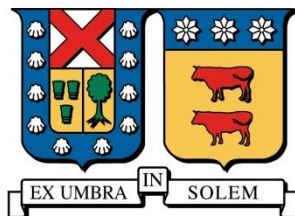


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**SANTIAGO-CHILE**



**DISEÑO Y EVALUACIÓN ECÓNOMICA DE PLAN  
DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA  
CONFIABILIDAD PARA SISTEMA DE PUERTAS  
DE TREN NS93**

**CRISTIÁN ANDRÉS BERNAL NÚÑEZ**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE**

**INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL**

**PROFESOR GUÍA: DR-ING. JAIME NÚÑEZ S.**

**PROFESOR CORREFERENTE: ING. LUIS GUZMÁN B.**

**JUNIO-2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a todo el personal de mantenimiento trenes de Metro S.A quienes me apoyaron para la realización y culminación de esta memoria, entregándome conocimiento técnico e información relevante para el logro de los objetivos planteados. Mis agradecimientos también al área de operaciones, a la cual pertenezco, quienes me proporcionaron el tiempo y los contactos necesarios para canalizar mis dudas y desarrollar una tarea investigativa fidedigna, la cual se ve plasmada en la corazón de este trabajo.

## **DEDICATORIA**

Dedico esta memoria de título a mi Esposa Bárbara y a mi hijo Bruno. Sin duda ellos fueron mi motivación para aceptar y completar este gran desafío, que significo esfuerzo y dedicación no tan sólo míos, sino más bien, de toda nuestra familia. Son ellos quienes me reciben después de largas jornadas de trabajo y ausencia tras el computador con una sonrisa cómplice y amiga, acompañada de esa gran pregunta...¿cómo vamos?

## **RESUMEN**

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) es un procedimiento técnico que permite mejorar un plan de mantenimiento ajustándolo a las condiciones operacionales del equipo o sistema en cuestión.

Uno de los sistemas que presenta continuas perturbaciones al servicio de transporte de pasajeros en Metro S.A es el sistema de puertas de los trenes. En primera instancia se definen los componentes del sistema de puerta del tren NS93, objetos de este estudio, luego se realiza un análisis lógico funcional del sistema para definir las funciones de cada componente.

De acuerdo a criterios definidos por el equipo de trabajo, se determinan los componentes críticos que serán sometidos al análisis AMFE.

De este análisis se obtienen, de acuerdo a lo señalado en la Norma SAE JA1012, las funciones de servicio, las fallas funcionales y los modos de fallas de los siguientes componentes: platina y motor de puerta. Los modos de falla se evalúan mediante análisis de criticidad en base a criterios establecidos en la Norma UNE ENE 50126.

Los modos de falla de mayor criticidad se analizan utilizando la lógica RCM, conforme lo indican los algoritmos que se encuentran en la Norma SAE JA 1012. Por ejemplo, para el modo de falla “Trinquete fracturado por fatiga de material” se recomienda un rediseño del componente.

En general, como acciones de mitigación para los modos de falla se propone implementar tareas basadas en condición. Estas permitirán a futuro establecer un plan de mantenimiento predictivo, para el sistema de puerta.

Finalmente, se realiza una estimación y evaluación del costo de las acciones de mitigación para las tareas basadas en condición.

# ABSTRACT

The reliability centered maintenance (RCM) is a technical procedure that allows the improvement of a maintenance plan by adjusting it to operational conditions of the concerned equipment or system.

One system that has continuous disturbance to passenger service in Metro S.A. is the train doors system. First, the components of NS93 train door system are defined, object of this study, then a logical functional system analysis is performed, to define the functions of each component.

According to criteria defined by the working team, the critical components identified will be subjected to AMFE analysis.

From this analysis and following to what is stated in the SAE JA1012 standard, we will obtain the service functions, the functional failures and the mode failures of the following components: door control unit and door motor. The mode failures are evaluated by analysis of criticality based on the criteria stated in the UNE JAN 50126 standard.

The mode failures with better criticality results will be analyse following the RCM logic, as indicated by the algorithms found in the SAE JA 1012 standard. For example, for the failure mode "Ratchet fractured due to material fatigue" a redesign of the component is recommended.

In general, as mitigation actions against mode failures, it is proposed the implementation of tasks based condition. These ones will allow to set a predictive maintenance plan, for the door system.

Finally, an estimation and cost evaluation of the mitigation actions, for tasks based on condition, will be performed.

# GLOSARIO

CVS: Sistema convertidor de voltaje

KSA: Freno de emergencia pasajeros

FCV: Dispositivo de control liberación/enclavamiento puerta

RCF: Relé de comando de cierre

RCO: Relé comando de apertura

RF: Relé de establecimiento del cierre

RO: Relé de establecimiento de la apertura

FCF: Dispositivo de control de cierre de las hojas de la puerta

FCF.PF: Contacto de cierre del dispositivo de control de cierre de las hojas de la puerta

FCF.LT: Contacto línea de tren del dispositivo de control de cierre de las hojas de la puerta

FCF.PNF: Contacto de apertura del dispositivo de control de cierre de las hojas de la puerta

RCM: Mantenimiento centrado en la confiabilidad

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS .....	i
DEDICATORIA .....	ii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT .....	v
GLOSARIO .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	xv
OBJETIVOS .....	xvi
PLAN DE TRABAJO.....	xvii
1. Marco Teórico.....	20
1.1. Evolución del mantenimiento.....	20
1.2. Mantenimiento Centrado en la confiabilidad. Metodología RCM.....	22
1.2.1. Las siete preguntas acerca del equipo o sistema para realizar un proceso RCM.....	22
1.2.2. Lógica de decisión RCM para acciones de mantenimiento.....	25
1.3. Costo beneficio de la implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad.....	31
1.4. Análisis de criticidad de fallas.....	31
1.4. Jerarquización mediante análisis de Pareto .....	32
2. Descripción del sistema de puertas del tren NS 93 .....	34
2.1. Antecedentes generales del sistema de puertas del tren NS 93 .....	34

2.2. Componentes del sistema de puertas .....	35
2.2.1. Suspensión de la puerta.....	36
2.2.2. Riel (corredera) de guiado inferior y superior .....	36
2.2.4. Platina de comando de la puerta .....	38
2.2.5. Freno de emergencia (KSA) .....	39
2.2.6. Conjunto Motor.....	40
2.2.7. Tornillo de conjugación .....	43
2.2.8. Brazos de arrastre hojas de la puerta .....	44
2.2.9. Dispositivo de Control de cierre de hojas de la puerta (FCF) .....	44
3. Análisis lógico funcional del sistema de puertas del tren NS93 .....	46
3.1. Descripción de la apertura de puerta .....	46
3.2. Descripción del cierre de puerta .....	47
3.3. Análisis funcional FAST del sistema de puertas del tren NS 93.....	49
3.3.1. Desarrollo del análisis FAST al sistema de puertas del tren NS93 .....	50
4. Análisis del historial de fallas del sistema de puertas del tren NS 93.....	56
4.1. Análisis de fallas históricas entre los años 2014 y 2015 del sistema de puertas del tren NS93, de Línea 5. ....	56
4.2. Conclusión del análisis de historial de fallas.....	61
5. Determinación de la criticidad de los componentes.....	62
5.1. Determinación de la criticidad de cada componente .....	62
6. Análisis de los modos de falla, efectos y criticidad de los componentes seleccionados.....	65
6.1. Análisis AMFEC de los componentes.....	65
6.1.1. Criterios de ponderación del riesgo para los modos de falla de los componentes. ....	70

6.1.2. Evaluación del riesgo de los modos de fallas seleccionados para cada componente.....	72
7. Aplicación de la lógica de decisión RCM a los modos de falla seleccionados.....	76
8. Propuesta de modificación del plan de mantenimiento.....	78
8.1. Descripción del Plan de mantenimiento preventivo actual que se aplica al sistema de puertas del tren NS93 .....	78
8.2. Acciones de mantenimiento propuestas para los modos de falla seleccionados.....	81
9. Evaluación económica del plan de mantenimiento propuesto y comparación con el plan existente.....	84
CONCLUSIONES .....	87
REFERENCIAS .....	90
ANEXOS .....	92
Anexo A: Algoritmo lógica de decisión RCM de acuerdo a norma JA 1012. ....	92
Anexo B: Plan de mantenimiento de puertas de tren NS93 de acuerdo a manual de mantenimiento del tren NS 93 del fabricante Alstom.....	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PLAN DE TRABAJO PROPUESTO. ....	XVII
FIGURA 2. EXTRACTO DIAGRAMA DE DECISIÓN RCM (FUENTE: NORMA SAE JA1012, p53, 2002).....	30
FIGURA 3. EJEMPLO DE GRÁFICO DE PARETO. (FUENTE: FUNDIBEB, 2015).....	33
FIGURA 4. COCHE DE CONDUCCIÓN S1. (FUENTE: ALSTOM, 2003). ....	34
FIGURA 5. COMPONENTES DE UNA PUERTA. (FUENTE: ALSTOM, 2003).....	35
FIGURA 6. CORREDERA DE BOLAS DE LA SUSPENSIÓN DE LA PUERTA. (FUENTE: ALSTOM, 2003).....	36
FIGURA 7. PARALELISMO DE LAS HOJAS DE UNA PUERTA DEL TREN NS93. (FUENTE: METRO DE SANTIAGO).....	37
FIGURA 8. PLATINA DE PUERTA DEL TREN NS93. (FUENTE: METRO DE SANTIAGO).....	38
FIGURA 9. DISPOSICIÓN DE LAS PLATINAS DE PUERTAS CON RESPECTO A CADA PUERTA. (FUENTE: ALSTOM, 2003).....	39
FIGURA 10. CONJUNTO MOTOR. (FUENTE: METRO DE SANTIAGO). ....	41
FIGURA 11. ACCIÓN DE BLOQUEO DE PUERTA MEDIANTE EL TRINQUETE. (FUENTE: ALSTOM, 2003).....	42
FIGURA 12. DISPOSITIVO ENCODER. (FUENTE: METRO DE SANTIAGO). ....	43
FIGURA 13. TORNILLO DE CONJUGACIÓN Y BRAZO DE ARRASTRE (FUENTE: METRO DE SANTIAGO). ....	44
FIGURA 14. CONTACTOS DEL DISPOSITIVO DE CONTROL DEL CIERRE DE LAS HOJAS DE UNA PUERTA FCF. (FUENTE: METRO DE SANTIAGO). ....	45
FIGURA 15. SECUENCIA DE APERTURA DE PUERTAS.(FUENTE: ALSTOM, 2003).....	47
FIGURA 16. SECUENCIA DE CIERRE DE PUERTAS. (FUENTE: ALSTOM, 2003) .....	48
FIGURA 17. LÓGICA DE ELABORACIÓN DE ANÁLISIS FAST. (FUENTE: TASSINARI, R. 1992) .....	49
FIGURA 18. DIAGRAMA DE RELACIÓN DE LAS FUNCIONES DE SERVICIO DEL SISTEMA DE PUERTAS DEL TREN NS93. ....	50

FIGURA 19. ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN PRINCIPAL FS 1.....	52
FIGURA 20. ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN FS 2.....	53
FIGURA 21. ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN FS 3.....	54
FIGURA 22. ANÁLISIS DE LA FUNCIÓN (FS 4).....	55
FIGURA 23. ANÁLISIS DEL MODO DE FALLA 2.1.1.1 DE ACUERDO A LA LÓGICA RCM..	76
FIGURA 24. PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE LA RUEDA LIBRE.(FUENTE: MANUAL DE MANTENIMIENTO DE TRENES NS93, ALSTOM).....	80
FIGURA 25. PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO DEL SISTEMA DE PUERTAS.(FUENTE: MANUAL DE MANTENIMIENTO DE TREN NS93, ALSTOM) .....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. INFORMACIÓN DE FALLA DE COMPONENTES DEL SISTEMA DE PUERTAS DEL TREN NS93. PERIODO COMPRENDIDO 2014-2015. ....	57
TABLA 2. CUANTIFICACIÓN DE LA FRECUENCIA DE CANTIDAD DE FALLAS DE UN COMPONENTE.....	62
TABLA 3. TABLA DE CONSECUENCIAS OPERATIVAS, COSTOS DE MANO DE OBRA Y TIEMPOS DE INDISPONIBILIDAD EN EL SISTEMA DE PUERTA. ....	63
TABLA 4. CRITICIDAD DE CADA COMPONENTE DEL SISTEMA DE PUERTAS.....	63
TABLA 5. FUNCIONES, FALLAS FUNCIONALES Y MODOS DE FALLA DE LA PLATINA DE PUERTAS.....	66
TABLA 6. FUNCIONES, FALLAS FUNCIONALES Y MODOS DE FALLA DEL CONJUNTO MOTOR DE PUERTA. ....	67
TABLA 7. EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA DE LA PLATINA DE PUERTA.....	68
TABLA 8. EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA DEL MOTOR DE PUERTA. ....	68
TABLA 9. EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA DEL TRINQUETE. ....	69
TABLA 10. EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA DEL ELECTROIMÁN. ....	69
TABLA 11. EFECTOS Y CONSECUENCIAS DE LOS MODOS DE FALLA DEL ENCODER. ....	70
TABLA 12. CUANTIFICACIÓN DE FRECUENCIA DE LOS MODOS DE FALLA. ....	71
TABLA 13. CUANTIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE CONSECUENCIA AL SERVICIO. ....	71
TABLA 14. CUANTIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE CONSECUENCIA A LAS PERSONAS.....	72
TABLA 15. CUANTIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE CONSECUENCIA A LOS TIEMPOS DE INDISPONIBILIDAD.....	72
TABLA 16. EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LOS MODOS DE FALLA DE COMPONENTE DEL SISTEMA DE PUERTAS.....	73

TABLA 17 . CLASIFICACIÓN DE LOS MODOS DE FALLA CRÍTICOS CON RESPECTO A SU NIVEL DE RIESGO.....	75
TABLA 18. TAREAS DE MITIGACIÓN DE LOS MODOS DE FALLA CRÍTICOS DE ACUERDO A LA LÓGICA RCM.....	77
TABLA 19. ACCIONES DE MITIGACIÓN PARA LOS MODOS DE FALLA CRÍTICOS DEL SISTEMA DE PUERTA DEL TREN NS93.....	81
TABLA 20. COSTOS DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE PRIMER NIVEL. ....	85

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1. NÚMERO DE FALLAS POR TIPO DE FALLA.....	58
GRÁFICO 2. TIEMPO ACUMULADO DE CADA TIPO DE FALLA. ....	59
GRÁFICO 3. NÚMERO DE FALLAS POR TIPO DE COMPONENTES.....	60
GRÁFICO 4. TIEMPO DE NO DISPONIBILIDAD POR TIPO DE COMPONENTE QUE FALLA. ...	61
GRÁFICO 5. JERARQUIZACIÓN DE LOS COMPONENTES CRÍTICOS DEL SISTEMA DE PUERTAS DEL TREN NS93 .....	64
GRÁFICO 6. VALOR DE RIESGO POR CADA COMO DE FALLA DEL SISTEMA DE PUERTA DEL TREN NS93. ....	74

# INTRODUCCIÓN

Este proyecto trata del diseño y evaluación económica de un plan de mantenimiento, para componentes críticos, del sistema de puertas del tren NS93 mediante la herramienta RCM (mantenimiento basado en la confiabilidad). El Mantenimiento Basado en la Confiabilidad (RCM) es un “proceso lógico y técnico para determinar los requerimientos apropiados de las tareas de mantenimiento con el fin de lograr la confiabilidad de diseño del sistema bajo condiciones de trabajo, seguridad operacional y ambiental específicas. En el desarrollo de esta metodología se utiliza como guía la Norma SAE JA1012.

