, según el sentido de circulación del tren. Con el paso del tren el contador de ejes, realiza una suma algebraica de los ejes existentes en dicha sección y a la salida de la sección, se realiza la operación inversa.

La sección de vía se considera libre en el momento que se cumpla que la diferencia algebraica de los dos conteos sea cero, lo que demuestra que el tren pasó completo por esa sección. Se considera ocupada la sección siempre que dicha diferencia sea distinta de cero, cuando esto ocurre se bloquea la sección, impidiendo así la entrada de más trenes a la misma, porque puede quedar una

fracción del tren en esa sección.

El conteo de ejes es un método fiable para detectar la presencia de un tren (Martínez, 2018a) o parte del mismo (vagones sueltos), o material rodante en general en una determinada sección de vía. Los contadores de ejes garantizan su correcto funcionamiento a velocidades entre 0 y 500 km/h. Estos sistemas, independientes de los carriles, permiten secciones de longitud más larga y eliminan algunos de los problemas de interferencias.

El campo de aplicación de estos equipos puede ser complementario al de los circuitos de vía y su uso depende en gran medida del tipo de aplicación y de las especificaciones de las compañías ferroviarias. La detección con contadores de ejes se utiliza normalmente en líneas con muy poco tráfico.

Contador de ejes ACS2000

El sistema contador de ejes ACS2000 (Ltda., 2012) (ver figura 1.18) se usa para supervisar con seguridad secciones de aviso de vía libre: desvíos, grupos de desvíos y secciones de vía.

En su aplicación más simple, los contactos del riel detectan la aproximación de un vehículo ferroviario, precisamente en el momento cuando la primera rueda o el primer eje del vehículo se encuentran exactamente sobre el contacto del riel.

Este principio de funcionamiento del sensor es simple, ventajoso y seguro por cuanto su instalación es sencilla, no posee electrónica de campo, o sea, la planta exterior sólo posee el sensor y la caja de conexión correspondiente, lo que abarata además los costos del equipamiento y evita en gran medida el vandalismo, aspecto este muy importante en nuestro país donde la vía férrea no está protegida contra la influencia de agentes externos.

El sistema contador de ejes ACS2000 tiene estructura modular.

El módulo contador de ejes es capaz de evaluar hasta seis informaciones de punto contador independientes, proporcionadas por módulos de evaluación.

El bastidor de módulos sirve para alojar los módulos y proporcionar protección

mecánica. Conectando en serie puntos contadores (máximo dos por cada entrada de punto contador), puede disponerse de un máximo de 12 puntos contadores, siempre que se excluya la posibilidad de paso simultáneo por dos puntos contadores conectados en serie.

El sistema puede funcionar en servicio aislado y en servicio de bloqueo. Si el sistema se emplea en servicio de bloqueo, a través del módulo de entrada/salida y conjuntamente con el módulo contador de ejes es posible transmitir bidireccionalmente vía módem 16 argumentos digitales adicionales (por ejemplo: informaciones, mensajes, órdenes, etc.).

Los argumentos se registran a través de optoacopladores y salen a través de contactos de relé libres de potencial. El módulo pararrayos protege la instalación interior contra tensiones de interferencia que pueden actuar entre el sensor de ruedas y la terminación de cable.



Fig. 1.18 Contador de ejes ACS2000

1.4 Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se ha realizado un estudio de los sistemas de bloqueo ferroviario, evidenciando los requisitos de seguridad y las normas que se aplican en el sistema del transporte por ferrocarriles, así como el principio de FAIL SAFE (seguridad ante todo fallo) y el Nivel Integrado de Seguridad (SIL), siendo todo esto de vital importancia en todo lo que se vaya a realizar en materia de señalización ferroviaria y debe ser tenido en cuenta en cualquier diseño.

Se realizó una breve descripción de los principales sistemas de bloqueo automático ferroviario que existen en el mundo relacionados con el tema del proyecto, o sea, el bloqueo automático en un trecho entre estaciones.

Se analizaron los diferentes tipos de dispositivos para determinar la presencia del tren, sensores de ruedas (pedales magnéticos) como los propuestos en el diseño que desarrollamos.

Este estudio nos permitió, para el desarrollo del proyecto, hacer una selección correcta de los sensores para la detección de la presencia del tren teniendo en cuenta las características y contexto de explotación del ferrocarril en Cuba.

CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE BLOQUEOS

En este capítulo se describen y evalúan los sistemas de bloqueo actual que emplea el ferrocarril cubano, y se hace una fundamentación del equipamiento y soluciones de hardware que forman la arquitectura del sistema de bloqueo automático que se propone en el trecho Esperanza-Santo Domingo para aumentar la seguridad y la eficiencia de la vía férrea. El sistema contempla el uso de sensores para detectar la presencia del tren en la vía, de autómatas programables que garantizan que el sistema sea completamente automático, teniendo en cuenta las condiciones actuales de Cuba.

2.1 Los sistemas de señalización y bloqueo del ferrocarril cubano actual

En Cuba actualmente se emplean dos tipos de sistemas de bloqueo en la Vía Central Habana-Santiago:

El bloqueo radiotelefónico (F. Montes, 2015), que se usa desde Santa Clara a Santiago y el bloqueo semiautomático (Kazakob, 1980) instalado de la Habana a Esperanza.

En el **bloqueo radiotelefónico** la seguridad del movimiento de los trenes recae exclusivamente sobre el hombre, ya que los mecanismos instrumentados para garantizar dicha seguridad recaen en los documentos que se establecen mediante los reglamentos, lo que significa que el error humano potencialmente está presente.

No obstante, en todos estos casos, se establece como requisito la conversación triangular (despachador del tramo y operadores de las dos estaciones correspondientes al trecho por el que se desplazará el tren) para que siempre pueda existir una tercera persona que compruebe las órdenes que se emiten.

Para que un tren circule de una estación a otra, la estación expedidora solicita la vía para dicho tren al Despachador del tramo correspondiente, este, autoriza la vía por radio o teléfono a ambos operadores de las estaciones expedidora y receptora, los cuales repiten la orden de vía (documento que contempla todas las incidencias

relacionadas con el trecho a circular por el tren, definiendo la velocidad establecida según el estado de la vía férrea) por el mismo medio.

Entonces, la estación expedidora entrega esta orden de vía, escrita en un modelo establecido para ello, al tren autorizado, le abre la señal de salida (proyecta luz verde el semáforo) y cuando el tren llega a la estación receptora, luego que el operador verifica que el tren llegó completo le informa por el mismo medio de transmisión a la estación expedidora.

Y es en este momento, que se puede enviar otro tren en el mismo sentido o contrario a este, según corresponda, siguiendo el mismo protocolo.

Como puede observarse, el tren siguiente pendiente a circular en cualquier sentido, debe esperar todo el proceso descrito para continuar su marcha.



Fig. 2.1 Sistema de bloqueo radiotelefónico

El sistema de **bloqueo semiautomático** que existe actualmente está implementado entre estaciones. Estas estaciones automatizadas están equipadas con enclavamientos eléctricos a relés fabricados en la antigua Unión Soviética (Martínez, 2018b). Los enclavamientos eléctricos son sistemas donde se controla la presencia del tren dentro de la estación, se establecen sus rutas automáticamente desde la pizarra de mando local del operador de la estación, realizando el cambio de las agujas automáticamente.

Los circuitos de vía que controlan la presencia del tren, la posición de las agujas, que permiten el enlace de las diferentes carrileras y las indicaciones de las señales semafóricas, entrelazados eléctricamente, con la ayuda del equipamiento de planta interior, componen los elementos del sistema. Ver figuras 2.2 y 2.3.



Fig. 2.2 Enclavamiento eléctrico estación Santo Domingo

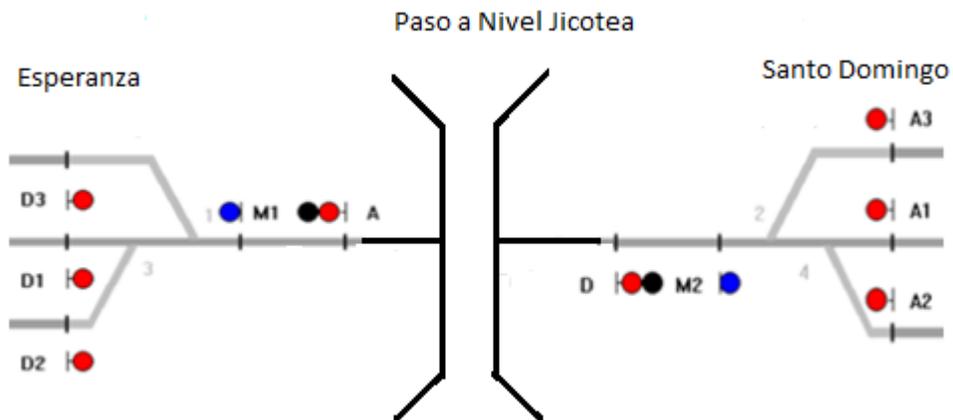


Fig. 2.3 Tramo entre enclavamientos eléctricos Esperanza-Santo Domingo

El equipamiento de tramo lo componen las instalaciones de protección de pasos a nivel (si estuvieren protegidos) y el sistema de bloqueo semiautomático (BSA) entre estaciones. Ver figura 2.4

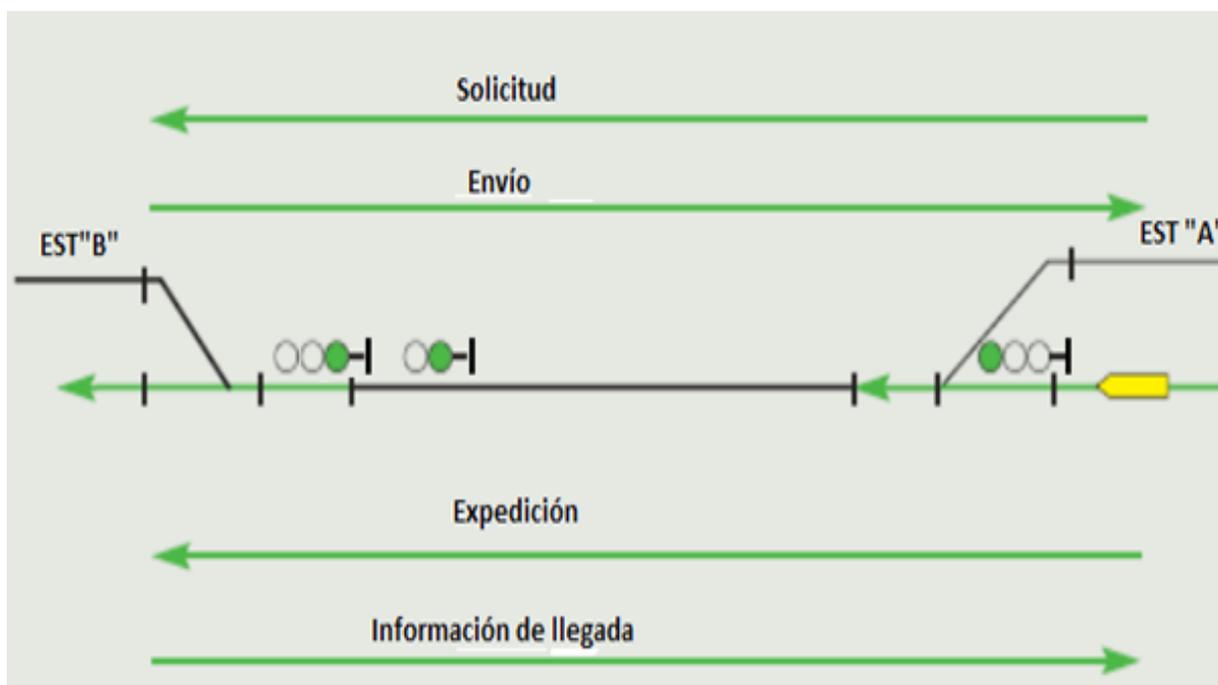


Fig. 2.4 Esquema de funcionamiento del BSA

A continuación, se explica el principio de funcionamiento de este sistema BSA:

En el sistema BSA la estación que expide el tren (estación "A") pide verbalmente por el circuito telefónico llamado circuito entre estaciones, el consentimiento para expedir un tren.

En la estación que recibe dicho tren el operador oprime un botón habilitado para esto en su pizarra de mando local para el envío de consentimiento, y la señal eléctrica viaja por un circuito destinado al uso del BSA, (un par de alambres de cobre desnudos instalados por vía aérea) hasta la estación que expide, indicando en la pizarra de mando que el tren ha sido autorizado.

En la estación de expedición el operador elabora la ruta de salida del tren y cuando se abre la señal de salida de la estación, automáticamente la pizarra indica en ambas estaciones que el trecho ha sido bloqueado.

Se mantendrá el trecho bloqueado hasta que el tren llegue a la estación de recepción y su operador, después de cerciorarse de que el tren llegó completo, envíe la señal de información de llegada, oprimiendo el botón destinado a esta función en su pizarra de mando local y la señal se envía del mismo modo explicado anteriormente.

De esta manera se libera el trecho para el envío de otro tren.

Este sistema de bloqueo, aunque tiene más seguridad que el telefónico, también es vulnerable, ya que el factor humano incide directamente en el envío y recepción de los trenes.

Resulta ineficiente, igualmente al bloqueo radiotelefónico descrito, ya que para la expedición de un tren desde una estación hacia otra, hay que esperar que el tren que le antecede llegue a la estación a la que fue enviado para poder circular este.

En ambos tipos de bloqueo descritos la indicación al maquinista de si el siguiente cantón o sección está libre u ocupado se da en las estaciones. De este modo un cantón tiene que ocupar toda la vía entre una estación y la colateral, ya que no hay modo de comprobar en qué punto intermedio se encuentra un tren.

En la figura 2.5 se puede observar que la ocupación del cantón o sección se considera cuando un tren ha sido expedido desde una estación y no ha llegado completo a la siguiente.



Fig. 2.5 Bloqueo radiotelefónico y semiautomático (BSA)

Todo esto origina desaprovechamiento de la capacidad de vía, gasto de combustible, costos de explotación, inseguridad en el movimiento de trenes, largos intervalos de tiempo de circulación, cuestiones estas que ocasiona molestias a los pasajeros por la demora excesiva en su traslado, la carga transportada no llega en tiempo a su destino, estas son, entre otras, las principales deficiencias de este sistema.

2.2 Sistema de bloqueo automático. Solución propuesta

Como se puede apreciar, el sistema de bloqueo ferroviario semiautomático descrito anteriormente limita la capacidad de vía, ya que se requiere que un tren llegue a la estación siguiente para poder expedir otro, en el mismo sentido o contrario.

Para la solución de este problema y adaptado al ferrocarril cubano se pueden emplear otros tipos de bloqueo, como por ejemplo, el bloqueo automático y disminuir los tramos entre estaciones para aumentar la capacidad de tráfico en la vía.