Durante la explotación de trenes (circulación normal de trenes, con pasajeros) y especialmente en las horas de alta afluencia de pasajeros, comúnmente llamadas horas punta, uno de los principales problemas de perturbación a la explotación y que ataca directamente a la calidad del servicio de transporte, son las averías de puertas. La “avería de puertas” obedece principalmente al no cierre o no apertura de la o las puertas del tren una vez detenido en el andén. El tratamiento de la avería de puertas comprende dos acciones, las cuales se describen a continuación:

Acción del tipo operativa: comprende reiniciar el equipo electrónico que permite generar la orden de apertura y cierre de la puerta del coche del tren, mediante un micro interruptor, conmutador o disyuntor.

Acción del tipo correctiva: comprende la intervención del sistema de puertas por personal de mantenimiento (material rodante) en talleres o foso de visitas.

La acción del tipo correctiva, que puede ser mejorada incrementando los niveles de gestión del mantenimiento, será la que se abordara en este trabajo.

# OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es diseñar y evaluar económicamente un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad (RCM), para componentes del sistema de puertas del tren NS93, mediante el uso de la herramienta RCM, para luego establecer divergencias y convergencias con el plan de mantenimiento preventivo que se aplica actualmente.

Para el logro de este propósito se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar el análisis Lógico Funcional del sistema de puertas del tren NS93 y los estados especificados para cada función.
- Analizar el historial de fallas del sistema puertas del tren NS93 para determinar tipo de falla, frecuencia y efectos de la falla.
- Determinar la criticidad de los componentes del sistema de puertas del tren NS93, según los criterios definidos por la empresa, para conocer el o los componentes de mayor criticidad.
- Realizar Análisis De Modos de Fallas y Efectos (AMFE) a el o los componentes de mayor criticidad.
- Aplicar análisis y Lógica RCM para definir acciones de mantenimiento.
- Proponer el Plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.
- Evaluar económicamente la ejecución del Plan propuesto y realizar comparaciones con el Plan existente.

# PLAN DE TRABAJO

Para el logro del objetivo planteado se ha establecido un plan de trabajo, que considera seis etapas con las actividades necesarias. En la Figura 1 se presenta el plan de trabajo mediante diagramas en bloque y a continuación se describen sus contenidos.

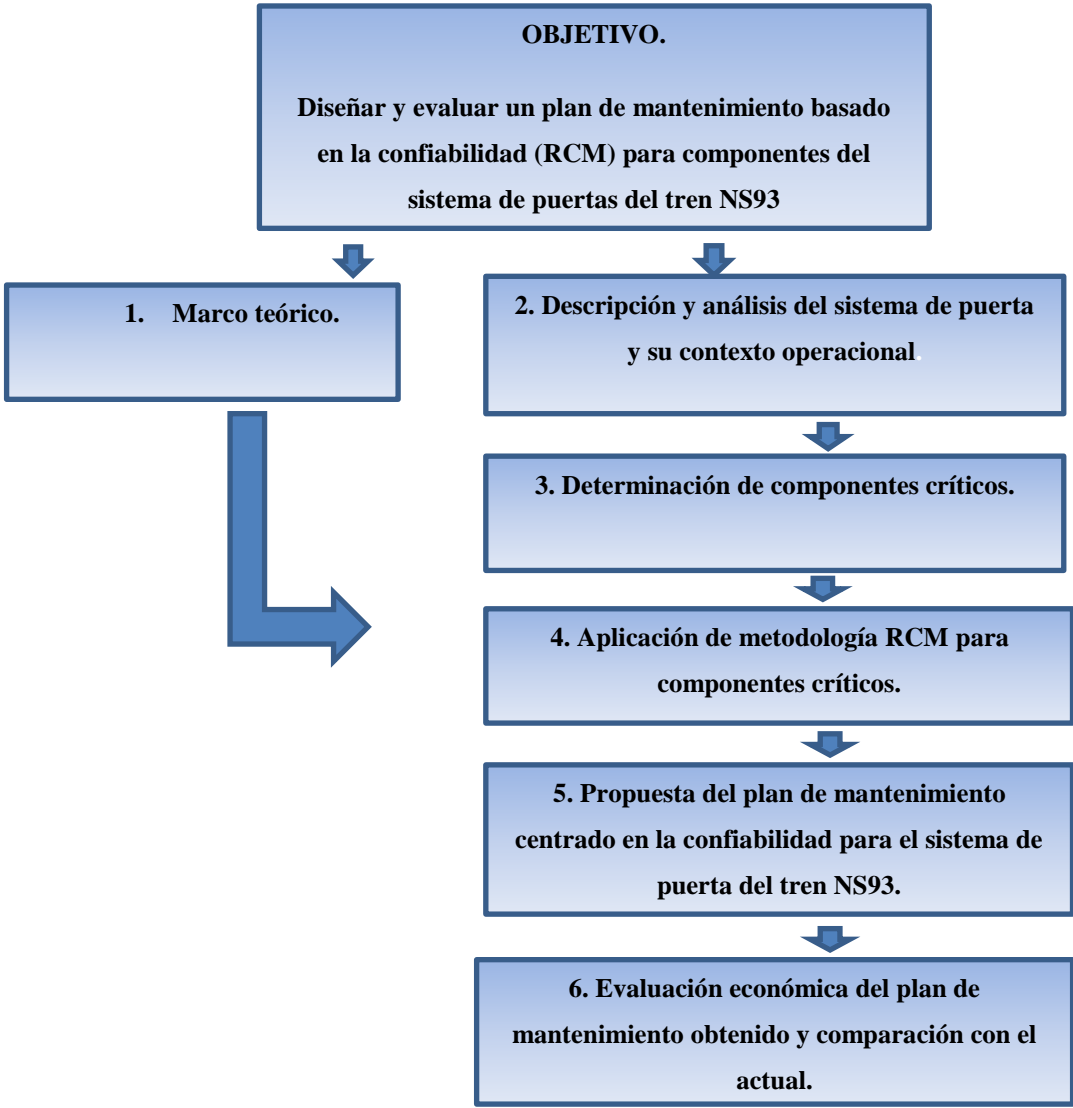


Figura 1. Plan de trabajo propuesto.

A continuación se describen las etapas correspondientes y se justifica su desarrollo:

1. Marco teórico. Se incluyen los conceptos de mantenimiento centrado en la confiabilidad, de acuerdo a la norma SAE JA 1011 y la metodología que se aplica para implementar un mantenimiento utilizando la lógica RCM. La comprensión y entendimiento de esta metodología es la base para desarrollar el objetivo planteado en este trabajo.
2. Descripción y análisis del sistema de puertas y su contexto operacional. En esta etapa se realiza la descripción del sistema en cuestión, se analiza su funcionamiento de manera de entender cuál es su propósito y el comportamiento funcional del sistema en el tiempo. La información obtenida en esta etapa es la base para la aplicación de la metodología RCM.
3. Determinación de los componentes críticos. Determinar los componentes críticos permite dirigir los esfuerzos hacia los elementos que verdaderamente importan para mantener la función del sistema. Son estos componentes los que requieren ser considerados para el análisis lógico del RCM.
4. Aplicación de la metodología RCM para componentes críticos. En esta etapa se analiza cada componente crítico utilizando la lógica RCM de manera de establecer las acciones de mantenimiento adecuadas a cada modo de falla. La aplicación rigurosa de la metodología RCM es la que permite definir el nuevo plan de mantenimiento, estableciendo mejoras con respecto a periodicidades de chequeos, cambios en los procedimientos de intervención, rediseños o simplemente correr a la falla.
5. Propuesta del plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para el sistema de puertas. Es en esta etapa donde se presenta el nuevo plan de mantenimiento obtenido del análisis RCM aplicado al sistema de puerta, incorporando las acciones obtenidas de la aplicación de la metodología.
6. Evaluación económica del plan de mantenimiento y comparación con el actual. Una vez obtenido el nuevo plan de mantenimiento para el sistema de puertas, se evalúa su costo total. De esta forma se puede obtener una medida

cuantificable que permita comparar su implementación con el plan de mantenimiento actualmente aplicado.

# 1. Marco Teórico

A continuación, se expone una breve reseña del mantenimiento y su evolución para finalmente describir el mantenimiento basado en la confiabilidad RCM, entendiendo su lógica de decisión, con respecto a tareas que se deban hacer para mejorar un plan de mantenimiento.

## 1.1. Evolución del mantenimiento

Durante los últimos veinte años el mantenimiento ha cambiado debido al constante aumento en número y en variedad de los activos físicos, al cada vez más complejo diseño de la maquinaria y a las nuevas expectativas relacionadas con el mantenimiento, la seguridad, el medio ambiente y la calidad del producto, manteniendo una alta disponibilidad de planta y un bajo costo.

Antes de la segunda guerra mundial la industria no estaba altamente mecanizada, los equipos eran simples, estaban sobredimensionados y eran altamente confiables, no se le daba mayor importancia a un plan de mantenimiento, más bien la rutina consistía en limpieza, lubricación y reparar una falla una vez acontecida. A este tipo de acciones se les denomina mantenimiento correctivo, el cual se define como: “el mantenimiento realizado después de la identificación de un defecto y destinado a poner un producto en una condición en la que pueda realizar una función requerida”(UNE-ENE50126, 1999).

Después de la guerra, la mano de obra calificada cae abruptamente y la industria comienza a depender más y más de las máquinas, las cuales aumentan en número y se vuelven más complejas, lo que deviene en querer minimizar los tiempos de parada por averías, por lo que se instala firmemente la creencia de que las fallas podían y debían ser prevenidas. Esto da lugar al concepto de mantenimiento preventivo (Moubray 2004), el cual consistía en un principio en intervenciones mayores a intervalos de tiempo prefijados.

Debido a lo anterior, el costo del mantenimiento comenzó a subir abruptamente con respecto a otros costos operacionales, por lo que se debieron desarrollar sistemas de planificación y control del mantenimiento.

Desde mediados de los setenta se han impulsado nuevos cambios en la industria. Los tiempos de parada de máquina se han vuelto cada vez más importantes para los procesos industriales, ya que repercuten directamente en la producción y en la calidad del servicio al cliente. Factores como la seguridad y el cuidado al medio ambiente, se han vuelto tan relevantes, que industrias que no cumplen con estos requisitos deben dejar de operar.

La dependencia a los activos físicos se va incrementando y los costos de mantenerlos y operarlos crece también. Para asegurar entonces el máximo retorno de los activos físicos se les debe tener funcionando la mayor cantidad de tiempo de manera eficiente. Los costos de mantenimiento continúan en aumento y se encuentran ya dentro de los más importantes costos operacionales en la industria.

Muchas de las tareas que se planifican en el mantenimiento preventivo, aunque se hagan correctamente, no tienen ningún efecto o resultado; mientras que otras son contraproducentes y hasta negativas, cabe entonces plantearse la siguiente pregunta, ¿son las tareas planeadas en el mantenimiento preventivo las correctas para mantener el equipo funcionando de forma eficiente?

En consecuencia, se han desarrollado una serie de conceptos y técnicas para afrontar los desafíos que demanda el mantenimiento (Moubrey, 2004), como por ejemplo:

- Herramientas de soporte para la toma de decisiones tales como: estudios de modos de riesgo, análisis de modos de falla y sus efectos, sistemas de expertos, entre otros.
- Mantenimiento basado en el monitoreo de condición.
- Diseño de equipos con mayor énfasis en la confiabilidad y la facilidad para ser mantenidos.

- Desde el punto de vista organizacional, el trabajo en equipo, la participación y flexibilidad, son algunos de los conceptos introducidos.

Uno de los más grandes desafíos para el personal de mantenimiento no es tan sólo aprender nuevos conceptos y técnicas, sino también decidir cuándo vale la pena aplicarlos dentro de la organización. Al tomar una buena decisión es posible contener o reducir los costos asociados al mantenimiento, con el consiguiente mejoramiento de los índices de desempeño de la gestión y la rentabilidad de la empresa.

## **1.2. Mantenimiento Centrado en la confiabilidad. Metodología RCM.**

Para comenzar a hablar del mantenimiento centrado en la confiabilidad se puede plantear la siguiente pregunta: cuando se realiza mantenimiento a un equipo ¿cuál es el estado existente que deseamos mantener? La respuesta a esta interrogante tiene relación directa con la función del equipo o activo físico, es decir, al mantener un activo físico se procura preservar el estado en el cual el activo continúe haciendo aquello que el usuario desea que haga. El dónde y cómo se utilice el activo, es el contexto operacional. Entonces, se puede definir el mantenimiento centrado en la confiabilidad como: “un proceso utilizado para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios quieren que haga en su contexto operacional actual” ( Moubray, 2004).

### **1.2.1. Las siete preguntas acerca del equipo o sistema para realizar un proceso RCM.**

Para realizar todo proceso RCM, se deben formular siete preguntas acerca del equipo o sistema que se desea intervenir, las cuales son (Moubray, 2004):

1. ¿Cuáles son las funciones o los parámetros de funcionamiento asociados al activo en su contexto operacional actual?

Se trata de exponer las acciones que el activo realiza a diario en condiciones específicas, las cuales son fundamentales y satisfacen las necesidades del negocio. La definición de la función se debe realizar mediante un verbo en

infinitivo, un objeto y el estándar de funcionamiento deseado por el usuario. Las funciones pueden ser primarias o secundarias, las primarias son aquellas que dan respuesta al por qué de la adquisición del activo, como por ejemplo producción. Las secundarias son aquellas donde el activo cubre más allá de la función primaria, como la seguridad, el confort, economía, regulaciones ambientales, entre otras.

Por último, entender el contexto operacional en el cual se desenvuelve el activo físico es de gran relevancia, pues determina las condiciones de trabajo, permitiendo definir de mejor manera las funciones primarias y secundarias.

2. ¿De qué manera falla en satisfacer dichas funciones?

Se trata de explicar cómo el activo no logra desempeñarse de acuerdo a los estándares de funcionamiento requeridos por el usuario.

3. ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?

Se debe describir cómo se produce la falla funcional y es denominado “modo de falla”. El modo de falla se puede definir como: “los resultados predichos u observados de una causa de un fallo en un elemento especificado con relación a las condiciones de funcionamiento en el momento del fallo” (UNE-ENE50126, 1999).

La descripción del modo de falla se debe realizar mediante un sustantivo y un verbo, y debe ser lo suficientemente detallada como para seleccionar una estrategia de manejo de la falla para que sea la adecuada.

4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?

Se deben describir los efectos de la falla, aportando información necesaria, como por ejemplo:

- Qué evidencia existe, si la hay, de que la falla ha ocurrido.

- De qué manera o no, la falla representa una amenaza para la seguridad o el medio ambiente.
- De qué manera o no, la falla afecta a la producción o a las operaciones.
- Qué daños físicos, si los hay, han sido causados por la falla.
- Qué debe hacerse para reparar la falla.

5. ¿En qué sentido es importante cada falla?