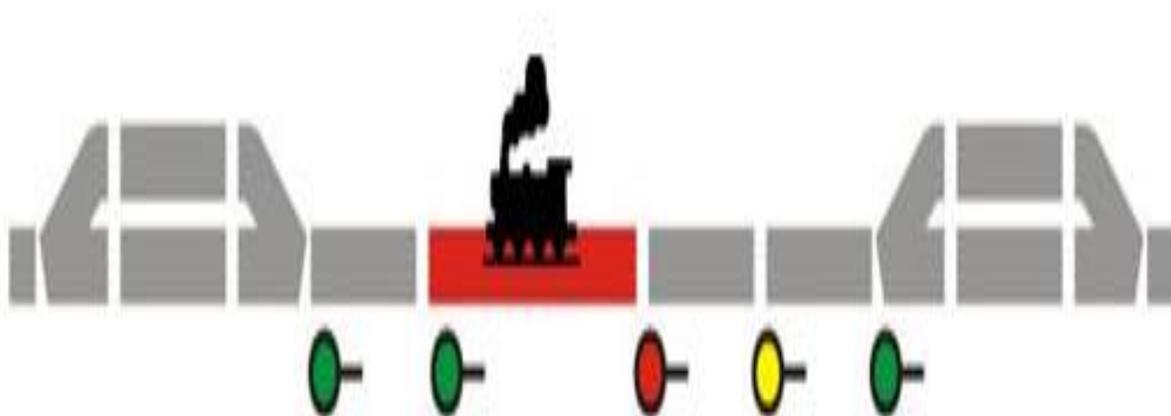


Fig. 2.6 Bloqueo automático

Considerando todo el análisis realizado en el capítulo anterior se propone la arquitectura de un sistema de bloqueo automático con contadores de ejes, sensores que detectan la presencia del tren en la vía y controladores lógicos programables (PLC) (Castro, 2018b; Martínez, 2018a).

Diseñado para las características del ferrocarril cubano (baja velocidad y baja densidad de tráfico), utilizando la plataforma técnica existente (enclavamientos eléctricos, circuitos de vía, soporte de comunicaciones por fibra óptica y GSM-R).

Para ello se hace necesaria la selección de los sensores más adecuados para la detección del tren en la vía, así como la selección de los dispositivos de cómputo y sistema de comunicación.

2.2.1 Selección del sensor

Esta tecnología de Frauscher resulta menos costosa y más factible para la programación de los PLCs, por las facilidades de enlace de la planta exterior con los edificios técnicos y por no tener equipamiento electrónico de campo, lo cual implica significativas ventajas.



Fig. 2.7 Sensor de rueda FRAUSCHER para detectar el sentido del movimiento

Este sensor posee un módulo para detectar la aproximación del tren en ambos sentidos y un módulo contador de ejes para la información en el circuito de vía del paso del tren. El principio de funcionamiento del sensor de rueda RSR-122 consiste en que consta de dos sistemas (sistema 1 y sistema 2) que se alimenta con corriente directa y se calibran sin la presencia de rueda del tren a una corriente de 500 mA en estado de reposo.

Al paso de una rueda por encima del sensor, sin entrar en contacto físico con este, se produce una modificación del campo magnético, lo que provoca una caída brusca de la corriente de reposo, puesto que ambos sistemas están muy próximos uno del otro, esta caída de corriente es detectada por el módulo electrónico evaluador.

Posteriormente ocurre lo mismo en el otro sistema y en dependencia de la secuencia en que ocurra, el sistema determina el sentido en que circuló la rueda y por tanto, si suma o resta a la cantidad de ejes que se encuentran en el circuito de vía.

Como ya se explicó anteriormente se da el circuito de vía como ocupado si el conteo es diferente de cero y desocupado si es cero (Castro, 2018a; Martínez, 2018a).

Este sistema (el sensor y el módulo evaluador) cumplen con el principio FAIL SAFE ya que cualquier fallo que ocurra como por ejemplo rotura del cable, caída del sensor de su posición en el carril, pérdida de alimentación eléctrica, etc., trae como consecuencia la caída de la armadura del relé de salida del módulo evaluador, lo que es interpretado por el sistema como circuito de vía ocupado adoptándose la posición segura. Además, todos los componentes son SIL 4 (INOR, 2016).

La figura 2.8 es una representación gráfica del comportamiento de las corrientes en el sensor al paso de una rueda.

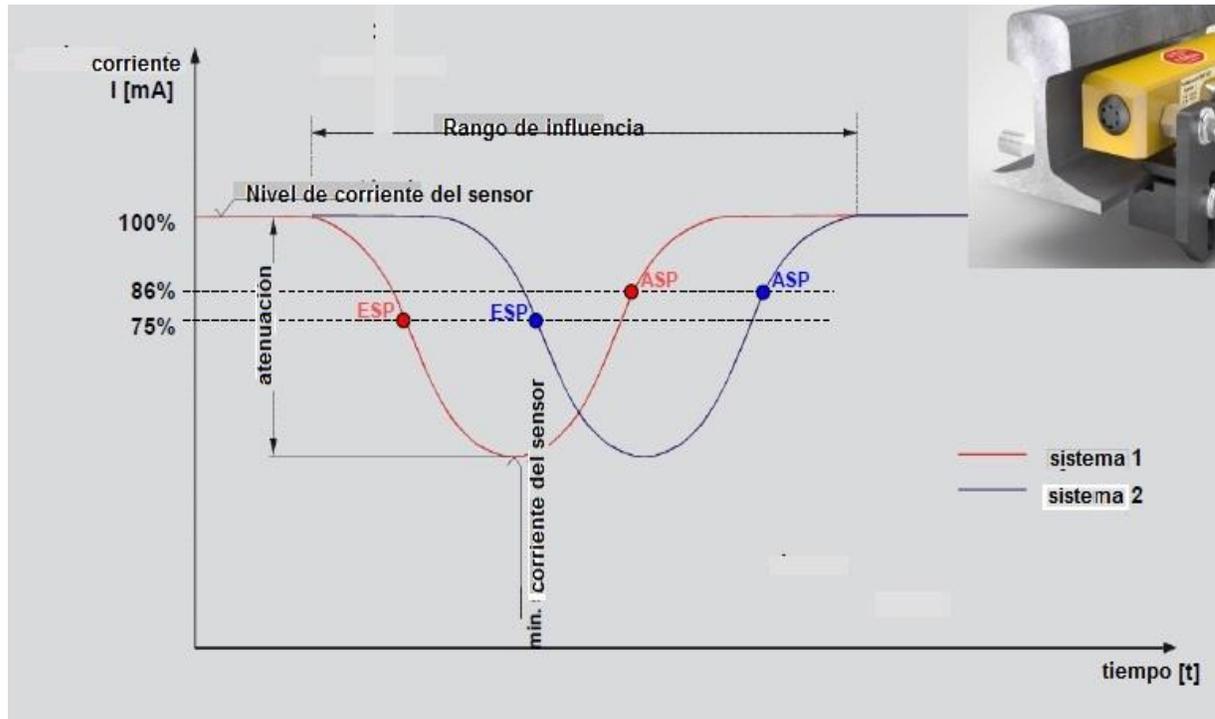


Fig. 2.8 Corriente del sensor de ruedas RSR-122

Entre las ventajas de este sensor se tienen que no requiere de equipamiento electrónico exterior que esté expuesto a la intemperie, vandalismo, así como descargas eléctricas atmosféricas, además de que es muy fácil su instalación y mantenimiento, lo que aumenta su fiabilidad y mantenibilidad, por otra parte, no se requiere el aislamiento de la vía ni la soldadura de conectores en la sección de vía a controlar.

2.2.2 Selección del PLC

Los PLCs o también llamados autómatas programables (Edublog, 2014), (Unicen, 2013) son dispositivos electrónicos que se crean específicamente para el control en tiempo real de procesos.

Cuando se utilizan en procesos secuenciales, es decir, procesos compuestos de varias etapas consecutivas, hacen que una máquina o cualquier otro dispositivo funcione de

forma automática (Eaton, 2014). Puesto que están pensados para aplicaciones de control industrial, su diseño les confiere una especial robustez.

En la automática ferroviaria para la selección del PLC hay que tener en cuenta el Concepto de Nivel Integrado de Seguridad (SIL) (Gil, 2006).

Por tanto, resulta necesario determinar el SIL que requiere un proceso para que garantice la seguridad requerida, para lo cual se utiliza el proceder que se muestra gráficamente en la figura 2.9, en la cual se representa la ruta adecuada para el sistema / subsistema / componente que se quiere valorar, donde partiendo de un punto de inicio de valoración del riesgo se siguen las clasificaciones identificadas por las letras S, A, G y W según se determine, hasta llegar al SIL requerido que corresponde. (Castro, 2018b; Martínez, 2018a).

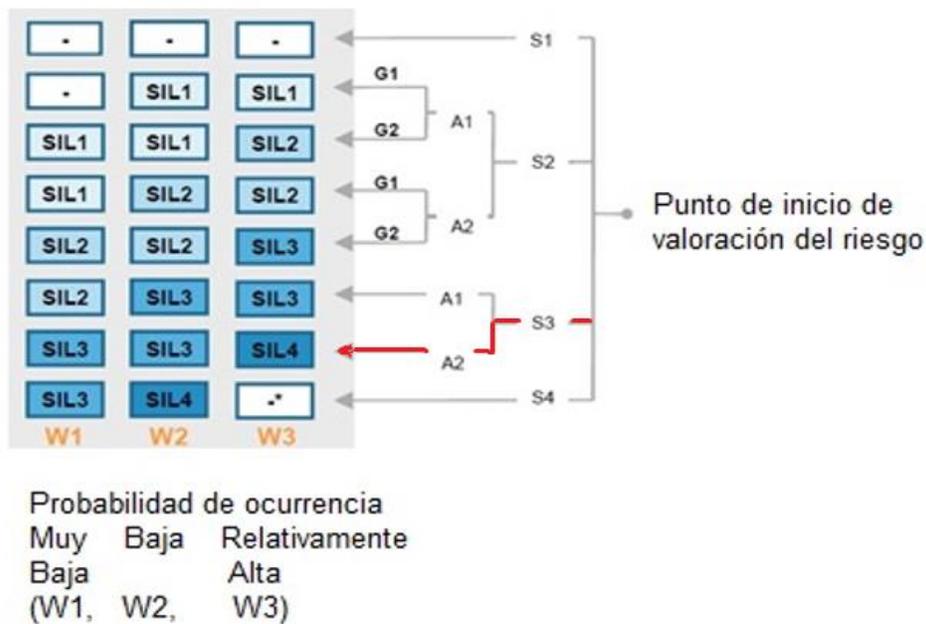


Fig. 2.9 Gráfico para la determinación del SIL

Partiendo del gráfico de la figura anterior y de los elementos teóricos (INOR, 2016) (Castro, 2018a) explicados, se procede a determinar el Nivel Integrado de Seguridad requerido para la seguridad del bloqueo automático propuesto.

Se puede considerar que desde el punto de inicio de valoración del riesgo le corresponde S3 ya que en una colisión de trenes puede ocurrir la muerte de varias personas; A2 dado que la frecuencia con que ocurren los eventos es alta (cantidad de material rodante que circula en la vía); y la probabilidad de ocurrencia se puede considerar entre relativamente alta y baja, por lo que estaría entre W2 y W3.

Puesto que en señalización ferroviaria siempre se debe adoptar la variante más segura se asume que es W3, con lo que da como resultado que al sistema propuesto se le asigna un Nivel de Seguridad Integrada SIL4. Lo cual se corresponde con la práctica internacional en esta materia (Wigger, 2015b).

No obstante, si se particulariza para cada trecho en específico, en el caso de que sea relativamente bajo, tiene una frecuencia de ocurrencia de los eventos de A1, con lo cual la ruta de valoración del riesgo sería un SIL3.

Por consiguiente, a los afectos de este trabajo se determina que para este sistema de bloqueo automático se requiere un Nivel Integrado de Seguridad, que clasifica en el nivel de SIL4.

Una vez determinado el SIL de una función de seguridad se necesita evaluar el sistema o dispositivo que cumpla con dicho nivel de clasificación SIL, para lo que se emplea el método FMEDA (Modo de Falla, Efecto y Análisis de Diagnóstico) (Segura, 2013).

Para ello se utilizan básicamente, tres parámetros resultantes de FMEDA para la clasificación SIL del dispositivo:

1. Tolerancia a fallas de hardware (HFT).
2. Fracción de falla segura (SFF).
3. Probabilidad de falla a pedido (PFD_{AVG}).

A continuación se describen estos parámetros.

Tolerancia a fallas de hardware.

La HFT de un dispositivo indica la calidad de una función de seguridad. A través de una operación probada y de diferentes requisitos de seguridad, el valor del HFT puede ser cero o uno:

HFT = 0 Uso de un solo canal. Una sola falla puede causar una pérdida de seguridad.

HFT = 1 versión redundante. Al menos dos fallas de hardware deben ocurrir al mismo tiempo para causar una pérdida de seguridad.

Fracción de falla segura.

Este valor representa la fracción de fallas de dispositivos seguros. Por ejemplo, un SFF de 85% significa que 85 de 100 fallas del dispositivo no afectan la función de seguridad del dispositivo.

El SFF se usa junto con el HFT para determinar el nivel de seguridad en el que el dispositivo puede ser utilizado teniendo en cuenta estos dos valores, lo que se muestra en la tabla 2.1 del Anexo 2.

Como se puede apreciar en dicha tabla 2.1, para que un sistema, subsistema o dispositivo cumpla con el requisito de SIL 4 debe tener, una SFF de 90-99% con una HFT= 2 ó una SFF > 99 % con una HFT= 1.

Probabilidad de falla a pedido.

La PFD indica la probabilidad de falla de una función de seguridad (SIF) o un dispositivo, referido a un cierto intervalo de tiempo llamado Intervalo de prueba. Por ejemplo: Una $PFD = 3,35 \times 10^{-4}$ con $T = 1$ año significa que la función de seguridad o el dispositivo falla con una probabilidad de 0.000335 dentro de un año.

La tabla 2.2 del Anexo 2 muestra qué PFD le corresponde a cada SIL, por lo que cualquier sistema o dispositivo que se emplee debe cumplir con los requisitos que esta clasificación determine.

Partiendo de dicha tabla se deduce que para que un sistema o dispositivo cumpla con el requisito SIL4 debe tener una probabilidad de fallo a pedido $PFD \geq 10^{-6} \dots < 10^{-4}$ en un año.

Resumiendo todo lo analizado hasta aquí referente a la determinación del *Nivel Integrado de Seguridad (SIL)* que requiere un sistema de bloqueo automático para que sea SIL4, el mismo debe tener:

- a) Una tolerancia a fallas de hardware (HFT) = 1 versión redundante.
- b) Una Fracción de fallo seguro (SFF) > 99 %.
- c) Una Probabilidad de falla a pedido (PFD) $\geq 10^{-6}$... < 10^{-4} .

Cualquier sistema o dispositivo que se emplee debe cumplir con estos requisitos.

Como ya ha sido definido, un sistema de señalización ferroviaria como el caso del presente trabajo (Castro, 2018a; Martínez, 2018a) teniendo en cuenta que la solución que se propone en esta investigación tiene como requisito la utilización de elementos de hardware que cumplan con un SIL4.

Según los fabricantes de autómatas (SIEMENS, 2015) que se han elegido, se suministran estos equipos en la categoría de seguros, sin embargo, solo alcanzan un SIL3, (Castro, 2018b) esto obliga a tomar medidas adicionales para garantizar la seguridad en aplicaciones que requieren un SIL4.

La tabla 2.1 muestra algunos tipos de autómatas programables seguros que actualmente se comercializan. Se puede apreciar que la mayoría clasifica en la categoría de SIL3.

Tabla 2.1 Fabricantes de PLC seguros

Fabricante	Marca	Ethernet	RIO de seguridad	RIO señales estándares	Nivel máximo
General Electric	PAC Systems	Si	Si	Si	SIL2
HIMA	HIMatrix	Si	Si	No	SIL3
Omron	NE1A Series	Si	No, se hace mediante otro PLC esclavo (32 Max)	Si	SIL3
Pilz	Control Systems PSS	Si	Si	Si	SIL3
Rockwell Automation	SmartPLC	Si	Si	No	SIL3
Siemens	Simatic S7F	Si	Si	Si	SIL3

El fabricante SIEMENS suministra PLC seguros tipo F entre los que se encuentra la CPU 315F, según el proveedor clasifica solo en el nivel SIL3.

Esta CPU posee un número de entradas/salidas digitales de 1000/1000 y un número entradas/salidas analógicas I/O de 248/124 por lo que resulta suficiente para la aplicación objeto de estudio.

Aunque, por ser de solo clasificación SIL3, se hace necesario para elevar dicho SIL y hacerlo redundante orientado (For technical documentation on SIPLUS, see) a la seguridad a fin de que su Tolerancia a Fallo del Hardware (HFT) sea 1, a la vez que su SFF (Fracción de Fallo Seguro) sea mayor de 99% como quedó definido anteriormente, con lo que aplicando la tabla 2.1 del Anexo 2 se obtendrá el sistema SIL4 correspondiente a la clasificación exigida en el presente trabajo.

Por lo antes expuesto se decide seleccionar para el diseño dos autómatas programables S7 315F en arquitectura redundante que garanticen la disponibilidad del sistema ante cualquier fallo.

Con programación orientada a la seguridad, lo cual es explicado con más detalles al describir la arquitectura del sistema de bloqueo automático propuesto. Con lo cual se garantiza la seguridad, acorde con las exigencias internacionales y particulares en Cuba.

2.2.3 Soporte de comunicaciones

El soporte para comunicaciones que se selecciona es el GSM-R y Fibra Óptica, que se encuentra instalado en la infraestructura ferroviaria en la Vía Central del ferrocarril cubano, en fase de prueba, esta inversión se ejecuta actualmente en el país para el sistema de modernización de las comunicaciones ferroviarias.

El GSM-R (de «*GSM-Railway*», *GSM-Ferrocarril*) (ERTMS, 2014) es un sistema de comunicación digital inalámbrico desarrollado específicamente para la comunicación ferroviaria. Provee a los ferrocarriles de radiotelefonía y línea de datos.

Constituye un sistema de comunicaciones móviles de uso exclusivo para el sector ferroviario. Permite el contacto continuo entre tripulación, tren y tierra para el intercambio de datos entre los sistemas ubicados al lado de la vía y a bordo, a través del establecimiento de conexiones por conmutación de circuitos.

Se implementa normalmente utilizando mástiles de estación base dedicados cerca del ferrocarril, con la cobertura del túnel efectuada mediante el uso de antenas direccionales o transmisión de alimentación "con fugas" . La distancia entre las estaciones base es de 7 a 15 km (4,3 a 9,3 mi). Esto crea un alto grado de redundancia y una mayor disponibilidad y fiabilidad.

Por tanto, satisface de manera eficiente e integrada la comunicación y transmisión de datos relacionadas con la operación ferroviaria.

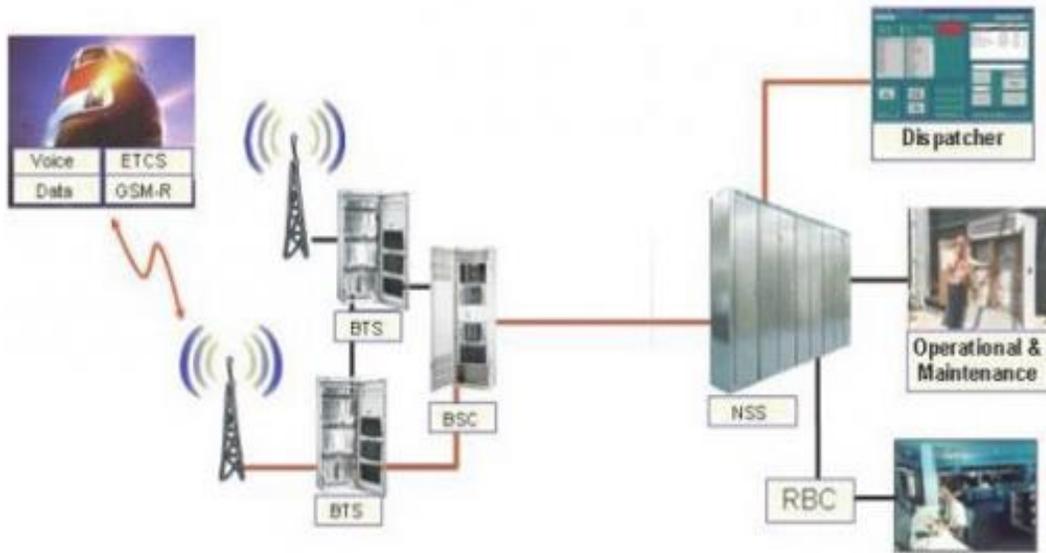


Fig. 2.10 Sistema de comunicaciones GSM-R

Se propone utilizar el módulo de comunicación SIMATIC S7-300 SIPLUS S7-300 para los PLCS.



Fig. 2.11 Módulo de comunicaciones SIMATIC S7-300

Características:

Conexión de SIMATIC S7-300. Operación multiprotocolo con TCP y UDP protocolo de transporte - Función de mantenimiento ajustable • Dos interfaces separadas (separación de red integrada): - Interfaz Gigabit con un puerto RJ45 con 10 / 100/1 000

con capacidad de detección automática. Interfaz PROFINET con dos puertos RJ45 con 10/100 Mbit con funciones de detección automática y cruce automático a través del conmutador integrado de 2 puertos • Servicios de comunicación a través de ambas interfaces. Red cruzada mediante enrutamiento S7 - Comunicación S7 (cliente, servidor, multiplexación), incluido el enrutamiento entre ambas interfaces. Configuración con STEP 7 (For technical documentation on SIPLUS, see).

Admite el procedimiento de redundancia de medios (MRP) dentro de una red Ethernet con topología en anillo.

2.2.4 Consideraciones finales del capítulo

En este capítulo se describen los dos sistemas de bloqueo, radiotelefónico y el semiautomático (BSA), instalados actualmente en el ferrocarril cubano y sus principales deficiencias

Se analiza cuáles de los elementos del BSA pueden ser empleados en la nueva solución y se describen y fundamentan las soluciones de hardware más idóneas para el diseño del sistema automático que se propone en el próximo capítulo.

Se selecciona el circuito de vía AC/DC para la detección de la presencia del tren por su probada afectividad, adecuación a las condiciones del ferrocarril cubano y como principal ventaja, su instalación actual dentro del sistema BSA.

Así como el uso de los pedales electrónicos cuentaejjes utilizando como sistema contador el pedal electrónico Frausher modelo RSR-122.

La decisión del empleo del PLC S7 315F, se fundamenta en sus prestaciones como versión segura del fabricante SIEMENS, en redundancia orientada a la seguridad, para lo cual se siguen las normas europeas como referente.

CAPÍTULO 3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE BLOQUEO PARA EL TRECHO ESPERANZA-SANTO DOMINGO.

En el capítulo se describe la arquitectura general del sistema de bloqueo para el trecho de la vía férrea ubicado en Esperanza - Santo Domingo según el protocolo de establecimiento de rutas establecido en bloqueos automáticos ferroviarios. Se parte de las soluciones propuestas en trabajos anteriores (Castro, 2018a; Martínez, 2018a) y se describen de manera detallada los algoritmos de programación que conforman cada uno de los módulos de PLCs y sus funciones dependiendo de la ubicación que tengan en el sistema.

Se hace una valoración económica teniendo en cuenta además del costo económico del equipamiento a emplear el efecto social que puede introducir la implementación del sistema en el ferrocarril cubano para lograr un sistema con altos niveles de seguridad en el tráfico de trenes y por supuesto, su alto valor para preservar la vida de seres humanos y evitar cuantiosas pérdidas materiales provocadas por accidentes.

3.1 Arquitectura del sistema.

El diseño de la arquitectura se orienta a la solución de un problema que urge resolver para mejorar el tráfico de trenes en la División Centro y en general en el país. La Línea Central, dentro de la División Centro es un nodo muy importante de la red ferroviaria cubana, por donde circulan una buena cantidad de pares de trenes, actualmente existe una tendencia a incrementar los niveles de tráfico con nuevos proyectos que se llevan a cabo, lo que traerá un aumento sustancial del tráfico de trenes en esta región del país.

Como ya se ha explicado anteriormente el sistema de bloqueo automático se ajusta a las condiciones actuales del ferrocarril, utilizando la plataforma técnica existente. Los enclavamientos de Esperanza y Santo Domingo tienen instalados el sistema de bloqueo semiautomático que no cumple con las necesidades de respuestas actuales y la intervención del factor humano hace que no sea seguro y que tampoco permita

lograr mayores flujos de tráfico. El sistema de bloqueo automático que se propone es en el trecho entre estaciones, aprovechando las posibilidades que brinda el sistema instalado actualmente (Martínez, 2018b).

3.1.1 Protocolo para el establecimiento de rutas en el bloqueo automático ferroviario

Para organizar el movimiento de trenes mediante bloqueo automático entre dos estaciones se hace necesario establecer un protocolo para el envío y recepción de los trenes mediante paquetes o grupo de trenes ascendentes y descendentes, que debe ser observado y ejecutado por los operadores de las correspondientes estaciones y el despachador del tramo, el cual se propone a continuación:

Para el establecimiento de una ruta, ascendente o descendente, entre las estaciones debe cumplirse lo siguiente:

- a) El Operador que va a expedir un paquete o grupo de trenes desde una Estación solicita verbalmente consentimiento al Operador que va a recibir este grupo de trenes.
- b) El Operador de la Estación receptora solicita autorización al Despachador del Tramo.
- c) El Despachador emite una orden verbal con un número consecutivo que es anotado en los libros de órdenes de ambos Operadores.
- d) El Operador que expide oprime el botón de solicitud de Ruta Ascendente (ASC) o Descendente (DSC), según corresponda.
- e) El Operador que recibe oprime el botón de consentimiento de Ruta Ascendente (ASC) o Descendente (DSC), según proceda.
- f) Expedición del tren.
- g) Cuando el Operador de la estación que expide recibe la indicación en el monitor de que se ha establecido la ruta ASC o DSC procede a la apertura de la señal de salida del primer tren que va a expedir.
- h) Una vez que el primer tren sale al trecho ocurre el bloqueo automático de las señales de salida para el resto de los trenes, que lo observa el Operador de la estación e en su monitor.

Capítulo 3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE BLOQUEO PARA EL TRECHO ESPERANZA-SANTO DOMINGO

- i) Cuando el primer tren llegue al primer punto de bloqueo completo se desbloquean las señales de salida en la estación que expide, por lo que su Operador puede abrir la señal de salida para el otro tren disponible del paquete o grupo.
- j) Cuando todos los trenes del paquete hayan sido expedidos y recepcionados por la otra estación, ambos Operadores pueden solicitar al Despachador el establecimiento de una ruta en el sentido contrario, repitiéndose el ciclo..

En la figura 3.1 se muestra una representación esquemática abreviada o esquema monolineal del diseño del bloqueo automático entre la estación Esperanza-Santo Domingo. Es válido aclarar que la arquitectura propuesta puede ser aplicada a otros trechos de vía en la línea central del ferrocarril cubano que cumplan con los requerimientos técnicos y la infraestructura disponible.

Esta investigación puede decirse que es el completamiento de anteriores soluciones que no tenían en cuenta el bloqueo de trechos entre estaciones.

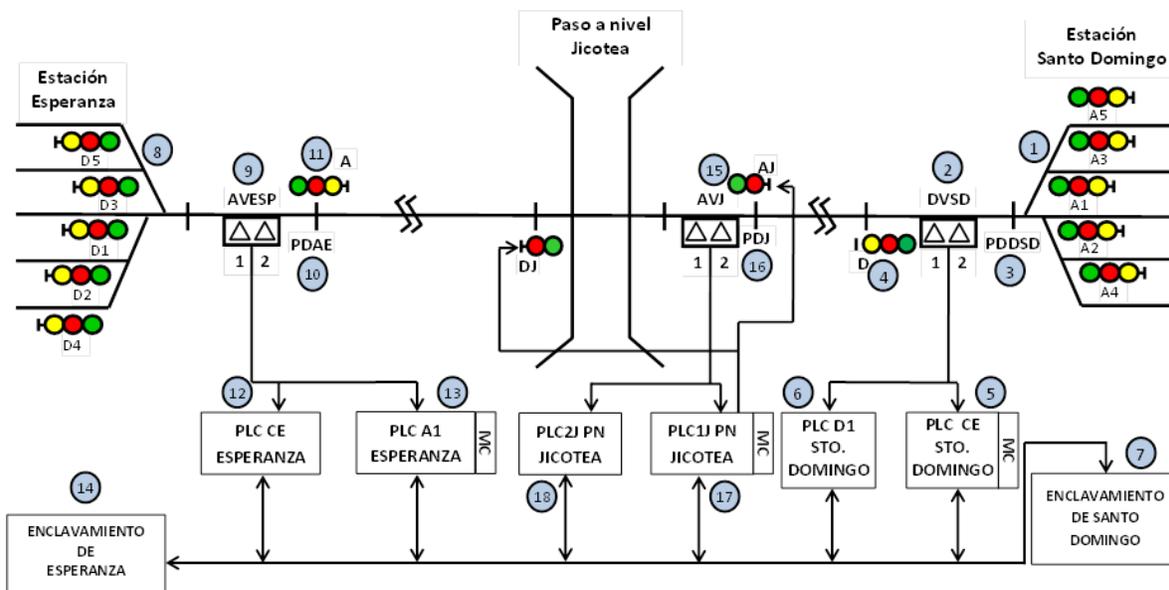


Fig.3.1 Arquitectura del sistema automático para el trecho Esperanza -Santo Domingo

El punto 1 representa la cabeza descendente de la estación de Santo domingo con sus correspondientes señales de salida ascendentes A1, A2, A3, A4, A5, etc.

En el punto No. 2 se representa el circuito de vía DVSD que es el circuito de vía descendente que existe en la estación de Santo Domingo.

En el punto No. 3 se representa dentro del circuito de vía DVSD el pedal electrónico contador de ejes PDDSD (pedal descendente de Santo Domingo).

El punto No. 4 muestra la señal de entrada D descendente de Santo Domingo.

En el punto No. 5 se tiene el PLC CE ubicado en Santo Domingo, este es el PLC principal de este punto de conteo de ejes que actúa en redundancia con el PLC D1 de Santo Domingo que se representa en el punto No. 6 y es el auxiliar de este punto de conteo.

El PLC CE de Santo Domingo además de realizar la función de contar los ejes que entran o salen de la estación de Santo Domingo se encarga de interactuar, mediante los dispositivos de enlace, con el enclavamiento de Santo Domingo que se observa en el punto con el No. 7.

Similares funciones, pero en sentido contrario se realizan en la estación de Esperanza en los puntos 8, 9, 10, 11, 12,13 y 14.