Se deben describir las consecuencias de la falla. Es decir, de qué manera cada una afecta a la organización de diferente forma, como por ejemplo: en la producción, el servicio al cliente, el medio ambiente, etc. Por lo tanto, si una falla tiene serias consecuencias se hará lo posible para evitarlas y prevenirlas; por otro lado, si las consecuencias son leves quizás solo se decida hacer limpieza y lubricación básica.

El proceso RCM reconoce cuatro categorías de consecuencias como son:

- Consecuencias de fallas ocultas: las fallas ocultas no tienen consecuencias directas, pero exponen a la organización a fallas múltiples con consecuencias serias y hasta catastróficas. La gran mayoría se encuentran asociadas a sistemas de protección.
- Consecuencias ambientales y para la seguridad: las fallas con consecuencias ambientales son aquellas cuyas consecuencias es infringir alguna normativa o reglamento de carácter ambiental, tanto regional, nacional o internacional. Las fallas con consecuencias para la seguridad son aquellas que pueden provocar daño o la muerte a una persona.
- Consecuencias operacionales: son aquellas fallas cuyas consecuencias afectan la producción (calidad, cantidad, servicio al cliente, etc.)
- Consecuencias no operacionales: estas fallas no afectan ni la producción ni la seguridad, sólo traen como consecuencia el costo directo de ser reparadas.

6. ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?

Se deben realizar tareas proactivas de mantenimiento, de forma de prevenir una falla y que ésta se desarrolle y llegue al estado de falla. Están dentro de lo que se conoce como mantenimiento preventivo o predictivo. En el proceso RCM, estas tareas son llamadas como sustitución cíclica, reacondicionamiento cíclico y mantenimiento a condición. Toda tarea proactiva se justifica si económicamente es viable.

7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Se debe tratar directamente con el estado de falla y es la elección cuando no es posible encontrar una tarea proactiva efectiva (acciones a falta de). Estas incluyen, mantenimiento a rotura, rediseño, búsqueda de falla o cambiar el tipo de proceso.

### **1.2.2. Lógica de decisión RCM para acciones de mantenimiento**

Toda lógica de acción, basada en el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), se determina dependiendo de las consecuencias obtenidas a partir de cada modo de falla y de las políticas a considerar para aminorar o evitar dichas consecuencias.

Luego, para realizar un análisis acucioso de las políticas y acciones de mantenimiento a considerar, se utilizan los diagramas de decisión. Estos son diagramas de flujo que permiten tomar diferentes opciones de acuerdo a la respuesta positiva o negativa del analizador (SAE JA1012, 2002).

Dentro de las suposiciones que es necesario considerar, durante la utilización de un diagrama de decisión, es que si la consecuencia de un modo de falla para la seguridad y el medio ambiente, es tratado satisfactoriamente, entonces será de igual forma para las consecuencias económicas, operacionales y no operacionales. En la mayoría de los casos, esta suposición es válida, pero no es verdadera en todos los casos. Como resultado, esto puede llevar a un programa de mantenimiento bueno para el medio

ambiente y la seguridad, pero que contenga un pequeño número de políticas de manejo de fallas que sean más costosas de lo que necesitan ser.

Por ejemplo, las consecuencias operacionales son generalmente costosas, por lo que una tarea basada en condición, como una simple inspección, que reduzca la frecuencia de ocurrencia puede ser costo-eficaz. En el caso de una falla no operacional cuyo costo sea la reparación, la tarea basada en condición no sería costo-eficaz, porque el costo de la inspección más el costo de corregir la falla será mayor al costo de la reparación (Moubray, 2004).

#### **1.2.2.1. Jerarquización de políticas a considerar frente a las consecuencias de los modos de falla.**

La norma SAE JA1012, propone las siguientes políticas de acción para manejar las consecuencias de los modos de fallas (SAE JA1012, 2002):

- Para modos de falla evidentes que puedan afectar la seguridad o el ambiente, las políticas de manejo de fallas se consideran en el siguiente orden: tareas basadas en condición, tareas de desincorporación/restauración programadas, combinación de tareas (usualmente basadas en condición y desincorporación programada), cambio de especificaciones.
- Para modos de falla evidentes que no puedan afectar la seguridad o el ambiente, las políticas de manejo de fallas se consideran en el siguiente orden: tareas basadas en condición, tareas de desincorporación/restauración programadas, mantenimiento no programado, cambio de especificaciones.
- Para modos de falla ocultos en los que la falla múltiple pueda afectar la seguridad o el ambiente, las políticas de manejo de fallas se consideran en el siguiente orden: tareas basadas en condición, tareas de desincorporación/restauración programada, detección de fallas, mantenimiento no programado, cambio de especificaciones.

### **1.2.2.2. Razones para jerarquizar las políticas de manejo de fallas.**

Según la norma SAE JA1012 las razones para jerarquizar las políticas de manejo de los modos de falla son las siguientes (SAEJA1012, 2002):

1. Tareas Basadas en Condición: las tareas basadas en condición se consideran en primer lugar en el proceso de selección de tareas, por las siguientes razones:
  - a. Se pueden desarrollar casi siempre sin mover el activo desde su posición de instalación y normalmente mientras está en operación, así ellas pocas veces interfieren con las operaciones.
  - b. Normalmente son más fáciles de organizar.
  - c. Ellas identifican las condiciones de las fallas potenciales específicas para que las acciones correctivas estén claramente definidas antes de que comience el trabajo. Esto reduce la cantidad de trabajos de reparación a efectuar, y permite que sean realizadas más rápidamente.
  - d. Por la identificación del equipo en el punto de falla potencial, permiten comprender casi toda su vida útil.
  
2. Tareas de Desincorporación Programada y Restauración Programada: si no se puede encontrar una tarea basada en condición conveniente para una falla en particular, la próxima opción es una tarea de desincorporación y restauración programada. Las desventajas de la restauración programada y de la desincorporación programada son las siguientes:
  - a. En casi todos los casos, sólo se pueden hacer cuando los elementos están detenidos o fuera de servicio y (normalmente) se envían al taller, así las tareas casi siempre afectan las operaciones.
  - b. La longevidad límite aplica a todos los elementos, así muchos elementos o componentes que puedan haber sobrevivido a longevidades mayores serán removidos.

c. Las tareas de restauración involucran talleres de reparación, así ellas generan un trabajo mucho mayor que las tareas basadas en condición.

La restauración programada y la desincorporación programada normalmente se consideran juntas porque tienen mucho en común. En la práctica, comúnmente es obvio que el componente involucrado deba manejarse por una desincorporación programada o una restauración programada. Sin embargo, en el caso de algunos modos de falla, ambas categorías de tareas pueden satisfacer el criterio para la factibilidad técnica. En esos casos, se debe seleccionar la más costo-efectiva de las dos.

3. Detección de Fallas: el mantenimiento proactivo exitoso previene las fallas de los elementos, por cuanto la detección de fallas acepta que se invertirá algún tiempo –aunque no demasiado- en un estado de falla. Esto significa que el mantenimiento proactivo es inherentemente más conservador que la detección de fallas, así esta última sólo se debe especificar si no se encuentra una tarea proactiva más efectiva. Por esta razón, los diagramas de decisión deben anteponer siempre las tres categorías de tareas proactivas ante la detección de fallas en el proceso de selección de tareas.
4. Combinación de Tareas: hasta este punto, los diagramas de decisión tratan de encontrar una sola tarea que se relacione apropiadamente con las consecuencias del modo de falla en consideración. Sin embargo, algunas veces ocurre que no se puede encontrar una sola tarea que reduzca el riesgo de falla a un nivel bajo tolerable. En este punto, podría ser apropiado buscar una combinación de tareas, la mayor desventaja de la combinación de tareas es que es inevitablemente más costosa que una sola tarea.
5. Operar hasta Fallar: cuando se evalúa la efectividad de las tareas proactivas concebidas para tratar con los modos de falla que tienen consecuencias económicas, la comparación siempre se hace entre el costo de la tarea y los

costos asociados con el modo de falla no anticipado. En estos casos, sólo se seleccionan las tareas que reducen los costos totales de la falla. Si no se puede encontrar tal tarea, permitir que el modo de falla ocurra sería menos costoso que el mantenimiento proactivo, y de ahora en adelante se debe seleccionar el permitir que ocurra el modo de falla (operar hasta fallar) como una política de manejo de fallas apropiada. Como se explicó anteriormente, operar hasta fallar no es una opción para modos de falla solos o para fallas múltiples que tengan consecuencias en la seguridad o el ambiente.

6. Cambio de Especificaciones: la confiabilidad, el diseño, y el mantenimiento están relacionados intrínsecamente. Esto puede llevar a la tentación de realizar cambios de especificaciones de los equipos existentes, antes de considerar sus requerimientos de mantenimiento. De hecho, todos los diagramas de decisión consideran el mantenimiento antes que los cambios de especificaciones de los equipos por cuatro razones, que se explican a continuación:
  - a. La mayoría de las modificaciones toman de seis meses a tres años desde su concepción hasta su cometido, dependiendo del costo y de la complejidad del nuevo diseño. Por otro lado, la persona de mantenimiento debe mantener el equipo tal como existe hoy, no como lo que debería estar allí o lo que podría estar allí algún tiempo en el futuro. Así que las realidades de hoy deben tratarse con anterioridad a los cambios de diseño de mañana.
  - b. La mayoría de las organizaciones encaran muchos más las oportunidades de mejora de diseño deseables que son física y económicamente factibles. Por enfocarse en las consecuencias de la falla, el RCM es de gran ayuda en el desarrollo de un conjunto racional de prioridades para estos proyectos, especialmente porque separa los que son esenciales de aquellos que son meramente deseables. Claramente, tales prioridades sólo se pueden establecer después que se ha completado la revisión.
  - c. Los cambios de especificaciones son costosos. Estos incluyen el costo de desarrollar la nueva idea, el diseño de una nueva máquina, la incorporación

de un nuevo procedimiento operacional y el costo de llevar la idea a la realidad, la fabricación de una parte nueva, la compra de una nueva máquina, la compilación de un nuevo programa de entrenamiento. Adicionalmente, se incurre en costos indirectos si el equipo o las personas tienen que estar fuera de servicio mientras se está implementando el cambio.

- d. Existe un riesgo de que el cambio fallará en la eliminación o incluso en el alivio del problema que está supuesto a resolver. En algunos casos, puede incluso crear más problemas.

Por todas estas razones, las aproximaciones de los diagramas de decisión, buscan obtener el desempeño deseado de cualquier sistema en su configuración actual antes de intentar cambiar la configuración del sistema. La Figura 2 muestra un extracto del diagrama de decisión para la aplicación de la lógica RCM, para ver el diagrama de decisión completo refiérase al Anexo A.

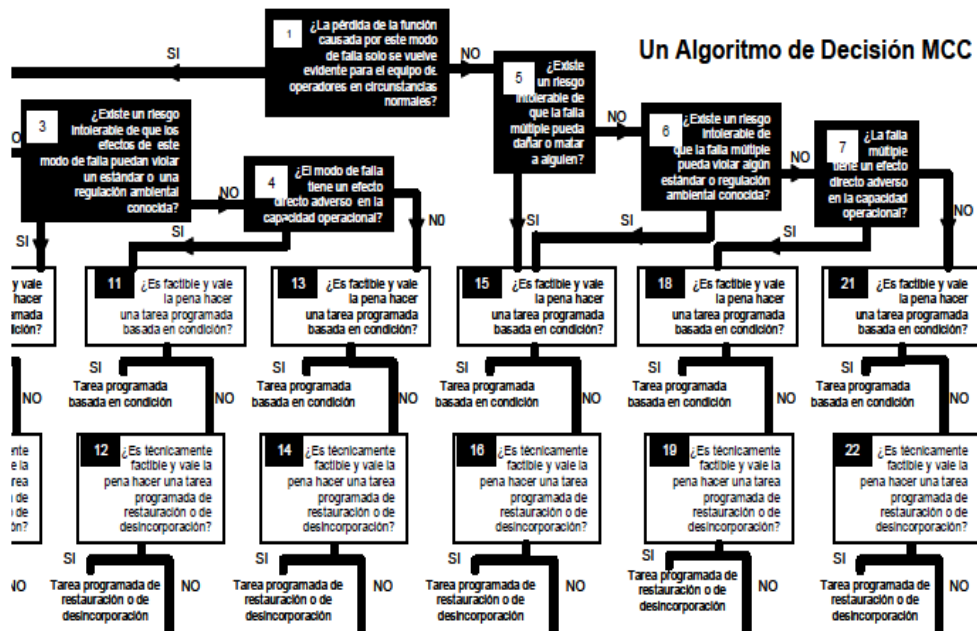


Figura 2. Extracto diagrama de decisión RCM (Fuente: Norma SAE JA1012, p53, 2002).

### **1.3. Costo beneficio de la implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad.**

Cuando se habla de costo beneficio lo que se debe tener en consideración es que no se busca minimizar el costo del mantenimiento, sino maximizar la rentabilidad de la inversión de la empresa a través de mejoras sustanciales del mantenimiento (Ellmann, Sueiro y Asociados, 2015).

Para lograr establecer esas mejoras sustanciales, una de las mejores formas es a través del mantenimiento centrado en la confiabilidad, esto mediante la obtención de los modos de falla, para los cuales se debe establecer una tarea de mantenimiento, que además de mitigar el modo de falla, también resulte económicamente rentable.

De esta forma a medida que se implementan las tareas de mantenimiento para mitigar los modos de falla, se está economizando en una pequeña escala. Al final la sumatoria de estos pequeños ahorros, permiten generar una economía importante como resultado de un mantenimiento más ajustado y apropiado a las condiciones de trabajo actuales de la máquina o equipo y el aumento de la productividad.

### **1.4. Análisis de criticidad de fallas**

El análisis de criticidad es una herramienta que se utiliza para jerarquizar procesos, sistemas o equipos dentro de una planta, de manera que se puedan subdividir los elementos en secciones que puedan ser controlados y fácilmente auditables.

Luis José Amendola (2006) menciona que la criticidad de una falla puede ser cuantificada de acuerdo a la siguiente formula:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia} \quad (1)$$

Donde la *Frecuencia* se refiere al número de veces que el sistema o proceso ha fallado y la *Consecuencia* hace referencia al impacto que tiene la falla en la flexibilidad operacional, los costos de reparación, la seguridad y el medio ambiente.

En función de lo anteriormente expuesto se establecen como criterios fundamentales para realizar un análisis de criticidad de fallas (Amendola, 2006), los siguientes:

- Seguridad
- Ambiente
- Producción
- Costos (operacionales y mantenimiento)
- Tiempo promedio para reparar
- Frecuencia de falla

Para obtener el valor de la criticidad se deben ponderar los distintos criterios seleccionados de frecuencias de falla y sus consecuencias, de acuerdo al análisis en particular. Realizar la sumatoria de las ponderaciones de las consecuencias para obtener un valor de consecuencia total y luego multiplicar dicha ponderación por la frecuencia de falla del equipo o proceso en cuestión (Rivera, 2014).

El valor de criticidad obtenido, le otorga una posición relativa dentro de la totalidad de fallas o modos de falla analizados. Los de más alto valor suponen los más críticos.

#### **1.4. Jerarquización mediante análisis de Pareto**

El Análisis de Pareto es un método de comparación cuantitativa y ordenada de los elementos según su contribución para un determinado efecto. El objetivo de esta comparación es clasificar dichos elementos en dos categorías, como son: Los "Pocos Vitales" (los elementos muy importantes en la contribución) y los "Muchos Triviales" (los elementos poco importantes) (Fundibed, 2015).

La Figura 3 muestra un ejemplo del análisis de Pareto para el número de errores por tipo de error, donde en la ordenada de la derecha se muestra el número de errores

producidos y en la ordenada de la izquierda el porcentaje acumulado del número de errores respecto del total. La curva del porcentaje acumulado separa los pocos vitales de los muchos triviales, según la regla 80/20. Luego se puede decir que los pocos vitales representan es aquel 20% de tipos de errores que generan el 80% del total de errores detectados y los muchos triviales serán el 80% de aquellos tipos de errores restantes que sólo representan el 20% de los errores detectados.

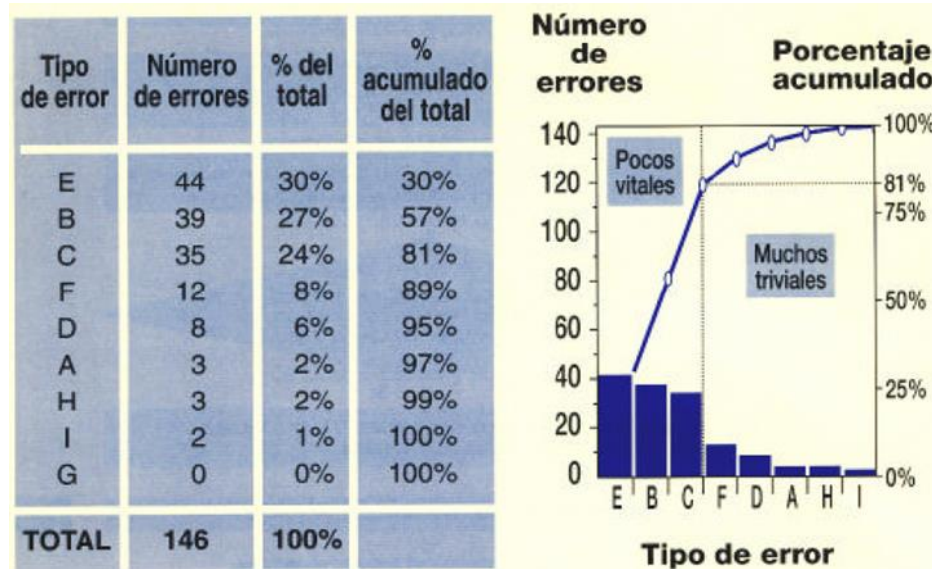


Figura 3. Ejemplo de Gráfico de Pareto. (Fuente: Fundibeb, 2015)

## 2. Descripción del sistema de puertas del tren NS 93

A continuación se dan a conocer los componentes del sistema de puertas del tren NS 93, sujeto de estudio para la aplicación del mantenimiento centrado en la confiabilidad. Se describe la función de cada componente y se agrega una imagen para facilitar su entendimiento.

### 2.1. Antecedentes generales del sistema de puertas del tren NS 93

Cada coche se encuentra equipado con tres puertas de acceso de pasajeros, del lado izquierdo y del lado derecho. Estas son del tipo correderas y deslizantes hacia el exterior, la Figura 4 muestra el coche de conducción denominado S1, donde se pueden apreciar las puertas de acceso a pasajeros. Cada puerta está compuesta por dos hojas conjugadas y accionadas por un motor eléctrico.

El sistema de puertas del tren NS-93, funciona básicamente con baja tensión de 82Vcc, proveniente de los CVS. Los comandos y controles de las puertas son efectuados por dos computadores, dispuestos en cada coche. Estos últimos son los encargados de toda la seguridad relativa a las puertas del tren.

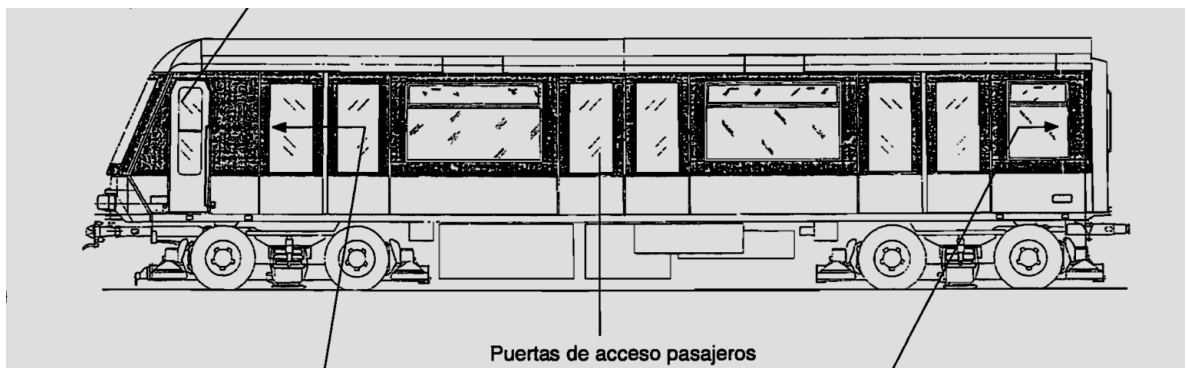


Figura 4. Coche de conducción S1. (Fuente: Alstom, 2003).

## 2.2. Componentes del sistema de puertas

Los componentes del sistema de puertas objeto de estudio en este trabajo, son los que se muestran en la Figura 5.

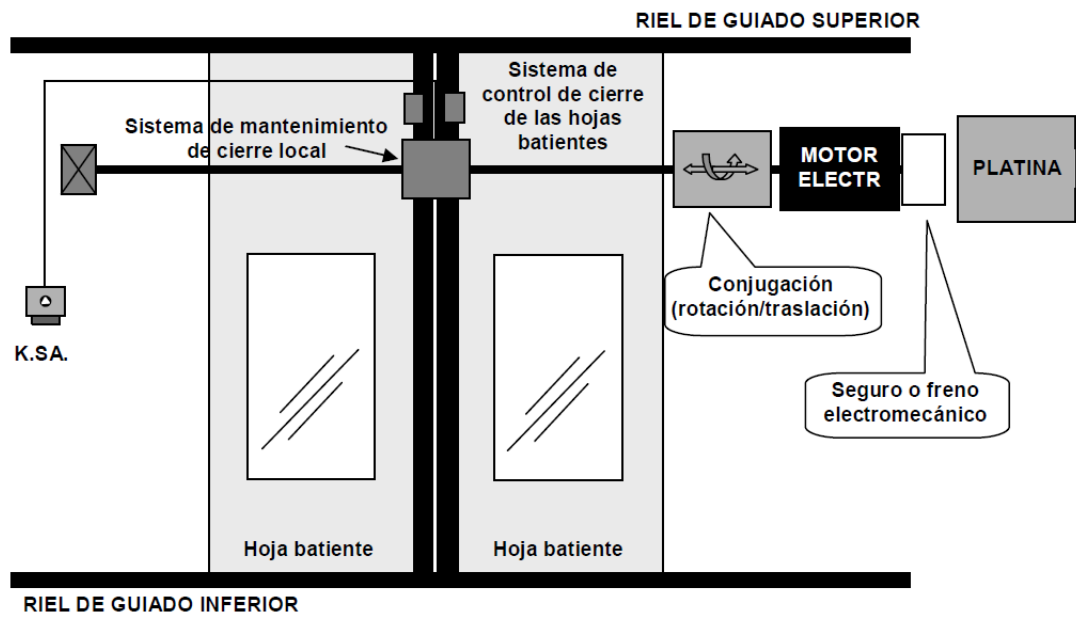


Figura 5. Componentes de una puerta. (Fuente: Alstom, 2003).

### 2.2.1. Suspensión de la puerta

Es una estructura de acero tipo canal que contiene bolas de acero, permitiendo de esta forma sostener las hojas de la puerta y su desplazamiento a través de los rieles de guiado. La Figura 6 muestra la imagen de la Corredera de Bolas que conforma la suspensión.

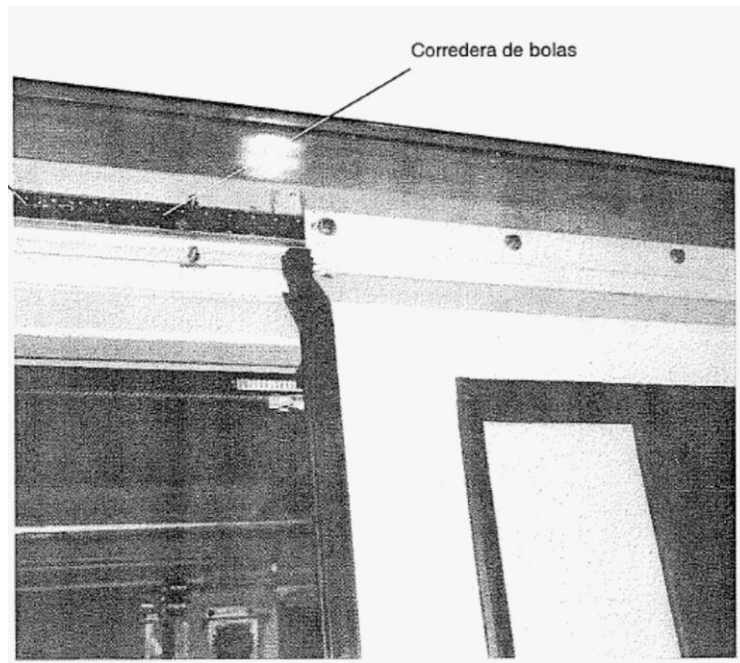


Figura 6. Corredera de bolas de la suspensión de la puerta. (Fuente: Alstom, 2003).

### 2.2.2. Riel (corredera) de guiado inferior y superior

Es una estructura de acero en forma de placa y en su centro lleva un canal en forma de U. Esta permite el desplazamiento de las hojas de la puerta, por medio del canal guía donde se inserta la hoja de la puerta. Están ubicadas en la parte superior de las hojas, bajo de la suspensión y en su parte inferior al nivel del piso del coche.

### 2.2.3. Hojas de una puerta

Es una estructura de acero en forma de rectángulo que lleva una ventana en su centro. Permite el acceso de pasajeros una vez abiertas. Idealmente la apertura y cierre deben ser en V, de acuerdo al paralelismo dispuesto para su funcionamiento. Primero en la parte superior una distancia con respecto al centro de  $X+2\text{mm}$  y luego la inferior de  $X$ . Permite la seguridad de los pasajeros en los desplazamientos una vez cerradas mediante el cierre hermético. La Figura 7 muestra el paralelismo de las hojas de la puerta del tren NS 93.



Figura 7. Paralelismo de las hojas de una puerta del tren NS93. (Fuente: Metro de Santiago).

#### 2.2.4. Platina de comando de la puerta

Es un equipo electrónico el cual incorpora un microcontrolador Motorola 68HC711E9 y un software con los cuales puede realizar las funciones necesarias para el funcionamiento de las puertas de pasajeros. La Figura 8, muestra una Platina de Puerta.

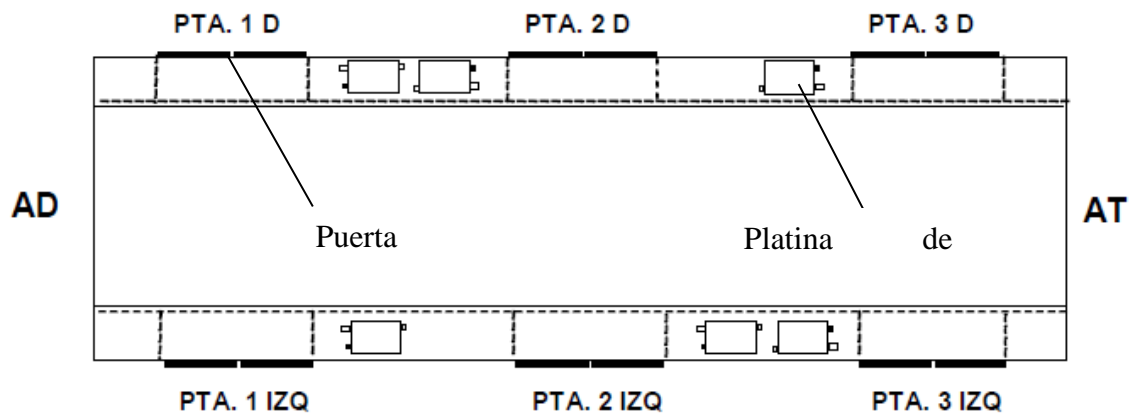


**Figura 8. Platina de puerta del tren NS93. (Fuente: Metro de Santiago).**

Cada una de las puertas del tren, posee una Platina de Puerta, que recibe las órdenes provenientes de los computadores, como cierre o apertura, las procesa y las ejecuta. Alimenta el motor de puertas con tensiones de 72Vcc al inicio y 36Vcc al final para la variación de velocidades al momento de ejecutar el cierre y con tensiones de 72Vcc al inicio y 21,5Vcc al final al momento de ejecutar la apertura de la puerta, con tiempos de maniobra aproximada de 2,5 segundos.

La Platina de Puerta procesa y ejecuta los comandos de apertura y cierre en modo degradado, es decir desconociendo la posición de las hojas de la puerta, con tiempos de maniobra superiores a 4,5 segundos. Comanda y ejecuta la orden de desenclavar la puerta (retirar el seguro a una puerta cerrada) cuando ha sido accionado un freno de urgencia, si los conmutadores de control de mandos dispuestos en las cabinas de conducción (S) se encuentran en modo conducción manual libre. Analiza los niveles de corriente de consumo del motor de puertas para comprobar que no existan obstáculos durante la apertura y el cierre de las puertas y transmite el funcionamiento y estado de la puerta a los computadores del coche.

Según el sentido de orientación de los coches, las puertas y sus platinas se disponen como se visualiza en la Figura 9:



**Figura 9. Disposición de las platinas de puertas con respecto a cada puerta. (Fuente: Alstom, 2003).**

### 2.2.5. Freno de emergencia (KSA)

Es un mecanismo que permite al pasajero y/o usuario informar una urgencia a bordo del tren mediante el accionamiento de una manija ubicada al costado de cada puerta. El accionamiento de esta manija o conmutador envía una señal eléctrica a la Platina

de Puertas para que se active el sistema de seguridad impidiendo la salida del tren si se encuentra en el andén.

### **2.2.6. Conjunto Motor**

El Conjunto Motor está formado por distintos componentes que permiten el giro del tornillo de conjugación a distintas velocidades, detener su giro una vez cerradas las puertas y mantenerlo bloqueado (puerta enclavada) al giro para permitir el cierre seguro de las mismas. A continuación se describe cada componente del Conjunto Motor:

#### **2.2.6.1. Motor eléctrico de puerta**

Es un motor de corriente continua e imanes permanentes y escobillas, cuya potencia útil es de 60 [W]. Recibe la energía eléctrica proveniente de la platina de puertas, de esta manera gira transmitiendo el movimiento al tornillo sin fin. En sentido horario abre las hojas de la puerta y en sentido anti horario las cierra. La Figura 10 muestra el motor junto con otros componentes como: Encoder, Rueda del trinquete y el Electroimán.