En el punto No.15 se representa el circuito AVJ que es el circuito de vía ascendente del paso a nivel de Jicotea, el cual existe en el sistema de protección automático de dicho paso a nivel.

En el punto No.16 se muestra el pedal electrónico contador de ejes PDJ del punto de conteo de ejes del paso a nivel de Jicotea.

En el punto No.17 se observa el PLC1J que es el PLC de conteo de ejes del paso a nivel de Jicotea y en el 18 el PLC2J que es el PLC que actúa en redundancia orientada a la seguridad con el anteriormente mencionado.

El conteo de ejes se realiza en el trecho entre las estaciones de Santo Domingo y Esperanza, cuando existe una ruta ascendente o descendente para la recepción o expedición de trenes de cualquiera de las carrileras de los enclavamientos. En el caso de realizar rutas de maniobras internas en la estación, no se habilita el conteo.

3.1.2 Funcionamiento general

Se considera que el tren que circula en sentido ascendente, o sea, de Santo Domingo hacia Esperanza (de cualquiera de las carrileras de la estación), y el semáforo de

salida de la estación está abierto (tiene luz verde), por tanto, está autorizado a circular por el trecho, el tren pasa por encima del dispositivo cuenta-ejes del pedal DVSD de los PLCs CE y D1 que se encuentran en el enclavamiento de Santo Domingo.

Ambos PLCs, desde que pasa el primer eje de ruedas del tren inician, cada uno el conteo de estos. Cuando el último eje pasó el inicio y final del conteo se determina en el algoritmo mediante la ocupación y desocupación del circuito de vía DVSD, ambos PLCs CE y D1 comparan el resultado del conteo, si contaron el mismo número de ejes, el PLC CE envía una señal a los dispositivos de enlace con el enclavamiento eléctrico que bloquean las señales de salida al trecho y no puede acceder otro tren al trecho.

Al mismo tiempo este PLC CE envía también una señal a los PLCs que se encuentran en el punto de bloqueo de Jicotea 1J y 2J con la cantidad de ejes contados en ese pedal.

Los PLCs 1J y 2J de Jicotea, comienzan a contar los ejes al paso del tren por encima de sus pedales, cuando termina de pasar el último par de ruedas, estos PLCs comparan su conteo, si el conteo de ambos PLCs es idéntico, compara este conteo con el que le envió el PLC CE de Santo Domingo y envía un código a este PLC CE con el conteo realizado que de ser idéntico libera las señales de salida en la estación de Santo Domingo y el trecho correspondiente, a la vez envía otra señal con el número de ejes contados a los PLCs CE y A1 que se encuentran en el enclavamiento de Esperanza y bloquea la señal AJ impidiendo el avance de un tren.

Los PLCs CE y A1 del enclavamiento de Esperanza, desde que pasa el primer eje de ruedas del tren inician, cada uno el conteo de los mismos. Cuando el último eje pasó, ambos PLCs CE y A1 comparan el resultado del conteo, si contaron el mismo número de ejes lo comparan con el número de ejes enviados por la señal del PLC 1J de Jicotea, si el conteo coincide con este PLC 1J de Jicotea, este PLC CE de Esperanza envía una señal con el número de ejes contados y comparados con los enviados al PLC 1J de Jicotea y este PLC 1J envía una señal a Jicotea que nuevamente las compara y libera el trecho correspondiente, autorizando la circulación de otro tren.

En caso de que la circulación del tren sea en sentido descendente, o sea, de Esperanza hacia Santo Domingo, la secuencia de funcionamiento es la misma, pero en sentido inverso.

3.2 Descripción de los algoritmos de programación

Como se mencionaba anteriormente, en cada uno de los puntos de conteo de ejes existen dos PLCs en arquitectura redundante orientada a la seguridad, es decir, cada PLC de un punto de conteo realiza el conteo de los ejes que entran o salen, se comparan ambos conteos y si son iguales se transmite este dato de forma segura mediante el sistema GSM-R hacia los siguientes puntos de conteo para su comparación y el desbloqueo del sector, si coinciden los conteos de ambos puntos.

Por otra parte, los PLCs principales de cada punto de conteo interactúan con sus respectivos enclavamientos (mediante los dispositivos diseñados para el acoplamiento del PLC con el sistema de funcionamiento del enclavamiento), por lo que cada PLC tiene un algoritmo diferente.

Con el fin de simplificar esta descripción se explicará el algoritmo del PLC CE Santo Domingo que es similar al PLC CE Esperanza, pero en sentido contrario.

De igual manera se describe el algoritmo del PLC D1 Santo Domingo que es igual al del PLC A1 de Esperanza, igualmente en sentido contrario.

También se describe el algoritmo del PLC 1J que es igual al algoritmo del PLC 2J de Jicotea, también en sentido contrario.

3.2.1 Algoritmo de programación de los PLCs del sistema

Puesto que el algoritmo de programación, tanto en sentido ascendente como descendente del movimiento del tren es similar excepto en el cambio de nomenclatura de las variables solo se describe la rama correspondiente a una ruta en sentido ascendente.

3.2.1.1 Algoritmo de programación del PLC CE Santo Domingo

1. Partiendo del Inicio, el sistema pregunta si existe solicitud de ruta ascendente por el enclavamiento de Santo Domingo (1), si es no, pregunta si hay solicitud descendente por Esperanza (2), si es no, regresa al inicio.
2. En el caso de que exista solicitud de ruta ascendente por Santo Domingo (3) se pregunta si existe consentimiento de ruta ascendente por Esperanza (4), si es sí (5), es denegada la solicitud de ruta ascendente (6) y se regresa al Inicio.
3. Si es no (4), se pregunta si hay ruta descendente (7), si es sí, significa que se puede mover un tren al encuentro y por lo tanto hay que ir a (6), denegar solicitud de ruta ascendente porque puede ocurrir una colisión.
4. Si es no (8), se pregunta si hay en memoria dato de ejes ASCSD, si es sí (9), se regresa a (6) denegando ruta ascendente. Igual se hace con los datos de ejes ASCJ, DSCESP y DSCJ; cuando todo lo anterior sea no, significa que en el trecho no hay ningún tren en movimiento y entonces se ordena establecer ruta ascendente y bloquear la señal D descendente de Santo Domingo.
5. Se envía (11) información de ruta ascendente a Esperanza, Jicotea y al PLC de Santo Domingo, se pregunta (12) si ya llegó la información de ruta ascendente a Esperanza, si no ha llegado (13) se regresa a preguntar hasta que llegue.
6. Cuando llegue (14) se comienza a preguntar si se ha ocupado el circuito de vía DVSD (15), lo cual significaría que el enclavamiento de Santo Domingo abrió una señal de salida ascendente y un tren comenzó a moverse hacia Esperanza; si no se ha ocupado el circuito de vía (16) se regresa a (15) hasta que se ocupe (17).
7. A partir de aquí se comienza a preguntar si se ocupa primero el sistema 2 del pedal PDDSD (pedal descendente de Santo Domingo) (18) y seguidamente la ocupación del sistema 1 de dicho pedal (19).
8. A continuación se comprueba la desocupación primero del sistema 2 (20) y después del sistema 1 (21); lo cual significaría que un eje pasó en sentido

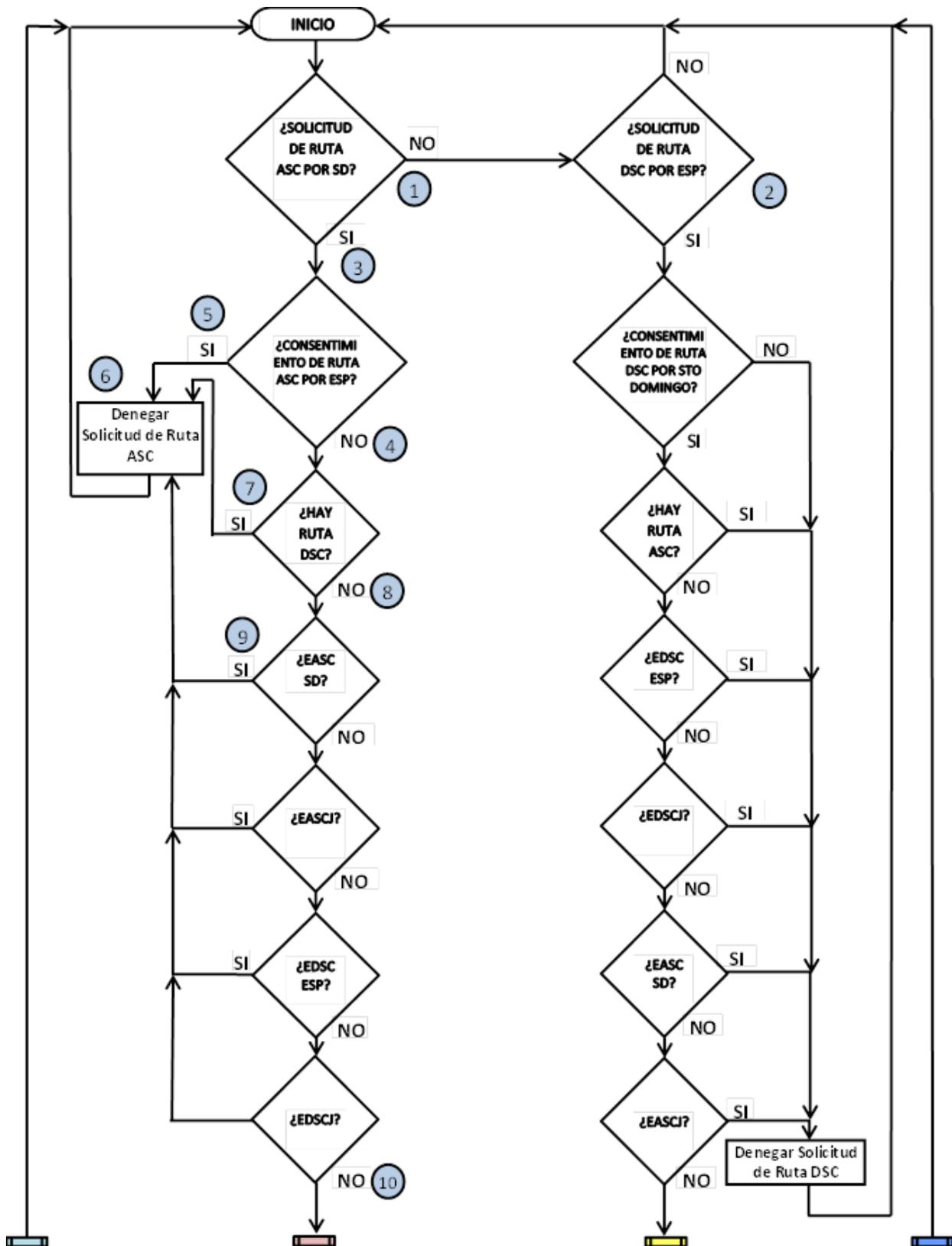
ascendente, entonces se ordena sumar un eje EASCSD (ejes ascendente de Santo Domingo) (22).

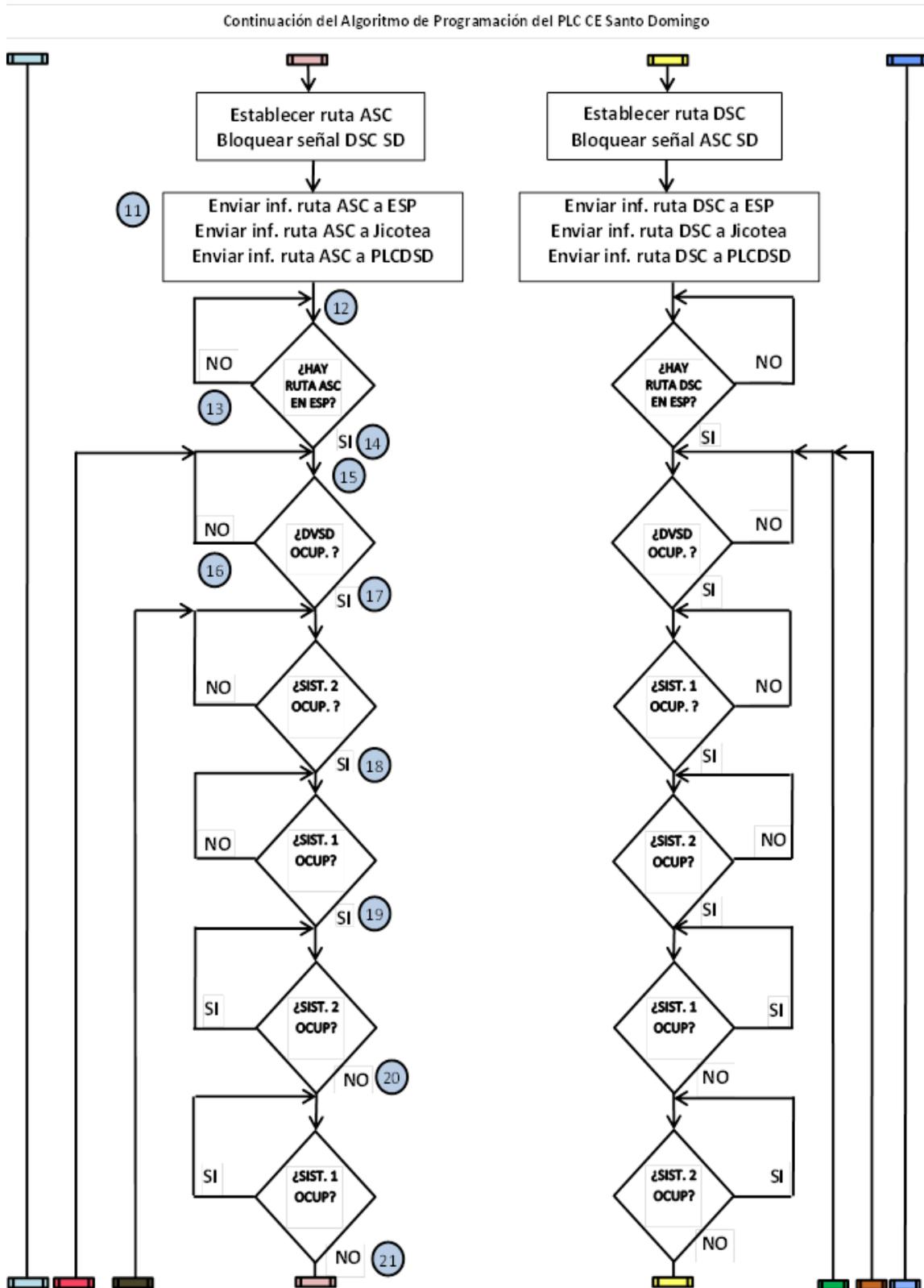
9. A continuación se pregunta si el circuito DVSD continúa ocupado (23) y si es así se regresa a (17) para iniciar el ciclo de conteo de otro eje.
10. Cuando el circuito DVSD se desocupe (24) significa que el tren terminó de pasar y entonces se compara el dato de los ejes EASCSD con los ejes EASCSD1 (ejes ascendente de Santo Domingo contados por el PLC auxiliar PLCD1 (25).
11. Si no son iguales enviar señal de error a Jicotea, borrar dato EASCSD y regresar a (15).
12. Si son iguales (27) significa que el conteo fue correcto se ordena bloquear las señales ascendente y se envía el dato EASCSD a Jicotea (28).
13. A continuación (29) se comienza a preguntar cuándo los ejes contados por Santo Domingo EASCSD son iguales a los ejes que pasen por Jicotea EASCJ (30).
14. Si no son iguales se regresa a (29), si son iguales (31) significa que el tren expedido por Santo Domingo en sentido ascendente pasó completo por el punto de conteo de Jicotea y se ordena borrar el dato EASCSD desbloquear las señales ascendentes por Santo Domingo (32).
15. Seguidamente se pregunta si no hay ruta descendente por Esperanza, en caso negativo (34) se regresa a (15) para esperar que se ocupe el circuito de vía DVSD lo que significaría que se volvió a expedir otro tren ascendente por el enclavamiento de Santo Domingo.
16. Entonces se comenzaría un nuevo ciclo de conteo de ejes. Si hubiera una solicitud de ruta descendente por Esperanza (35) se regresa al inicio.

Con esto se cierra el ciclo del algoritmo de programación del PLC CE de Santo Domingo para una ruta ascendente de un paquete o grupo de trenes desde Santo Domingo hasta Esperanza.

Capítulo 3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE BLOQUEO PARA EL TRECHO ESPERANZA-SANTO DOMINGO

Para el ciclo de una ruta descendente desde Esperanza a Santo Domingo prácticamente se cumplen los mismos pasos descritos hasta aquí, pero en sentido contrario con la nomenclatura correspondiente, por ello, no se considera necesaria su explicación.





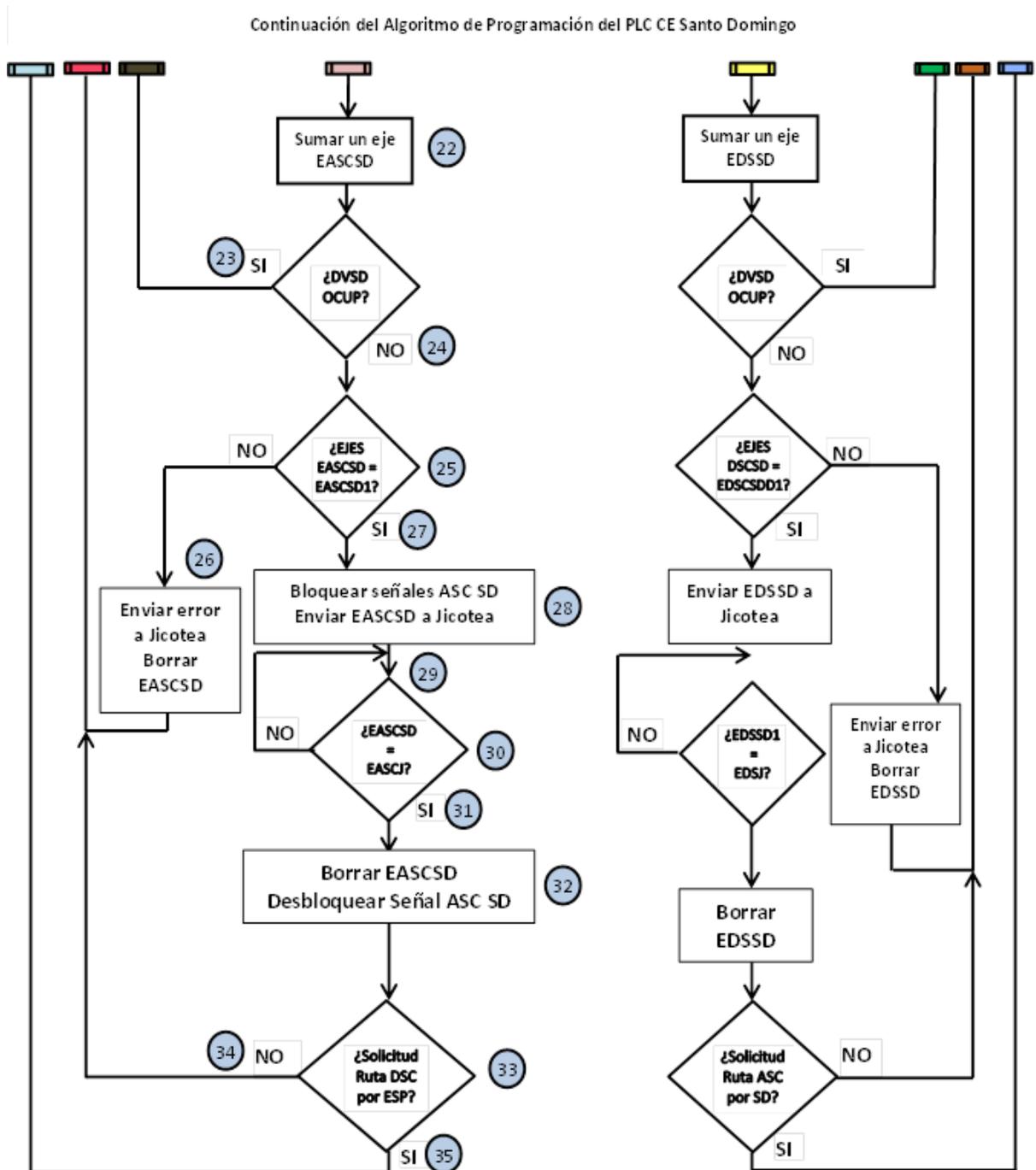


Fig. 3.2 Algoritmo PLC CE Santo Domingo

3.2.1.2 Algoritmo de programación del PLC D1 de Santo Domingo

Al igual que en el algoritmo anterior, dada la similitud del conteo de ejes en sentido ascendente como descendente solo se describe una rama, en este caso, la ascendente.

1. Partiendo del Inicio se pregunta si hay ruta ascendente (1) y en caso negativo (2) se pregunta si hay ruta descendente en caso negativo (3) se regresa al Inicio.
2. Si hay ruta ascendente (4) se pregunta por la ocupación del circuito de vía DVSD y en caso afirmativo (6) se realiza el ciclo completo del conteo de un eje hasta (7) como ya se describió en el algoritmo anterior, incrementándose un eje EASCSD1 (8).
3. Seguidamente se pregunta por la ocupación del circuito de vía DVSD (9) si continúa ocupado se regresa (6) para un nuevo ciclo de conteo de ejes.
4. Cuando se desocupe el circuito de vía DVSD (10) se envía el dato de ejes ASCSD1 al PLC CESD (11), posteriormente se comparan los ejes EASCSD1 con EASCJ (12).
5. Si son iguales (13) significa que el tren pasó completo por el punto de conteo de Jicotea y se ordena borrar el dato de los ejes EASCSD1 (14) regresando al Inicio.
6. En caso de que esta comparación no sea igual (15) se envía señal de error al PLC CESD (16), se da una señal de reset (17) y se regresa al Inicio.

La rama del algoritmo en sentido descendente es prácticamente igual sólo que en sentido contrario, con la nomenclatura diferente y no se considera necesaria su descripción.

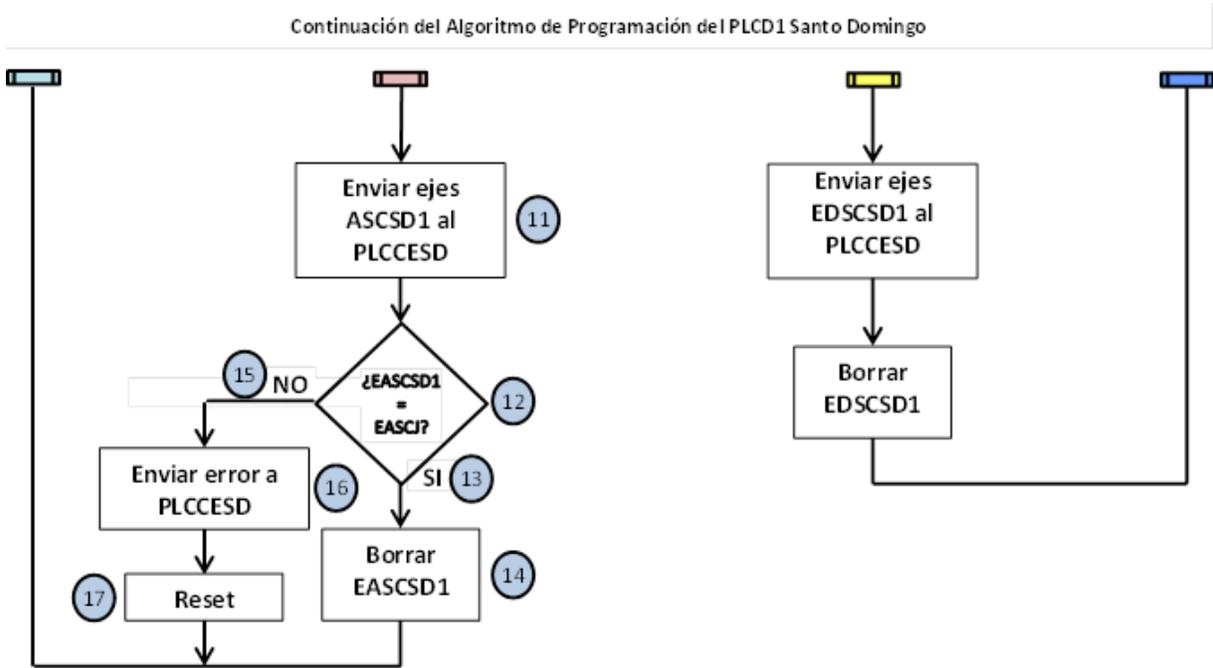


Fig. 3.3 Algoritmo PLC D1 de Santo Domingo

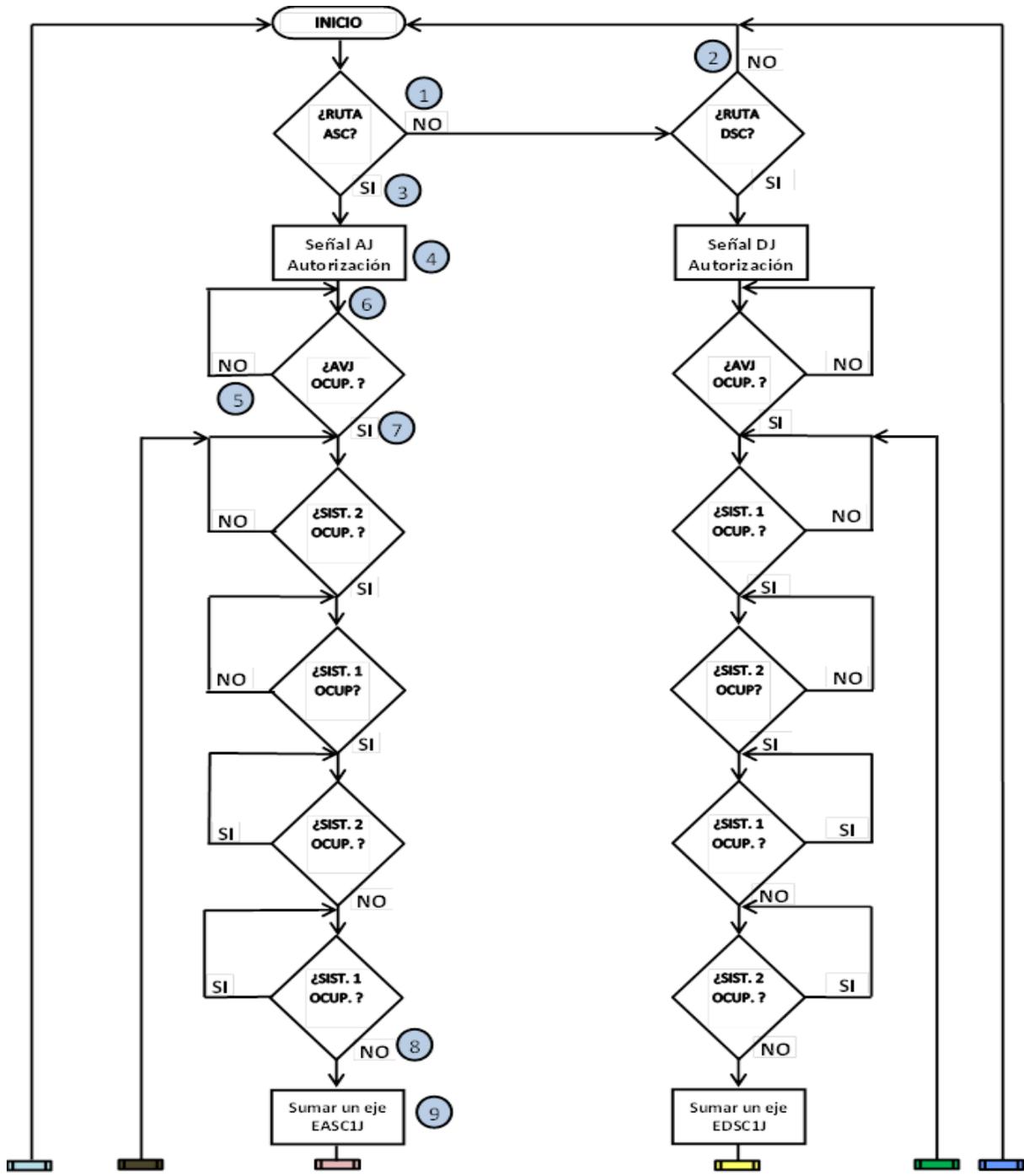
3.2.1.3 Algoritmo de programación del PLC 1J de Jicotea

Este PLC 1J es el principal del punto de conteo de Jicotea, ya que además de realizar el conteo de ejes se encarga del mando de las señales de paso ascendente y descendente de dicho punto.

Como en los casos anteriores solo se describe la rama ascendente de este algoritmo dada su similitud con la descendente.

1. Partiendo del Inicio se encuesta si existe ruta ascendente o descendente y si las respuestas son negativas (1 y 2) se regresa al inicio, si es positiva (3) se ordena abrir la señal ascendente AJ (4) y seguidamente se pregunta por la ocupación del tren por el circuito de vía AVJ.
2. Si es no (5) se regresa a (6) hasta que se ocupe este circuito (7), a partir de lo cual se realiza el ciclo de conteo de un eje como ya fue descrito en los algoritmos anteriores hasta (8) ordenándose incrementar un eje EASC1J (9).
3. Seguidamente se pregunta por la ocupación del circuito de vía AVJ y si es positivo (10) se regresa a (7) para el ciclo de conteo de otro eje.

4. Cuando el circuito de vía AVJ se desocupe (11) se compara el dato de los ejes EASC1J con el dato de los ejes EASC2J.
5. Si son iguales (12) significa que ambos autómatas en este punto de conteo realizaron un conteo correcto.
6. Entonces se ordena enviar el dato de ejes EASC1J a Santo Domingo, Esperanza, al PLC CE de Santo Domingo y se ordena pasar la señal AJ a prohibición.
7. Entonces, se comienza a preguntar (14) si los ejes EASCESP son iguales a los ejes EASC1J de Jicotea, si no son iguales (15) continuar preguntando.
8. Si son iguales (16) significa que el tren llegó completo a la estación de Esperanza y se ordena borrar el dato de ejes EASC1J.
9. Pasar la señal AJ a autorización (17) regresando el sistema al Inicio a la espera de otro tren.