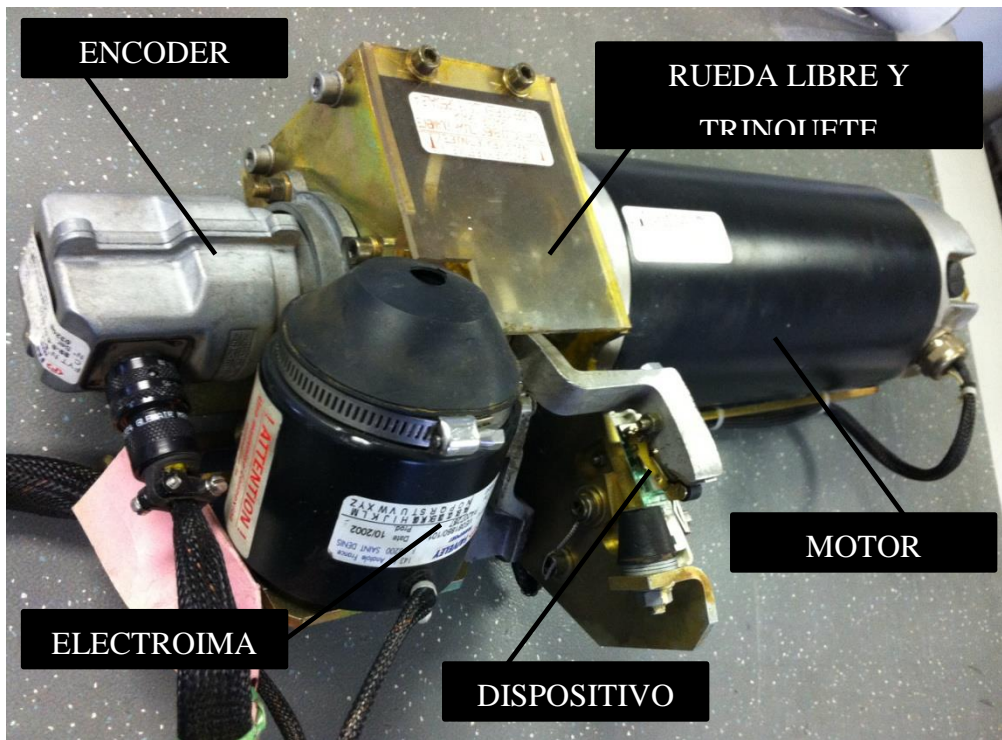


Figura 10. Conjunto Motor. (Fuente: Metro de Santiago).

#### 2.2.6.2. Trinquete y Rueda libre

Es un mecanismo de aleación de aluminio, formado por una rueda dentada llamada rueda libre y un trinquete en forma de H, cuya función es impedir el giro del tornillo de conjugación (puerta enclavada), mediante la acción de un trinquete sobre una rueda dentada solidaria al tornillo de conjugación. La Figura 11 muestra la secuencia de bloqueo y desbloqueo a través del trinquete sobre la rueda dentada por acción del electroimán, la liberación y cierre del trinquete abre o cierra el contacto del micro interruptor FCV.

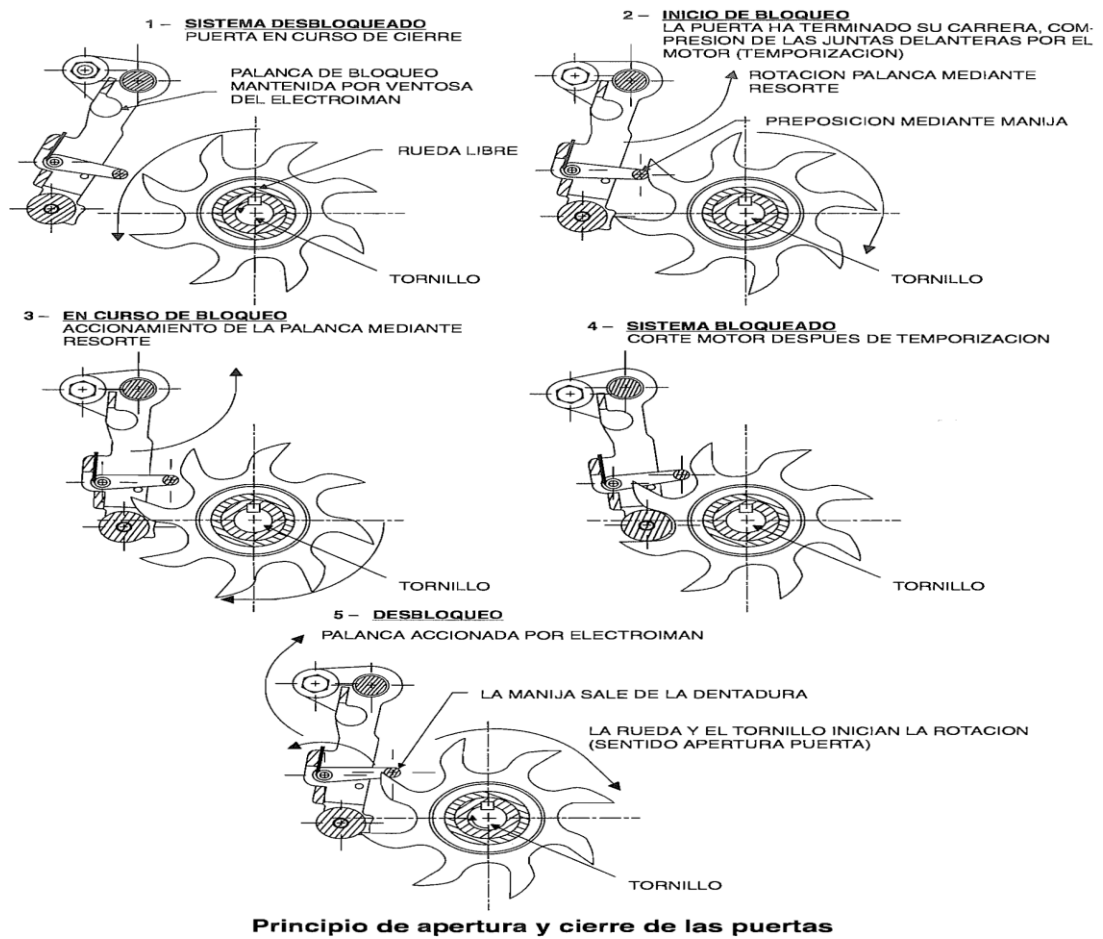


Figura 11. Acción de bloqueo de puerta mediante el Trinquete. (Fuente: Alstom, 2003).

### 2.2.6.3. Encoder

Es un dispositivo electrónico que envía una señal eléctrica a la platina informando de la posición de las hojas de la puerta, mediante el conteo del número de vueltas del tornillo de conjugación. La Figura 12 muestra el dispositivo Encoder.



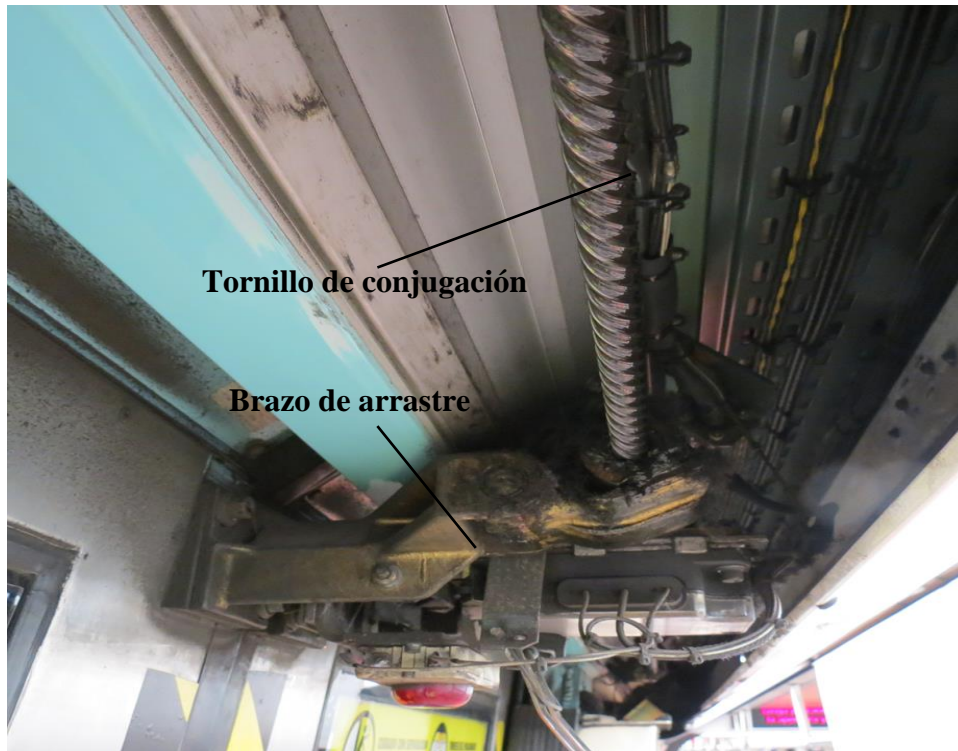
**Figura 12. Dispositivo Encoder. (Fuente: Metro de Santiago).**

#### **2.2.6.4. Electroimán**

Es un solenoide el cual libera la rueda dentada al atraer el trinquete mediante la acción del campo magnético. De esta manera el trinquete se desplaza fuera de los dientes de la rueda. La Figura 10 muestra el electroimán.

#### **2.2.7. Tornillo de conjugación**

Es un tornillo sin fin de hilo helicoidal el cual permite la apertura y el cierre de las hojas de la puerta mediante el giro en sentido horario y anti horario por medio del roscado helicoidal. La Figura 13 muestra el Tornillo de Conjugación manteniendo las hojas de la puerta cerradas.



**Figura 13. Tornillo de Conjugación y brazo de arrastre (Fuente: Metro de Santiago).**

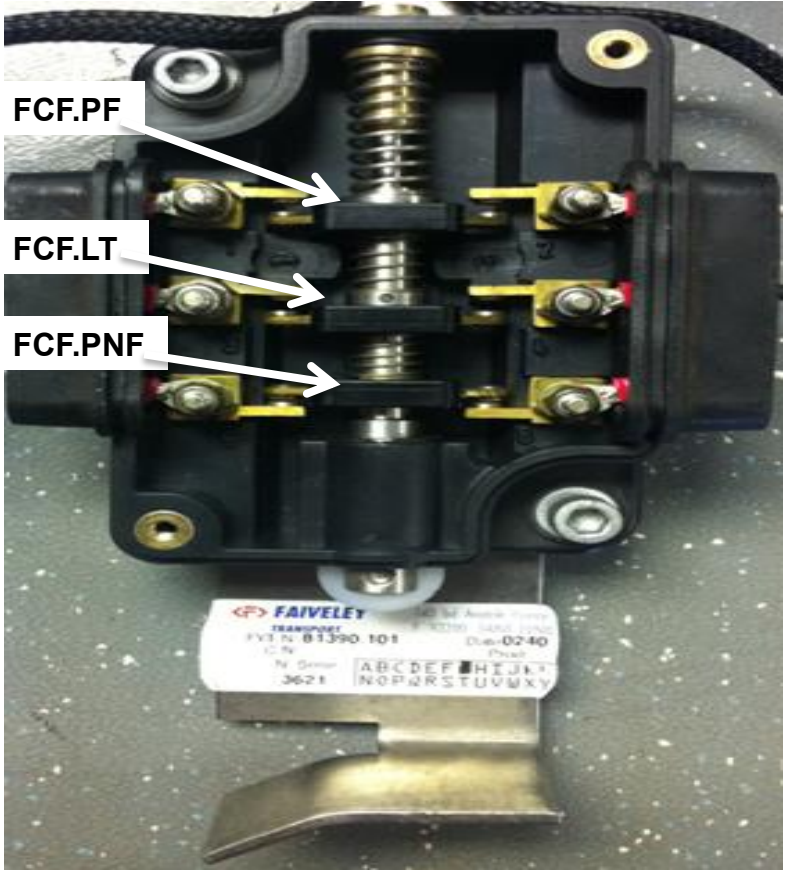
### **2.2.8. Brazos de arrastre hojas de la puerta**

Es una estructura en forma brazo de acero que sostiene y permitir el desplazamiento axial de las hojas de la puerta, a través del tornillo de conjugación mediante una tuerca basculante en el extremo del brazo. En la Figura 13 se aprecia el brazo de arrastre de la hoja de la puerta.

### **2.2.9. Dispositivo de Control de cierre de hojas de la puerta (FCF)**

Es un dispositivo electromecánico formado por un vástago de metal con levas, que mediante la acción de un resorte permite conectar dos puntos eléctricamente. De esta forma envía la señal eléctrica a la platina de puertas, indicando el cierre de las hojas de la puerta mediante el cierre del contacto FCF.PF y del contacto FCF.LT, este

último correspondiente a la línea de seguridad de tren. Por otro lado, la apertura de las hojas de la puerta es informada a la Platina de Puertas mediante una señal eléctrica, a través del cierre del contacto FCF.PNF. La Figura 14 muestra los contactos del dispositivo FCF.



**Figura 14. Contactos del Dispositivo de Control del cierre de las hojas de una puerta FCF.**  
(Fuente: Metro de Santiago).

### **3. Análisis lógico funcional del sistema de puertas del tren NS93**

El análisis correspondiente al funcionamiento del sistema de puerta del tren NS93, consiste en describir la lógica de funcionamiento desde que la señal de apertura y/o cierre, enviada por los computadores dispuestos en el coche, es recibida por la Platina de Puertas hasta cuando se hace efectiva la apertura y/o cierre de las hojas de la puerta.

#### **3.1. Descripción de la apertura de puerta**

Cuando la Platina recibe la orden de apertura de la puerta transmitida por el computador del coche, el proceso es el siguiente:

Uno de los computadores con los que cuenta el coche envía la señal para establecer la apertura de la puerta. Esta señal es recibida por el microcontrolador de Platina de Puerta, el cual envía una corriente eléctrica hacia la bobina del relé de comando de apertura (RCO), estableciéndose el cierre del circuito. El cierre del relé RCO permite enviar una corriente eléctrica que energiza el Electroimán para atraer el Trinquete y liberar (desenclavar) la Rueda libre, produciendo por consiguiente el cierre del contacto FCV. Una vez desenclavada la puerta, el microcontrolador de la Platina de Puerta energiza el relé de inversión de giro del motor (RO), cerrando el circuito y energizando el motor de puerta haciéndolo girar en sentido horario. Este movimiento es traspasado al Tornillo de Conjugación mediante un acoplamiento flexible para se produzca la apertura de las hojas y el cierre del contacto FCF.PNF del sistema FCF. El microcontrolador recibe entonces la señal eléctrica indicando la apertura efectiva. La Figura 15 muestra la secuencia de apertura en diagrama tipo árbol.