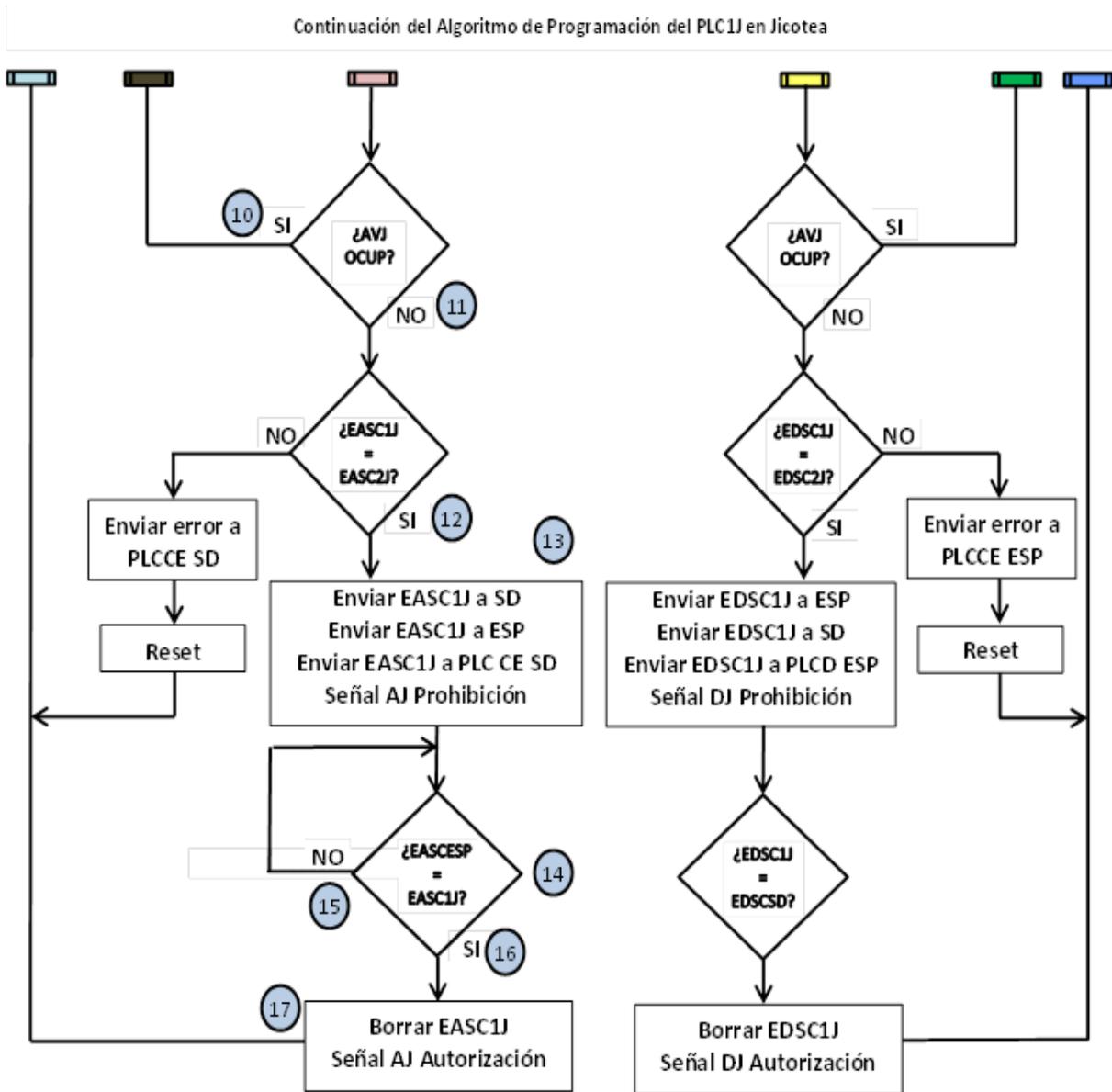


Fig. 3.4 Algoritmo PLC 1J de Jicotea

En el caso del PLC 2J de Jicotea su algoritmo de programación (Figura 3.1, Anexo 3) es muy similar, excepto que, como este es auxiliar no se encarga de gobernar las señales de paso del respectivo punto de conteo, limitándose solo a contar los ejes y compararlos con el otro PLC 1J. Por lo tanto, no se considera necesaria su descripción.

Respecto al algoritmo de programación del PLC CE Esperanza (Figura 3.2, Anexo 3) tampoco se considera necesaria su descripción, dado que es similar al algoritmo de programación del PLC CE de Santo Domingo, el cual ya fue descrito anteriormente en

el epígrafe 3.2.1.1. La diferencia consiste en el cambio de nomenclatura y sentido de circulación del tren (descendente).

Por igual motivo tampoco se considera necesaria la descripción del algoritmo de programación del PLC A1 Esperanza (Figura 3.3, Anexo 3), por ser similar al algoritmo de programación del PLC D1 de Santo Domingo, descrito ya en el epígrafe 3.2.1.2, igualmente diferente en el cambio de nomenclatura y sentido de circulación.

3.3 Valoración Económica

Técnicamente, valorando el sistema de bloqueo automático propuesto, puede considerarse que cumple con los requisitos de seguridad requeridos para el ferrocarril cubano. También cumple con los principios básicos de esta actividad a nivel internacional.

Se utiliza el PLC con una programación propia sustituyendo el módulo contador, incrementando la seguridad del sistema propuesto y resultando de menor costo su implementación según puede observarse en el correspondiente análisis técnico-económico.

En la tabla 3.1 se presenta el análisis técnico económico que compara los precios actuales de las tecnologías Frauscher y Electrans empleadas en sistemas de conteo de ejes para aplicaciones de automática ferroviaria existentes en nuestro país con las que se utilizan en esta investigación.

La implementación de este diseño, en un solo trecho, duplica la capacidad de vía en el mismo. Resulta importante destacar que de generalizarse este sistema propuesto, acortando los trechos entre estaciones, el aumento de la capacidad de vía sería muy considerable y el efecto económico comparativo relacionado con el sistema que existe actualmente de BSA es altamente significativo.

Todo sistema ferroviario que se implemente y contribuya a elevar la seguridad del tráfico de trenes tiene un efecto social importante ya que contribuye directamente a evitar lamentables y costosas pérdidas humanas y materiales.

Tabla 3.1 Análisis Técnico-Económico

COSTOS DE EQUIPAMIENTO								
EQUIPO	UM	FRAUSCHER			DISEÑO			DIF.
		Cant.	Precio	Importe	Cant.	Precio	Importe	Importe
Módulo Contador	U	3	15000,00	45000,00	0	0	0	45000,00
Sensores	U	3	1775,00	5325,00	3	1775,00	5325,00	0
Cables	M	2000	0,93	1860,00	Instalado	0	0	1860,00
PLC	U	0	0	0	6	2200,00	13200,00	13200,00
Ingeniería de diseño	U			4800,00			2400,00	2400,00
TOTAL	U			56985,00			20925,00	36060,00

3.4 Consideraciones finales del capítulo

La arquitectura del sistema de bloqueo automático adoptado está orientada a la seguridad, lográndose que el sistema presente nivel de seguridad SIL4 y cumple con el protocolo de establecimiento de rutas establecido en bloqueos automáticos ferroviarios.

El algoritmo de programación de los PLCs desarrollado cumple con los requisitos exigidos para este sistema, puesto que, en cada uno de los puntos de conteo de ejes existen dos PLCs en arquitectura redundante orientada a la seguridad.

Cada PLC de un punto de conteo realiza el conteo de los ejes que entran o salen, se comparan y se transmite este dato de forma segura mediante el sistema GSM-R hacia los siguientes puntos de conteo para su comparación y el desbloqueo de la sección correspondiente.

Los PLCs principales de cada punto de conteo interactúan con sus respectivos enclavamientos a través de los dispositivos de enlace para la comunicación del PLC con el sistema de funcionamiento del enclavamiento, por lo que cada PLC tiene su algoritmo propio y son diferentes entre sí.

Desde el punto técnico y económico queda demostrada la factibilidad, así como la de su aplicación que se corresponde con las características actuales del ferrocarril cubano.

Se realiza un análisis técnico-económico comparando los precios de la tecnología Frauscher, que se emplea en sistemas de conteo de ejes en aplicaciones existentes en el ferrocarril cubano, con las que se sugieren utilizar en el diseño propuesto.

CONCLUSIONES

El trabajo alcanza los objetivos que se proponen, lográndose dar solución de forma efectiva al problema científico sobre la carencia en Cuba de un sistema de bloqueo automático que permita un uso eficiente y seguro de la vía férrea. De los resultados obtenidos se llega a las conclusiones siguientes:

- ✓ La sistematización de los referentes teórico-metodológicos relacionados con los sistemas de bloqueo automático de la vía férrea, contribuyen a la profundización del conocimiento de los especialistas en automática ferroviaria.
- ✓ En el análisis efectuado de los dos sistemas de bloqueo empleados en la actualidad en el ferrocarril cubano, se evidencia la baja seguridad e ineficiencia de los mismos.
- ✓ En el diseño propuesto se utilizan circuito de vía AC/DC, sensor de rueda FRAUSCHER RSR- 122 y autómatas programables (PLCs) SIEMENS S7-315F, constituyendo la selección más adecuada para implementar en el ferrocarril cubano actual.
- ✓ El sistema de bloqueo automático propuesto para el trecho Esperanza-Santo Domingo se diseña con arquitectura redundante, del modo 2 de 2, orientado a la seguridad cumple con las normativas requeridas, elevando significativamente la eficiencia del ferrocarril.
- ✓ El funcionamiento general del sistema automático que se describe en la propuesta, así como la función que realizan los diferentes dispositivos seleccionados para su implementación, aumentan la capacidad de la vía férrea en el trecho Esperanza-Santo Domingo de modo seguro.
- ✓ Los mecanismos de funcionamiento de los controladores lógicos programables que intervienen en el diseño propuesto se fundamentan en algoritmos de

programación orientados a la seguridad, haciendo más eficiente el tráfico de trenes en el trecho Esperanza - Santo Domingo.

- ✓ La implementación del sistema de bloqueo automático propuesto duplica la capacidad de la vía en el trecho seleccionado, ya que para circular un segundo tren no tiene que esperar la llegada del que le antecede a la estación colindante.
- ✓ Se evalúa el costo económico del equipamiento del diseño propuesto, comparando los precios de este con el precio de la tecnología del sistema Frauscher que se aplica actualmente en el ferrocarril en sistemas de protección de pasos a nivel. El efecto económico comparativo sólo es posible hacerlo conociendo el aumento de la cantidad de pares de trenes previsto al menos en 5 años, dato que en la actualidad no posee el ferrocarril cubano.

RECOMENDACIONES

- ✓ La implementación del sistema propuesto en el trecho Esperanza-Santo Domingo con el propósito de elevar la seguridad y la eficiencia de este.
- ✓ Proponer a la Unión de Ferrocarriles de Cuba el análisis y estudio de este diseño para generalizar su implementación en los trechos entre estaciones en la Vía Central Habana-Santiago.

BIBLIOGRAFÍA

- A ADIF, N. s. (2013). *Catálogo Normas de señalización ADIF*. ADIF, Ed., ed. Madrid. España, . www.adifaltavelocidad.es/ca
- Altehage, K. (2014). *Axle Counter System ACS2000 – Efficient and Universal Clear Track Signalling System.1-3.* .
- Caballero, J. M. (2011). *Diseño de las instalaciones de señalización, control de tráfico centralizado, protección y seguridad y sistemas auxiliares de detección del tren para un tramo de línea de alta velocidad. Proyecto, Pontífica Madrid.*
- Castro, O. M. (2018). *Diseño de protección Automática de Pasos a Nivel.* (Tesis presentada en opción al título de Master en Automática y Sistemas Informáticos), Universidad Central "Martha Abreu" Las Villas Santa Clara, Santa Clara .
- Convertronic. (2014). *Señalización ferroviaria, el control de tráfico centralizado.* from www.convertronic.net/
- Eaton. (2014). *Controladores lógicos programables* Retrieved from www.eaton.mx/EN/ecm/idcplg?IdcService=GET_FILE...1
- Edublog. (2014). *Cotroladores lógicos programables* Retrieved from edublogplc.blogspot.com/p/libros-plc-digitales.html
- ELECTRANS. (2016). *Ficha técnica detector electrónico de ejes def-87. Unión de Ferrocarriles de Cuba, 2016.*
- ERTMS, A. b. (2014). *Sistema Europeo de Gestión de Tráfico,* from <https://es.scribd.com/doc/31211643>
- F. Montes. (2015). *Los sistemas de señalización en el ferrocarril: su evolución.* p. 30, 2015.
- Frauscher., I. J. (2006). From track switch to inductive wheel sensor using a variety of technologies. <http://www.fra.dot.gov/downloads/Research/rr0905.pdf>

Gil, D. B. R. (2006). Seminario de sistemas de seguridad ferroviaria de señalización y comunicaciones Paper presented at the Seminario de sistemas de seguridad ferroviaria de señalización y comunicaciones.

<http://www.efe.cl/la-vía/sistema.html>

Gómez, A. P. (2015). Señalización de Seguridad en la Circulación Ferrovaria mediante la electrónica (Enclavamientos y bloqueos electrónicos).

GRS. (2016). How Motion Detector and Predictor Railroad Crossing Detection Works,.

Huerta, J. A. P. (2017). Actuaciones para el aumento de capacidad en líneas ferroviarias. Eyrolles, I.

INOR. (2016). SIL – Safety Classification.

Itinerario 11 de la Unión de Ferrocarriles de Cuba. (2015), p 5-7.

K. R. J. Ždanský, J. H. (2015). Safety related control systems for railway signalling applications with a safety PLC.

Kazakob, A. A. (1980). Centralización de Agujas y Señales. Moscú, URSS: Editorial MIR.

Lambert, A. (2009). European Rail Traffic Management System (ERTMS). Signalling Solutions Limited.

León, F. M. y. P. d. (2007). Los sistemas de señalización en el ferrocarril: su evolución. Anales de mecánica y electricidad, 10.

Libre, V. (2014). Fundación de los ferrocarriles españoles. Revista del ferrocarril español. Dossier ERTMS. .

Ltda., F. S. T. B. (2012). Contadores de ejes es la mejor opción.,. 60.

Martínez, H. V. (2018). Control de la integridad del tren mediante conteo de ejes. (Tesis presentada en opción al título de Master en Automática y sistemas informáticos), Universidad Central "Martha Abreu" Las Villas Santa Clara, Santa Clara.

- Medina, A. A. H. (2018). *Supervisión de los Enclavamientos Eléctricos de la División Centro*. (Tesis presentada en opción al título de Master en Automática y sistemas informáticos), Universidad Central "Martha Abreu" Las Villas Santa Clara, Santa Clara.
- Mijailofni, B. A. (1980). *Bloqueo automático entre estaciones*. Moscú MIR.
- San-Pablo. (2017). *El origen y la evolución del ferrocarril* (pp. Parking San Pablo Santa Justa. Retrieved 21/09/2018,).
<http://parkingsanpablosantajusta.com/2017/04/03/origen-la-evolucion-del-ferrocarril>
- Sánchez, G. (2013). *Seminario sobre Señalización, Telecomunicaciones y Sistemas de Regulación y Control Ferroviario*. Telvent Tráfico y Transporte. Retrieved from www.telvent.com
- Scalise, J. (2014). *¿Cómo los Circuitos de Vía Detectan y Protegen a los Trenes?*, 8. jodiscalise@railwaysignalling.eu
- Segura, E. (2013). *Sistemas de Seguridad Enclavamiento Electrónico*, p 23. <https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/>
- Sharkey, J. T. (2014). *Use of New Technology for Highway-Rail Intersections*, p 54.
- SIEMENS. (2015). SIMATIC S7-300. <https://support.industry.siemens.com/>
- Soroko, V. I. y. B. A. R. (1976). *Equipos de automática y telemecánica ferroviaria*. Editorial Transporte, Moscú. <https://mundo.sputniknews.com>
- Unicen. (2013). *Que es un PLC?* from www.fio.unicen.edu.ar/usuario/ggacosta/TranspaSSCC/06capitulo%28PLC%2
- Uniovi, I. (2014). *Sistema automatizado, PLC*. from isa.uniovi.es/docencia/idea/teoria/plc.pdf

Wigger, P. (2015a). *Experiencia con asignación de nivel de integridad de seguridad (SIL) en aplicaciones ferroviarias* 16. Available: www.iseb.com

Anexos

Anexo 1

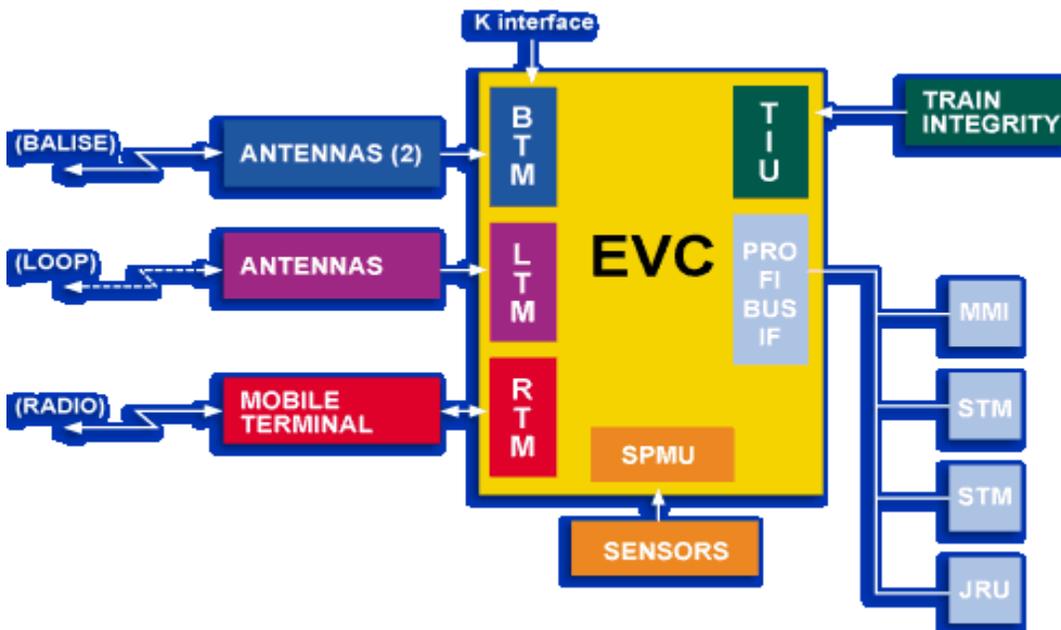


Fig.1.1 Arquitectura de a bordo de la locomotora

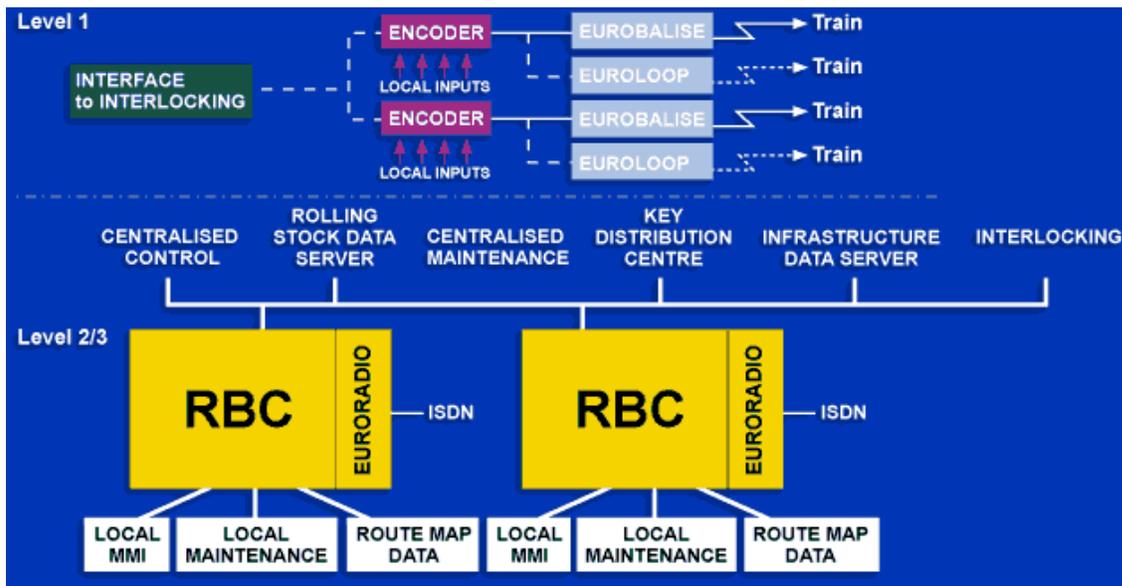


Fig. 1.2 Arquitectura del equipamiento de la vía.

Anexo 2

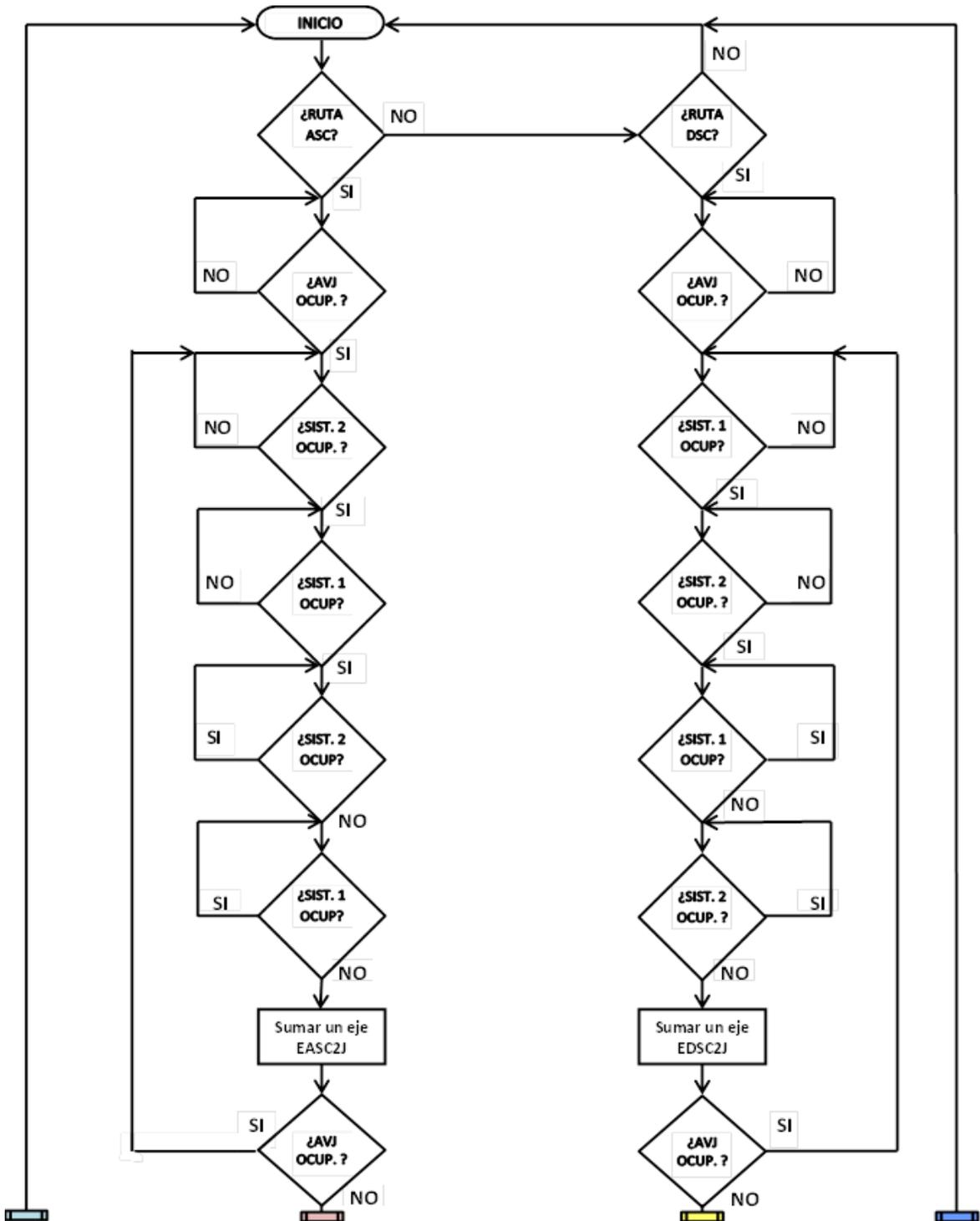
Tabla 2.1 Relación entre la Fracción de Falla Segura (SFF) y la Tolerancia a Falla del Hardware (HFT) para determinar el SIL

SFF	HFT		
	0	1	2
< 60 %	-	SIL 1	SIL 2
60-90 %	SIL 1	SIL 2	SIL 3
90-99 %	SIL 2	SIL 3	SIL 4
> 99 %	SIL 3	SIL 4	SIL 4

Tabla 2.2 Correspondencia de la Probabilidad de falla a pedido (PFD) con el SIL

PFD	SIL
$\geq 10^{-2} \dots < 10^{-1}$	SIL 1
$\geq 10^{-3} \dots < 10^{-2}$	SIL 2
$\geq 10^{-4} \dots < 10^{-3}$	SIL 3
$\geq 10^{-6} \dots < 10^{-4}$	SIL 4

Anexo 3



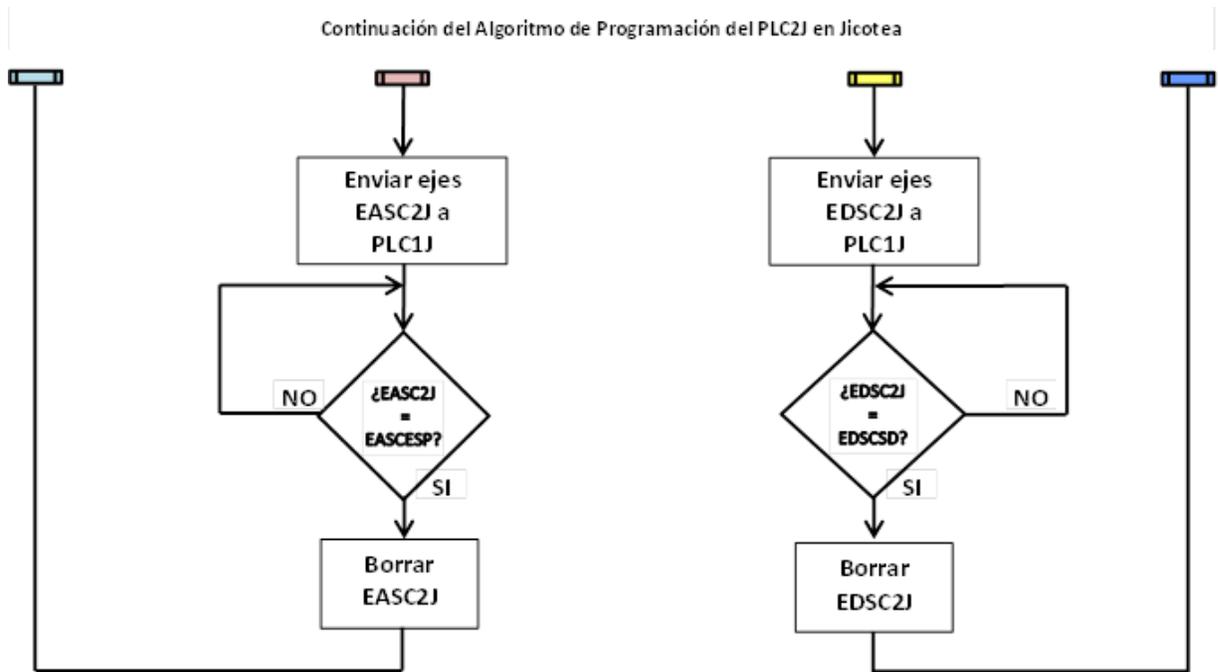
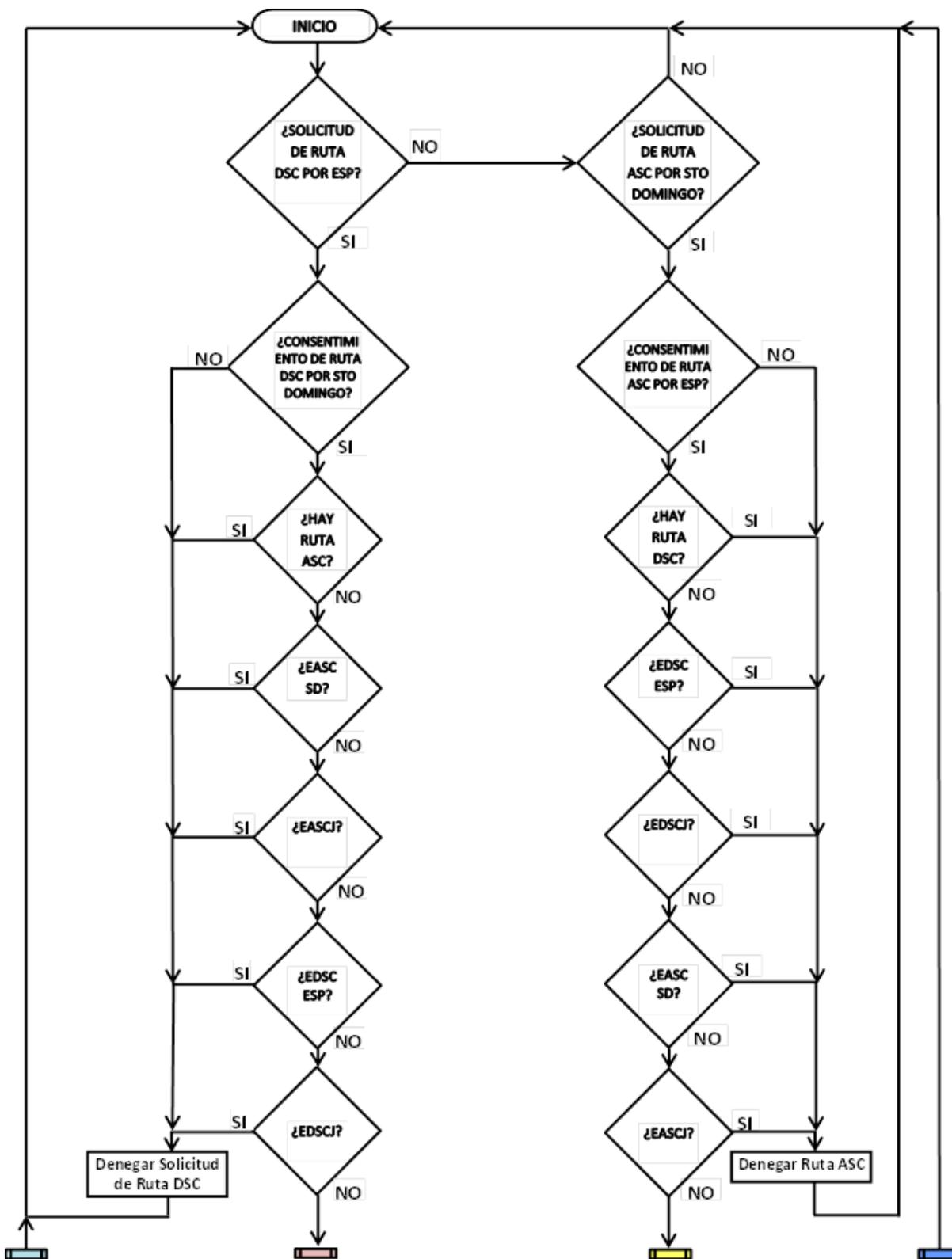
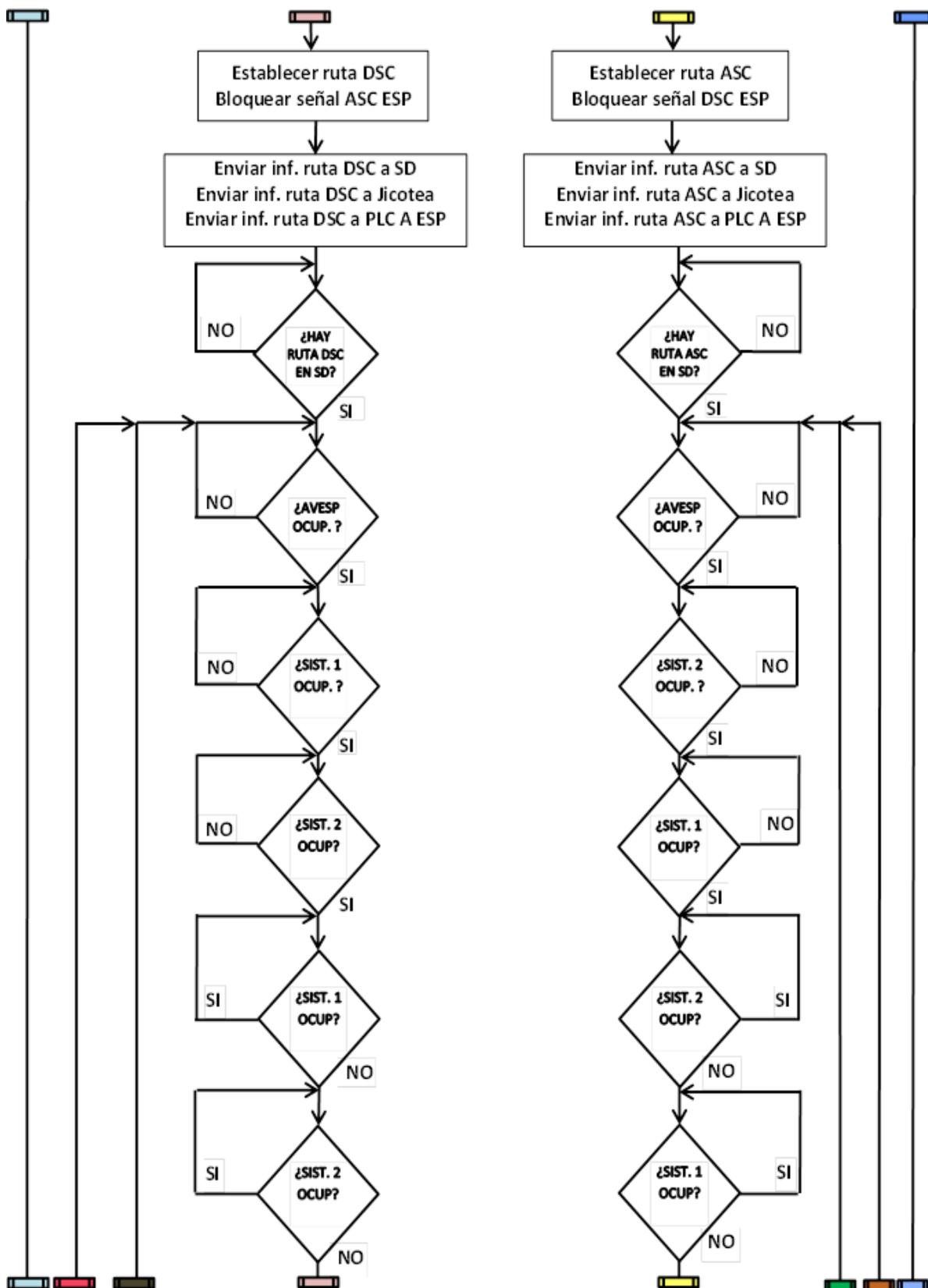