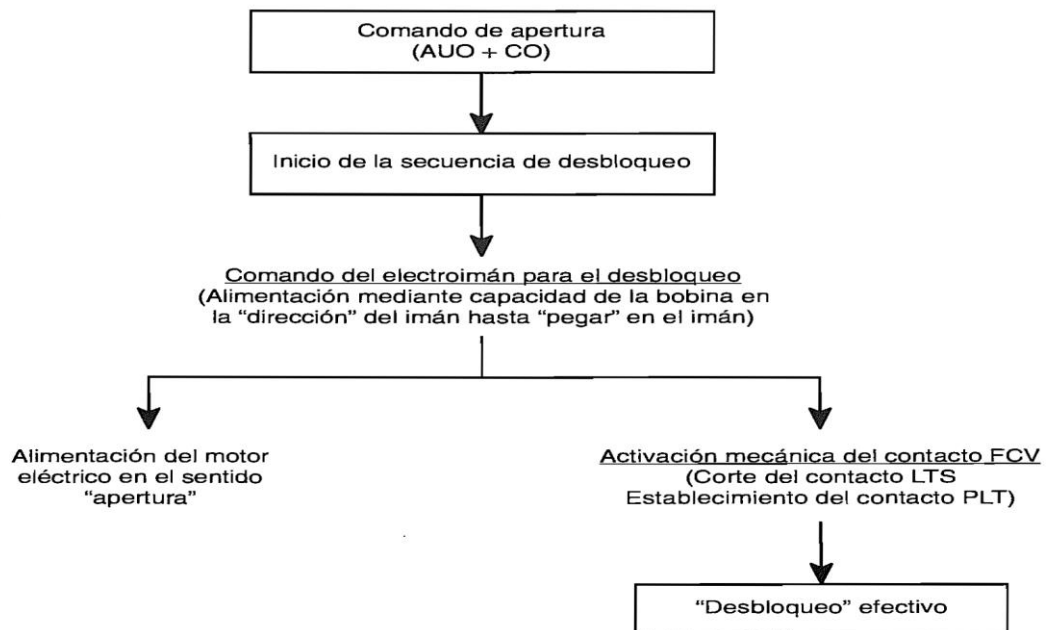


Figura 15. Secuencia de apertura de puertas.(Fuente: Alstom, 2003)

### 3.2. Descripción del cierre de puerta

Cuando la Platina de Puertas recibe la orden de cierre transmitida por el conductor, el proceso es el siguiente:

Uno de los computadores con los que cuenta el coche envía la señal para establecer el cierre de las puertas. Esta señal es recibida por el microcontrolador de la Platina de Puerta, el cual energiza la bobina del relé RCF, cerrando el circuito. El cierre del relé de comando de cierre (RCF) permite energizar la bobina del relé de inversión de giro del motor (RF), una vez cerrado este circuito permite energizar el motor con una polaridad inversa, haciéndolo girar en sentido anti horario. Este movimiento es traspasado al Tornillo de Conjugación mediante un acoplamiento flexible, para comenzar con el cierre de las hojas. De igual manera el dispositivo Encoder cuenta las vueltas del tornillo de conjugación y envía la señal en forma de pulsos eléctricos a la Platina de Puertas, de esta forma la Platina verifica el cierre normal de las hojas de

la puerta. El desplazamiento de las hojas a través de las correderas se logra mediante los Brazos de Arrastre. Estos unen la parte superior de cada hoja al Tornillo de Conjugación mediante una tuerca auto lubricada. Cada hoja además esta soportada desde su parte superior por medio de una Suspensión que consiste en una corredera provista de bolas de acero que facilitan el desplazamiento de las mismas. Una vez cerradas las hojas, se cierran los contactos FCF.PF y FCF.LT del FCF para que la Platina de Puertas comience con la secuencia de bloqueo. De esta forma, la Platina de Puerta energiza el Electroimán con polaridad inversa para empujar el Trinquete en sentido opuesto al imán, se produce por consiguiente la apertura del contacto del FCV, y mediante la ayuda de resorte el Trinquete queda montado sobre la Rueda libre. De esta manera la puerta queda bloqueada. La Figura 16 muestra la secuencia de cierre en un diagrama tipo árbol.

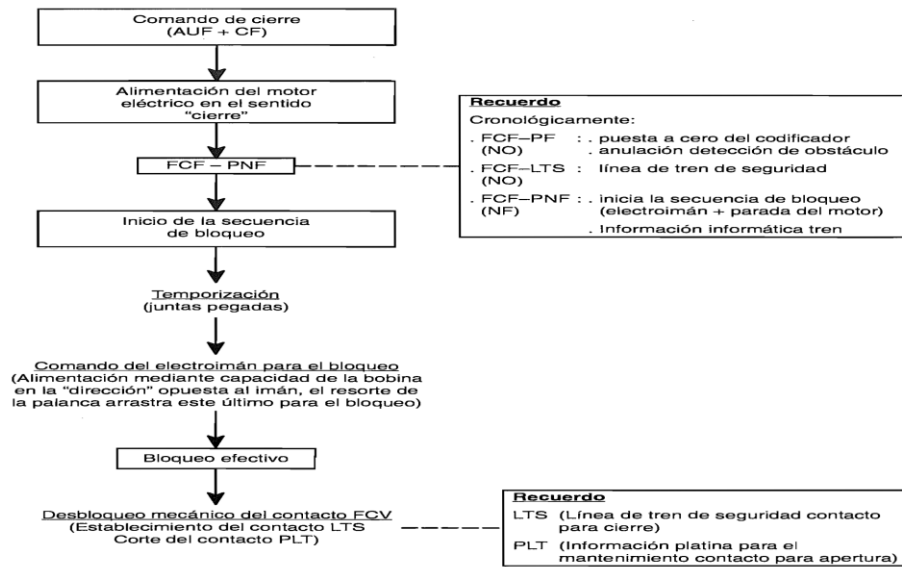


Figura 16. Secuencia de cierre de puertas. (Fuente: Alstom, 2003)

### 3.3. Análisis funcional FAST del sistema de puertas del tren NS 93.

El análisis funcional FAST es una herramienta que consiste en inventariar, ordenar, caracterizar y priorizar las funciones de un sistema (Tassinari, 1992). El análisis básicamente comienza desarrollando un gráfico de relación entre el sistema en estudio y el entorno. La relación entre el sistema y los elementos del entorno, es llamada función de servicio (FS). La función de servicio puede ser definida de acuerdo a su naturaleza o a su importancia. Una vez que se han descrito las funciones de servicio entre el producto y el entorno, se comienza con el análisis de las funciones técnicas avanzando por niveles, de lo general a lo particular, de manera de que se pueda establecer la lógica de construcción del diagrama, respondiendo las preguntas: ¿Por qué? , ¿Cómo? y ¿Cuándo?, tal como se indica en la Figura 17.

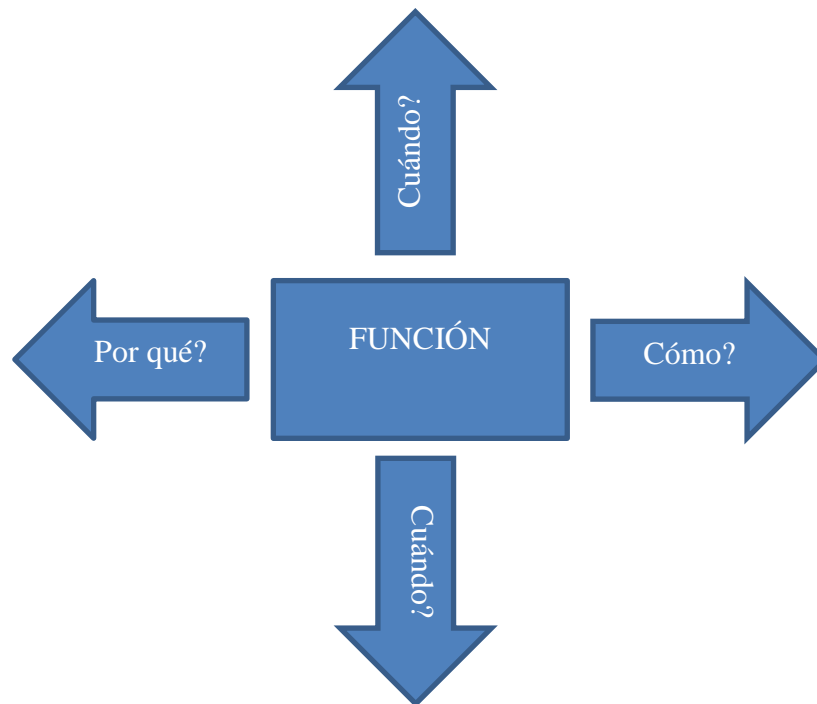


Figura 17. Lógica de elaboración de análisis FAST. (Fuente: Tassinari, R. 1992)

### 3.3.1. Desarrollo del análisis FAST al sistema de puertas del tren NS93

Para establecer el análisis funcional del sistema se debe dejar en claro que el sistema llamado “sistema de puertas” comprende una puerta y sus componentes tal como se describe en el Capítulo 2. Los componentes del entorno o medio ambiente con los cuales se relaciona son: los usuarios, el coche del tren como estructura y los computadores del coche. La Figura 18 muestra las distintas relaciones que se producen entre el artefacto en análisis y su entorno, designándolas como funciones de servicio (FS) y el número que la acompaña otorga el nivel de importancia de esta relación. De lo anterior se puede decir que la función principal es la FS1 la cual relaciona dos componentes del entorno con el producto.

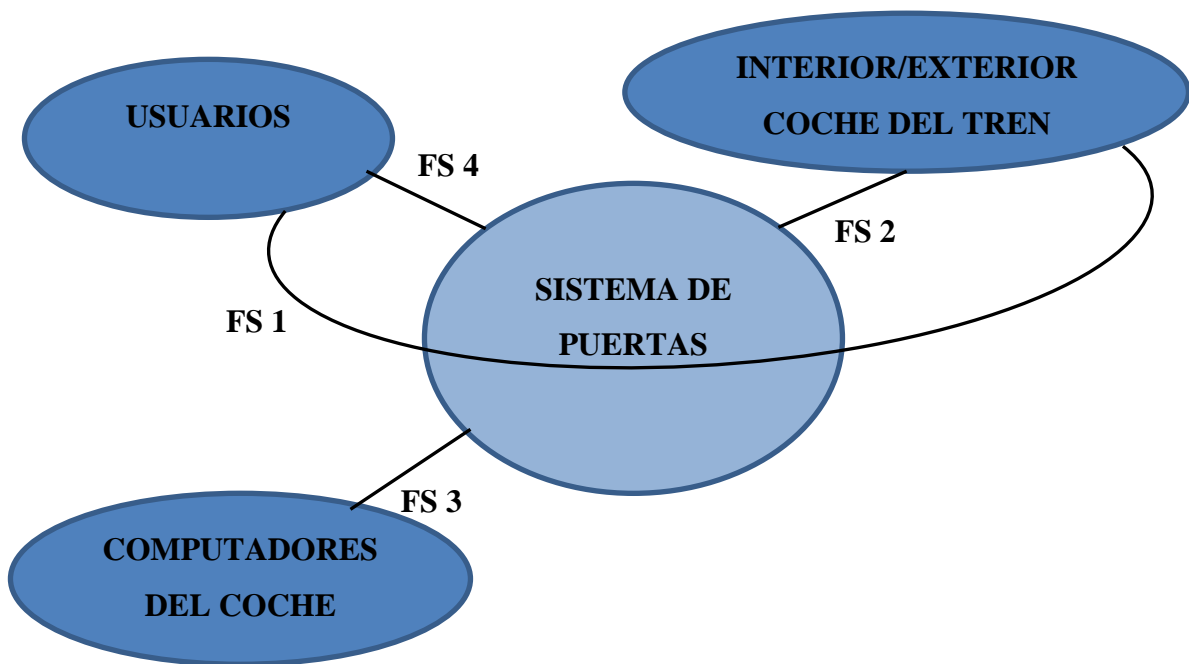


Figura 18. Diagrama de relación de las funciones de servicio del sistema de puertas del tren NS93.

A continuación se describen cada una de las funciones de servicio y se realiza el análisis FAST de cada una de ellas.

**FS 1: Permitir el ingreso y salida de usuarios del coche.**

**FS 2: Realizar cierre hermético entre el interior y exterior del coche.**

**FS3: Intercambiar señales de comando/información, desde/hacia los computadores del coche.**

**FS 4: Permitir al usuario informar emergencia.**

Para realizar el análisis FAST se describen las funciones técnicas, en cada uno de los niveles, que permiten que la función de servicio se relacione con el medio. Para plantear la función técnica se deben responder las siguientes preguntas: el por qué? antes de la función, el cómo? después de la función y el cuándo? sobre y bajo la misma.

### 3.3.1.1. Análisis de la función principal FS1

En la Figura 19 se presenta el análisis FAST, para la función principal FS1.

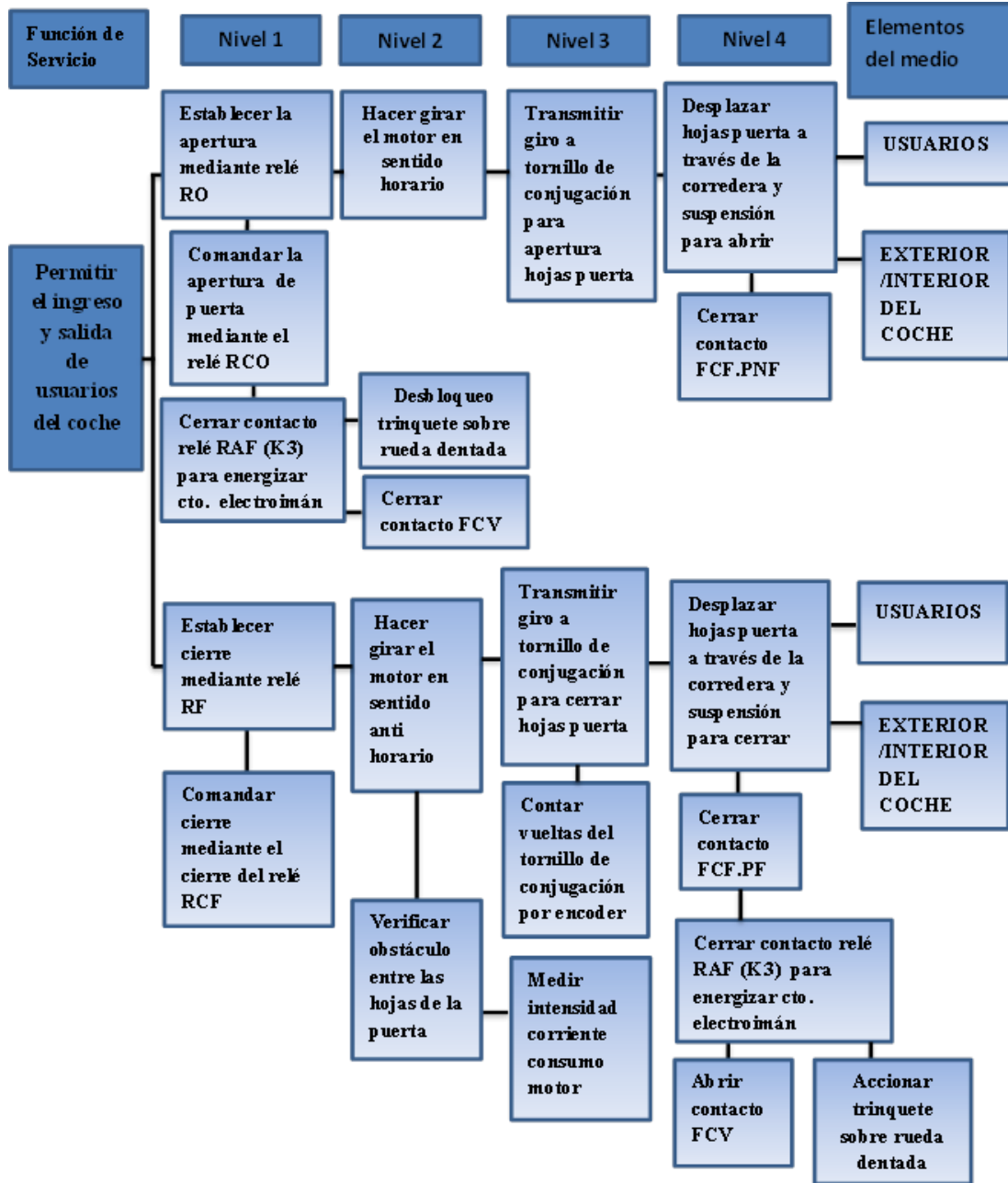


Figura 19. Análisis de la función principal FS 1.