Fig 3.1 Algoritmo PLC 2J de Jicotea



Continuación del Algoritmo de Programación del PLC CE Esperanza



Continuación del Algoritmo de Programación del PLC CE Esperanza

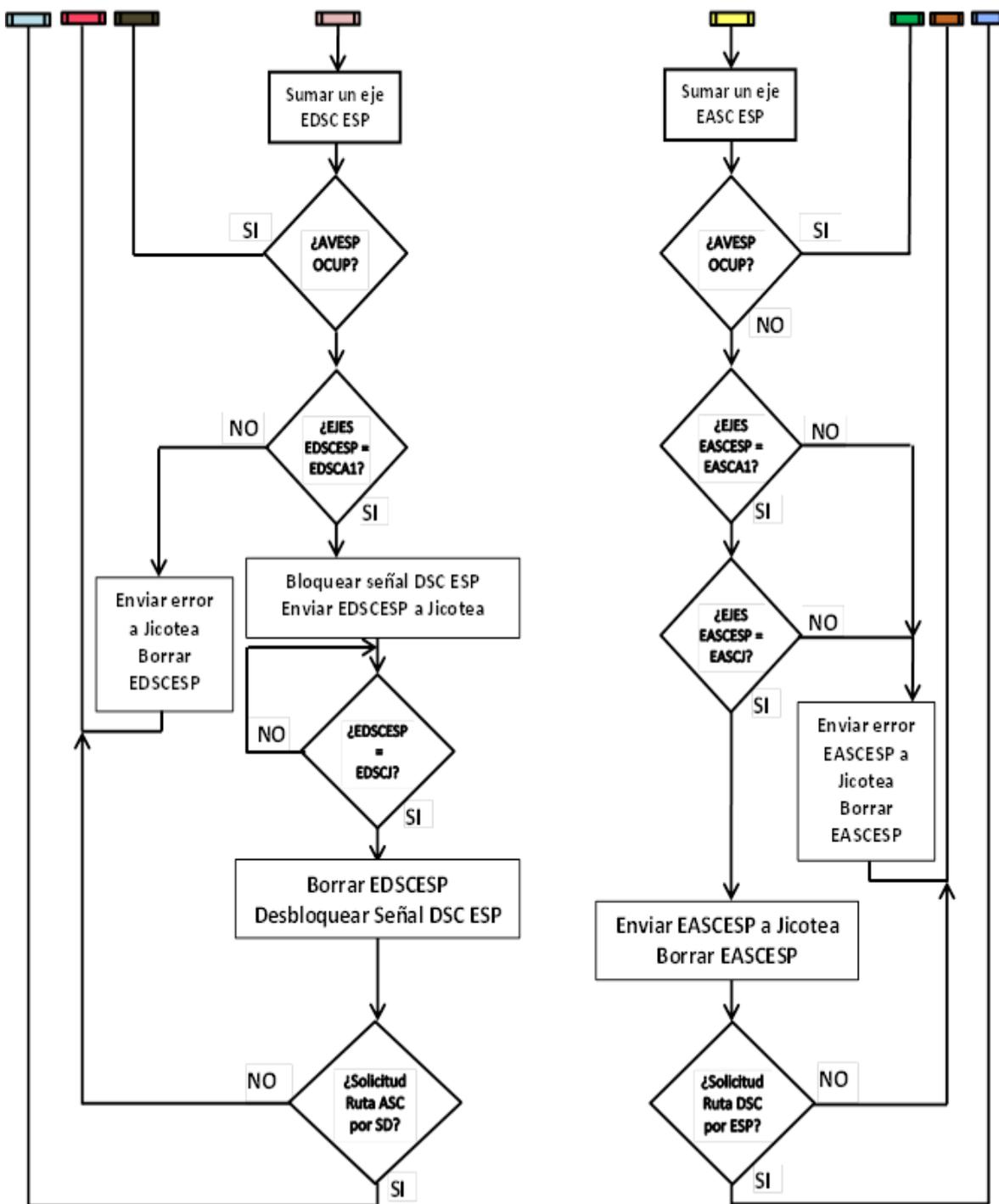
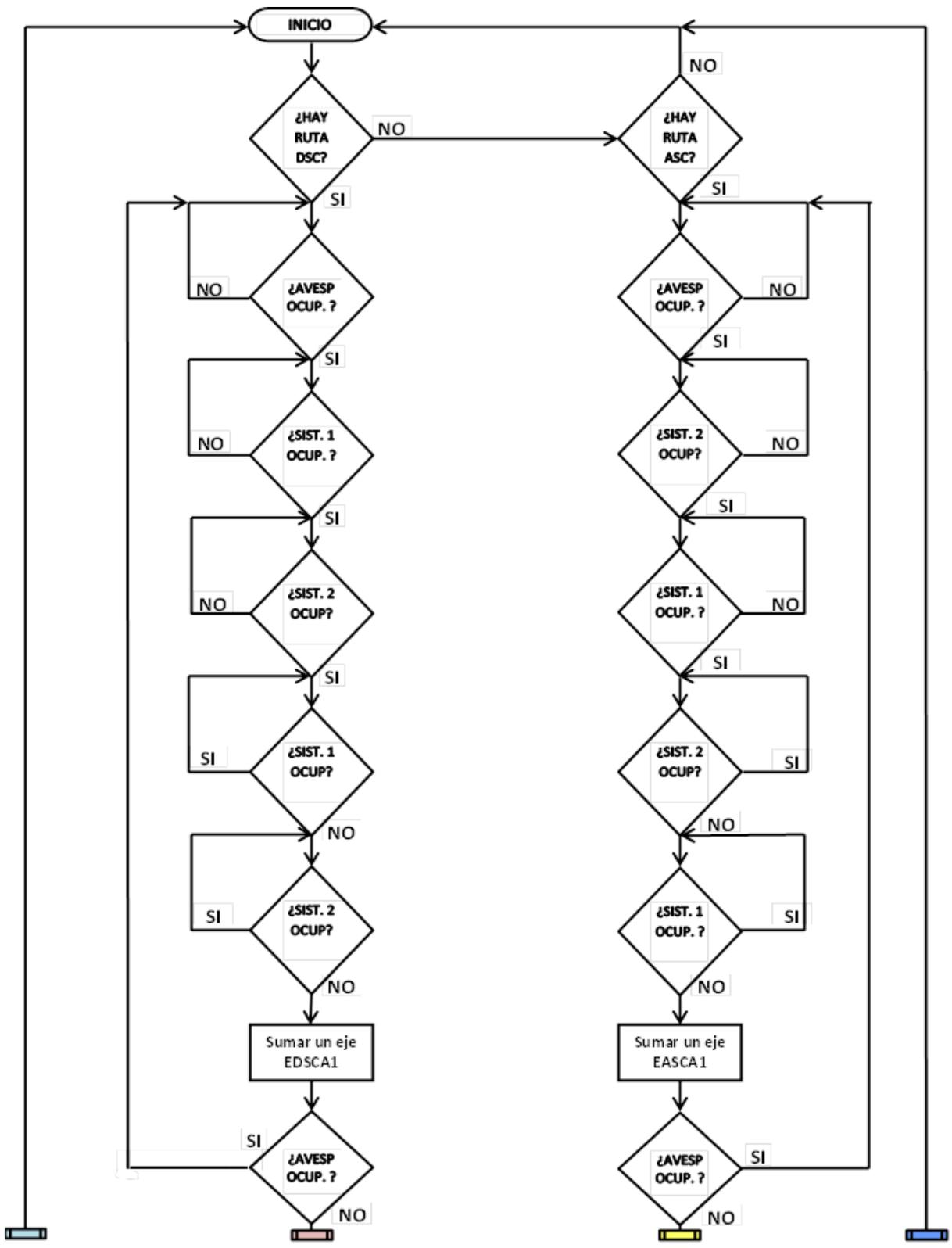


Fig 3.2 Algoritmo PLC CE Esperanza



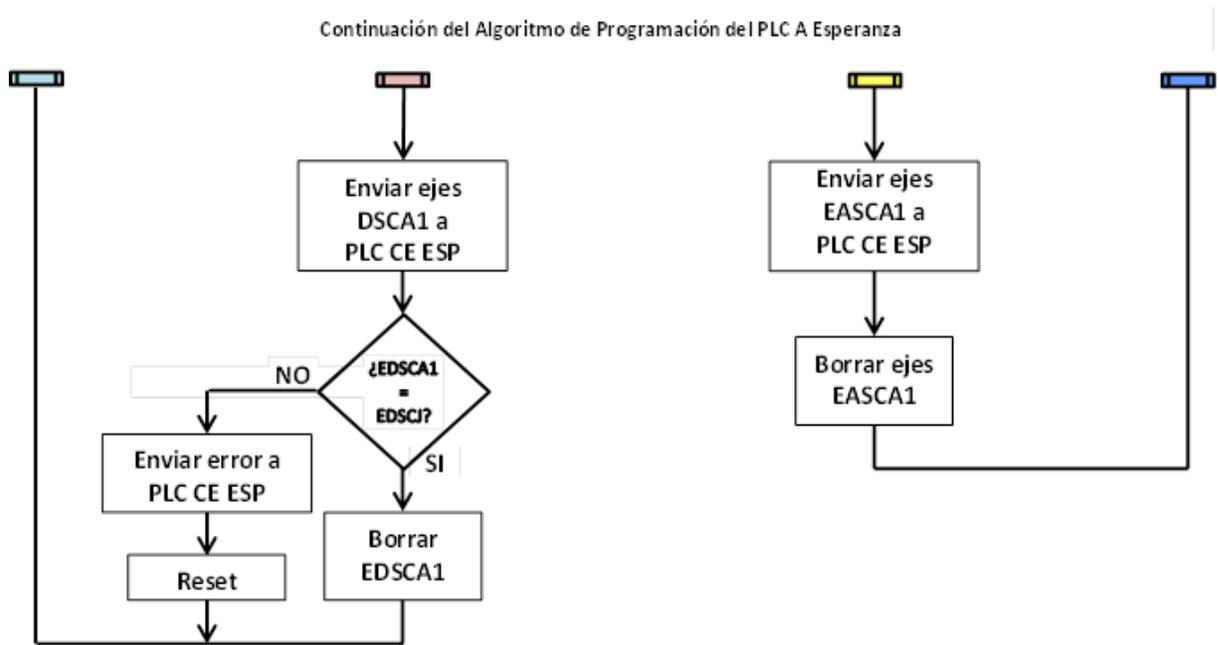


Fig 3.3 Algoritmo PLC A1 Esperanza