### 3.3.1.2. Análisis de la función FS2

En la Figura 20 se muestra el análisis FAST, para la función FS2

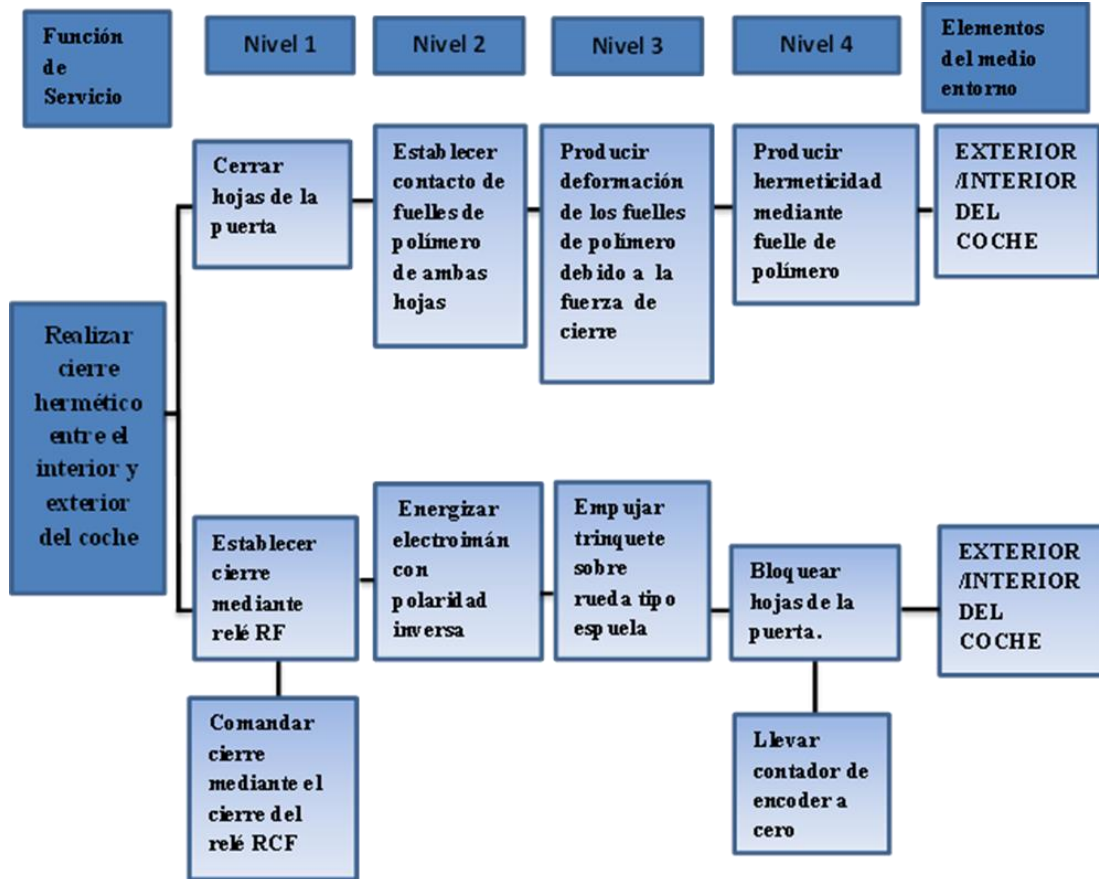


Figura 20. Análisis de la función FS 2.

### 3.3.1.3. Análisis de la función FS3

En la Figura 21 se muestra el análisis FAST, para la función FS3.

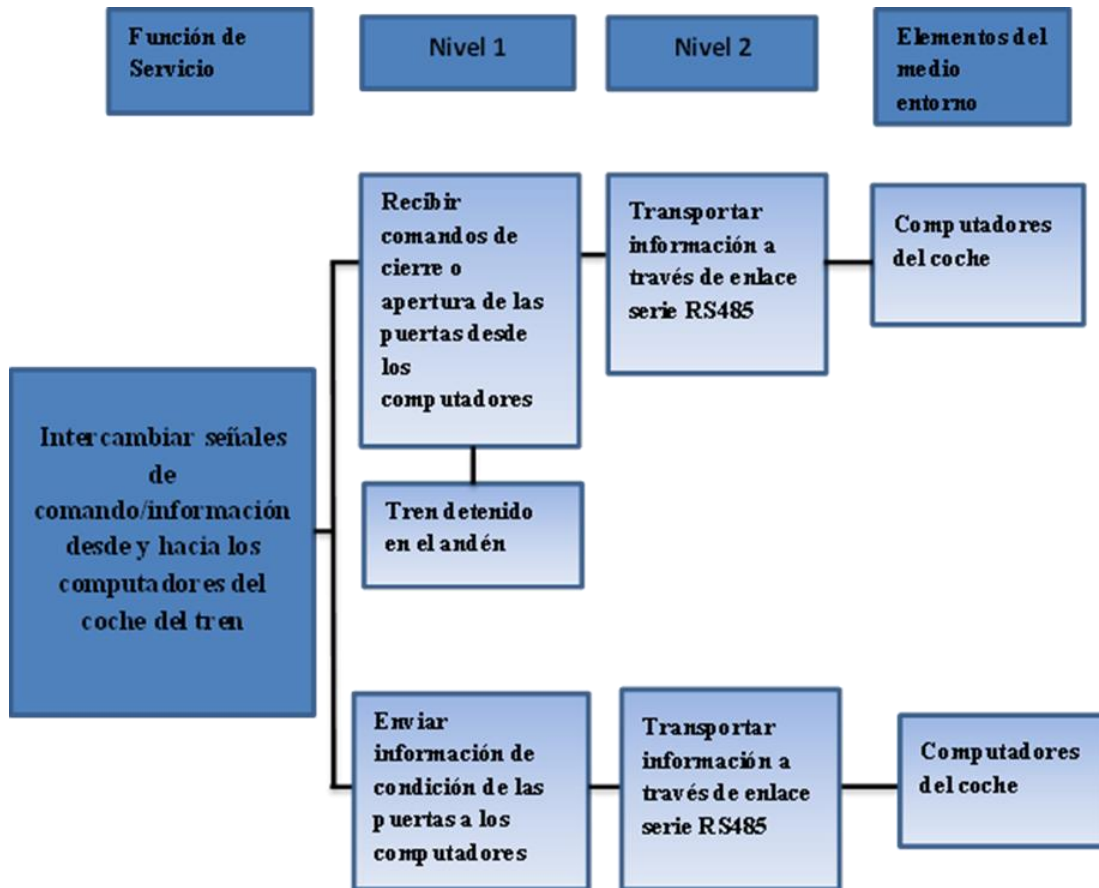


Figura 21. Análisis de la función FS 3.

### 3.3.1.4. Análisis de la función FS4

En la Figura 22 se muestra el análisis FAST, para la función FS4.

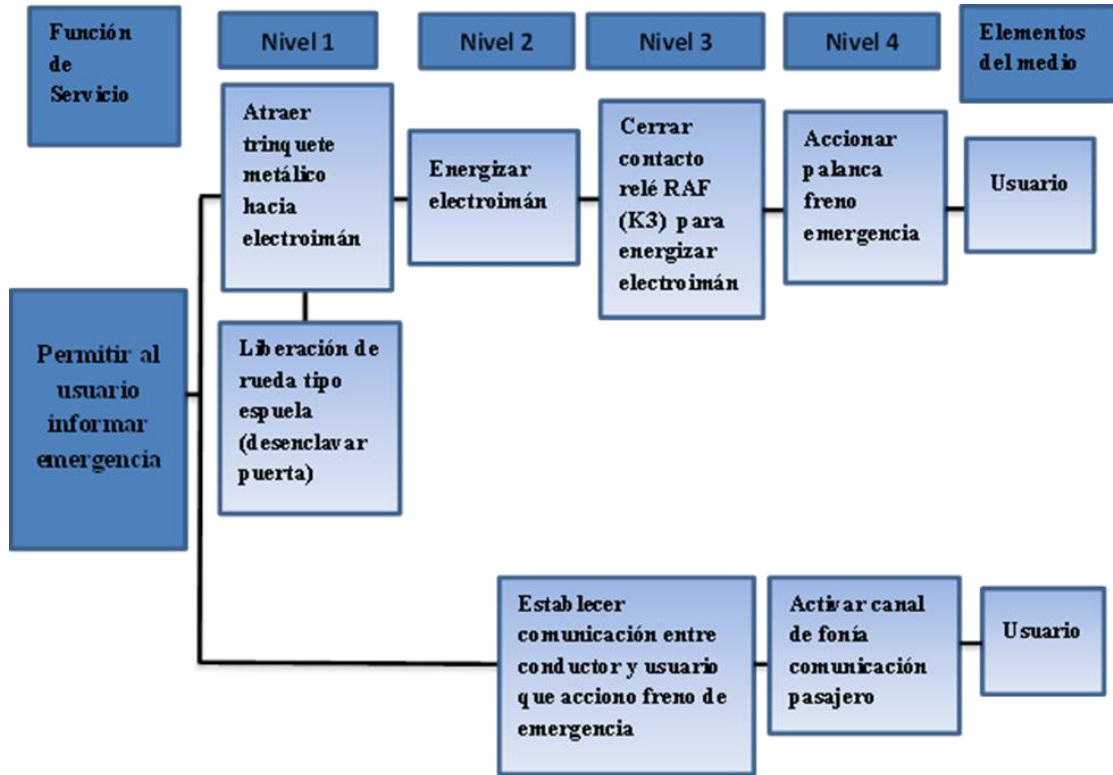


Figura 22. Análisis de la función (FS 4).

## **4. Análisis del historial de fallas del sistema de puertas del tren NS 93**

El análisis del historial de fallas del sistema de puertas del tren NS93, se realiza mediante el uso de información histórica, correspondientes a los años 2014 y 2015, del archivo de mantenimiento de material rodante llamado SISMAN, donde se declaran las averías de los trenes en general. De esta forma se puede obtener información relevante del sistema de puertas del tren NS93, tales como: tipos de falla, la frecuencia de ocurrencia de estos tipos de falla y los efectos que producen debido a la ocurrencia de la falla, durante un periodo de tiempo dado. Esta información se utiliza luego, para determinar los componentes críticos del sistema.

### **4.1. Análisis de fallas históricas entre los años 2014 y 2015 del sistema de puertas del tren NS93, de Línea 5.**

El análisis se realiza en base a datos extraídos del archivo de mantenimiento SISMAN, el cuál es básicamente un archivo tipo Excel, donde se registran diferentes averías del material rodante sucedidas en la red metro. La búsqueda se realiza filtrando información por criterios de tecnología, fecha, sistema del cual se desprende la avería, estación donde el tren presentó la avería, descripción de la falla, entre otros. Cabe mencionar que sólo tiene acceso a este archivo personal de material rodante.

La razón de seleccionar las averías de los trenes NS93 de Línea 5 es porque el mantenimiento de los trenes es realizado de forma íntegra por personal de Metro S.A.

La Tabla 1 muestra tiempo total de no disponibilidad, frecuencia de suceso, tiempo promedio y el efecto causado por cada tipo de falla para componentes del sistema de puertas obtenidos del archivo SISMAN. Esto para el periodo comprendido entre los años 2014 y 2015.

Las fallas del sistema se categorizan de acuerdo a los siguientes tipos de fallas:

- a) Puerta no cierra.
- b) Puerta no abre.
- c) Puerta no tiene enclavamiento.
- d) Apertura y cierre lento.
- e) Puerta no abre completamente.
- f) Ruido anormal al abrir puerta
- g) Puerta trabada mecánicamente.
- h) Golpeteo metálico al realizar apertura.
- i) Ruido metálico al abrir y cerrar puerta.
- j) Objeto extraño en corredera impide el deslizamiento de la puerta.

La Tabla 1 proporciona información con la cual se puede realizar un análisis con respecto a las relaciones existentes entre el número de fallas, los tipos de fallas, los tipos de componentes y el tiempo de no disponibilidad correspondiente al sistema de puerta del tren NS93. A continuación se analiza la información por el tipo de falla con respecto al número de fallas y al tiempo total de no disponibilidad.

**Tabla 1. Información de falla de componentes del sistema de puertas del tren NS93. Periodo comprendido 2014-2015.**

Componente	Tipo de Falla	Número de fallas	Efecto causado	T. acumu. No disponible [h]	T. Promedio por falla [h]
Conjunto Motor puerta	Puerta no cierra	10	Se bloquea puerta y/o se evacua tren	31.88	3.19
	Puerta no abre	9	Puerta queda fuera de servicio	21.93	2.44
	Puerta no tiene enclavamiento	2	Se bloquea puerta y/o se evacua tren	4.42	2.21
	Apertura y cierre lento	4	Continua con servicio/ Se bloquea puerta	13.87	3.47
	Puerta no abre completamente	1	Continuo con servicio degradado	1.60	1.60
	Ruido anormal al abrir puerta	1	Continuo con servicio degradado	3.67	3.67
	Puerta trabada mecanicamente	1	Tren se evacua	2.53	2.53
	<b>Total tipo de falla</b>	<b>28</b>	<b>Total tiempos</b>	<b>79.90</b>	<b>19.10</b>
Platina de puertas	Puerta no cierra	16	Se bloquea puerta y/o se evacua tren	50.80	3.18
	Puerta no abre	4	Puerta queda fuera de servicio	16.35	4.09
	Puerta no tiene enclavamiento	5	Se bloquea puerta y/o se evacua tren	43.17	8.63
	Apertura y cierre lento	6	Continua con servicio/ Se bloquea puerta	52.28	8.71
	<b>Total tipo de falla</b>	<b>31</b>	<b>Total tiempos</b>	<b>162.60</b>	<b>24.61</b>
Hoja de Puerta	Golpeteo metalico al realizar apertura	1	Continuo con servicio degradado	2.18	2.18
	Ruido metalico al abrir y cerrar puerta	1	Continuo con servicio degradado	3.78	3.78
	<b>Total tipo de falla</b>	<b>2</b>	<b>Total tiempos</b>	<b>5.97</b>	<b>5.97</b>
Corredera hoja puerta (Riel de guiado inferior)	Objeto extraño impide desliz. Puerta	1	Se retira objeto/ Se evacua tren	1.97	1.97
	<b>Total tipo de falla</b>	<b>1</b>	<b>Total tiempos</b>	<b>1.97</b>	<b>1.97</b>

En el Gráfico1 se puede apreciar que tres tipos de falla, correspondiente a: Puerta no cierra, Puerta no abre y Apertura y cierre lento, son los causantes del 80% del total de las fallas para el periodo 2014 al 2015.

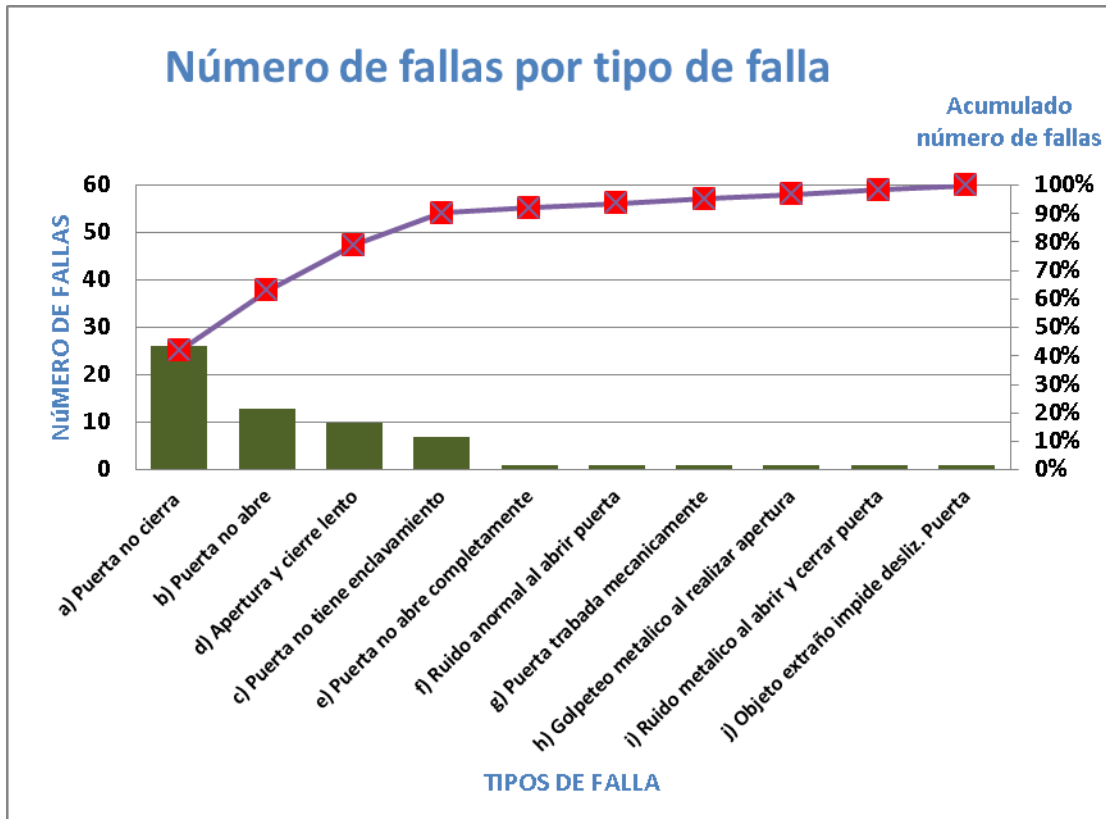
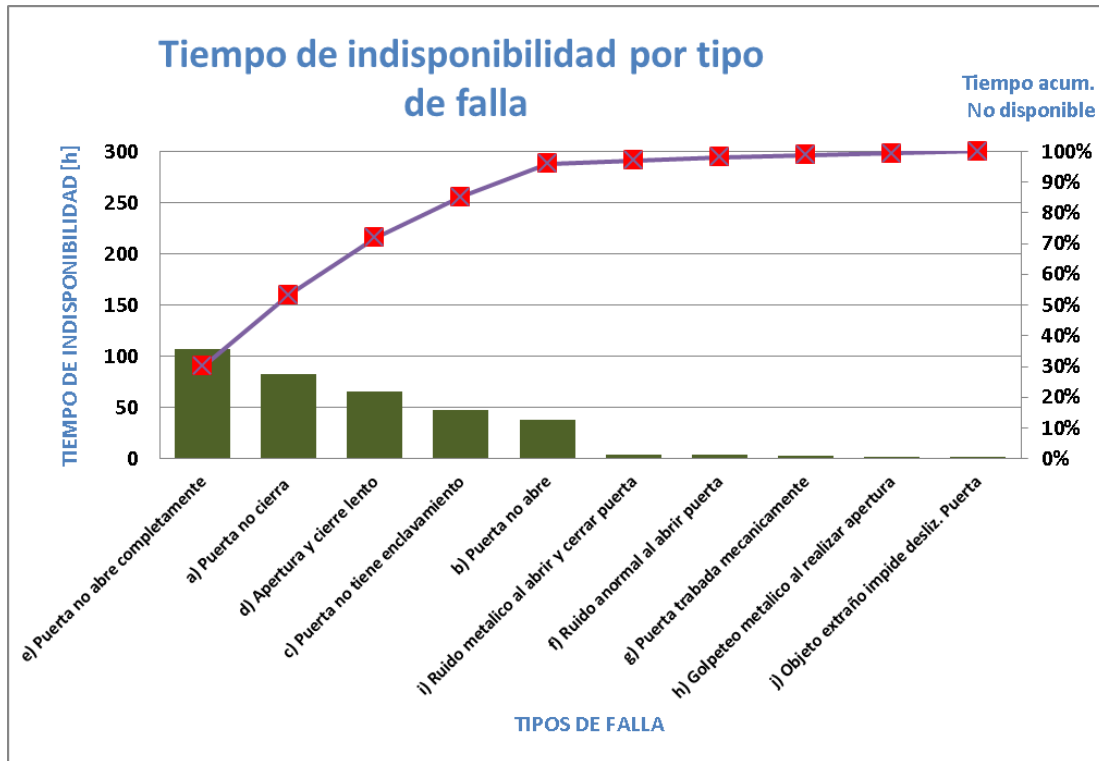


Gráfico 1. Número de fallas por tipo de falla.

En el Gráfico 2 se puede apreciar que los tipos de falla: Puerta no abre, Puerta no cierra y Apertura y cierre lento, son las que ocasionan cerca del 70% del tiempo de no disponibilidad del tren, producto del mantenimiento correctivo en talleres por la falla ocasionada.



**Gráfico 2. Tiempo acumulado de cada tipo de falla.**

A continuación, se realiza el análisis por tipo de componente con respecto al número de fallas y al tiempo de no disponibilidad.

En el Gráfico 3 se puede apreciar que los componentes que más ocasionaron fallas durante el periodo 2014 al 2015, son la Platina de Puertas y el Conjunto Motor.

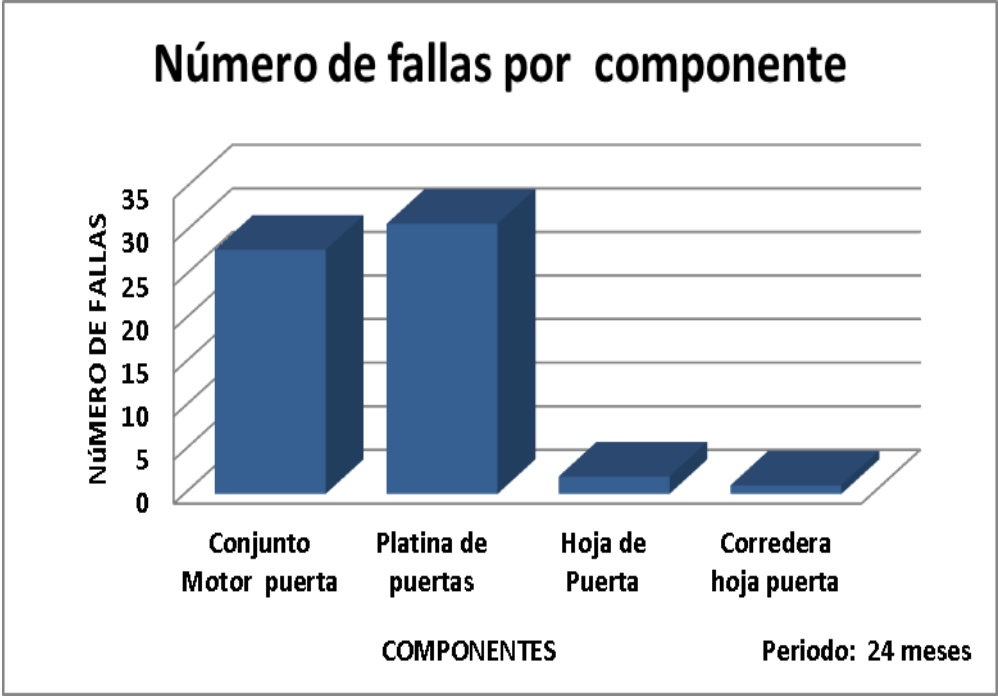


Gráfico 3. Número de fallas por tipo de componentes.

De igual forma, en el Gráfico 4, se puede apreciar que el tiempo de no disponibilidad de los trenes, debido al mantenimiento correctivo, está asociado a los componentes, Platina de Puertas y Conjunto Motor.

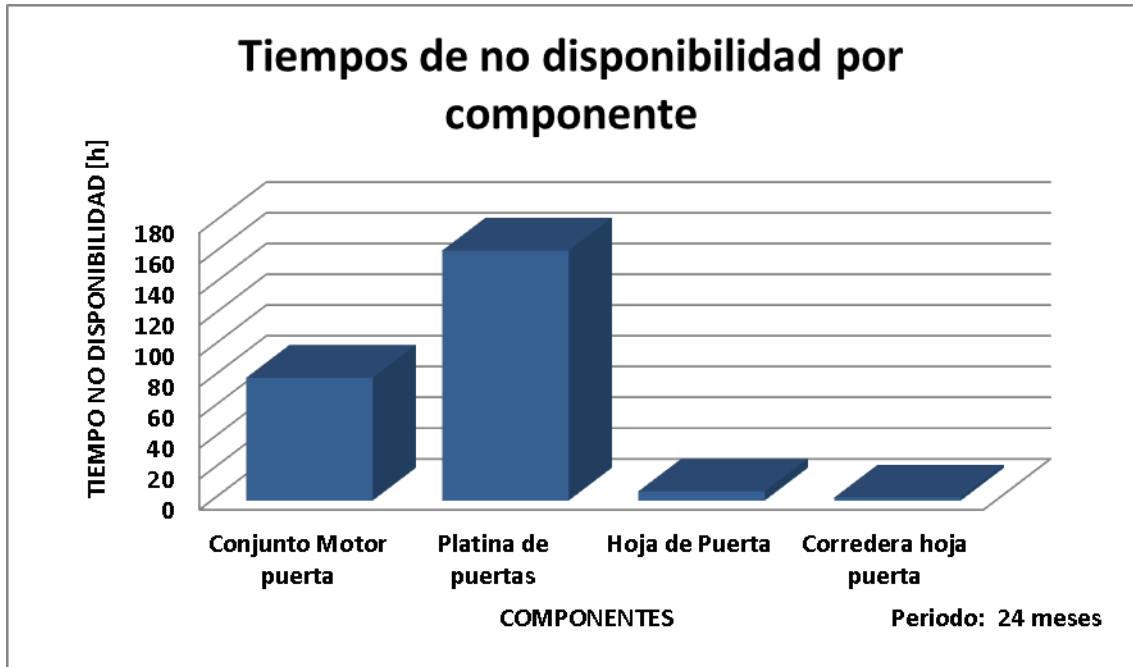


Gráfico 4. Tiempo de no disponibilidad por tipo de componente que falla.

#### 4.2. Conclusión del análisis de historial de fallas

Se puede decir, que los tipos de fallas más recurrentes y que ocasionan la no disponibilidad de los trenes en el periodo comprendido de los años 2014 y 2015 son: Puerta no abre, Puerta no cierra y Apertura y cierre lento, asociados principalmente a la Platina de Puertas y al Conjunto Motor.

Sin embargo, como el o los componentes críticos están dados tanto por la frecuencia con que fallan como por las consecuencias que generan estas fallas, es necesario realizar además un estudio de criticidad para cada componente el cual será abordado a continuación.

## 5. Determinación de la criticidad de los componentes

En el siguiente capítulo se determinan los componentes críticos del sistema de puertas del tren NS93 de acuerdo a los siguientes parámetros: tiempo promedio de indisponibilidad en el periodo comprendido entre los años 2014 y 2015, costos de mantenimiento (sólo mano de obra) e impacto a la operación (con respecto al servicio).

Para obtener el valor de criticidad se multiplica el número de fallas de cada componente por el valor de la sumatoria de la evaluación de los criterios de las consecuencias (Rivera, 2014). Esta criticidad expresada con un valor cuantificable, se jerarquiza de tal forma que el valor más alto corresponde al componente más crítico. El o los componentes más críticos serán luego sometidos al análisis RCM.

### 5.1. Determinación de la criticidad de cada componente

La Tabla 2 muestra el número de fallas que presenta un componente (en los años 2014 y 2015) del sistema de puertas. Se le otorga un valor de 4 al componente que presenta una Alta frecuencia de falla y de 1 al componente que presenta una frecuencia de falla remota.

Tabla 2. Cuantificación de la Frecuencia de cantidad de fallas de un componente.

Frecuencia	Fallas	Cuantificación
Alta	De 21 a 31	4
Media	De 10 a 20	3
Baja	De 4 a 9	2
Remota	De 1 a 3	1

La Tabla 3 muestra las categorías de consecuencias para la operación, los costos en mano de obra del mantenimiento y los tiempos de indisponibilidad. Se otorga una ponderación a cada categoría de consecuencia de 1 a 4, siendo 4 la consecuencia más significativa.

**Tabla 3. Tabla de consecuencias operativas, costos de mano de obra y tiempos de indisponibilidad en el sistema de puerta.**

Consecuencias	Operativas	Costos en M.O en \$ (x 1000)	Tiempo promedio de indisponibilidad	Cuantificación
<b>Catastrófica</b>	Puerta trabada en apertura	Mayor a 500	De 19 a 25 hrs	4
<b>Crítico</b>	Puerta no abre / no cierra	De 300 a 500	De 10 a 18 hrs	3
<b>Mínimo</b>	Apertura y cierre lento	de 100 a 299	De 5 a 9 hrs	2
<b>Insignificante</b>	Ruido metálico al abrir y cerrar	De 10 a 99	de 1 a 4 hrs	1

Finalmente se obtiene en la Tabla 4, la criticidad de cada componente del sistema de puerta con respecto a la frecuencia de falla y las consecuencias de la misma para la operación, los tiempos de indisponibilidad y los costos asociados a la reparación.

**Tabla 4. Criticidad de cada componente del sistema de puertas.**

Componente	Frecuencia	Consecuencias			Criticidad (Frecuencia x Consecuencia)
		Operación	T. indispon.	Costos	
<b>Conjunto Motor puerta</b>	4	4	4	2	40
<b>Platina de puerta</b>	4	3	4	4	44
<b>Hoja de puerta</b>	1	1	2	1	4
<b>Corredera hoja puerta</b>	1	4	1	1	6

El Gráfico 5 muestra la jerarquización de la criticidad obtenida para los componentes en orden decreciente, de acuerdo a los valores obtenidos en la Tabla 4.

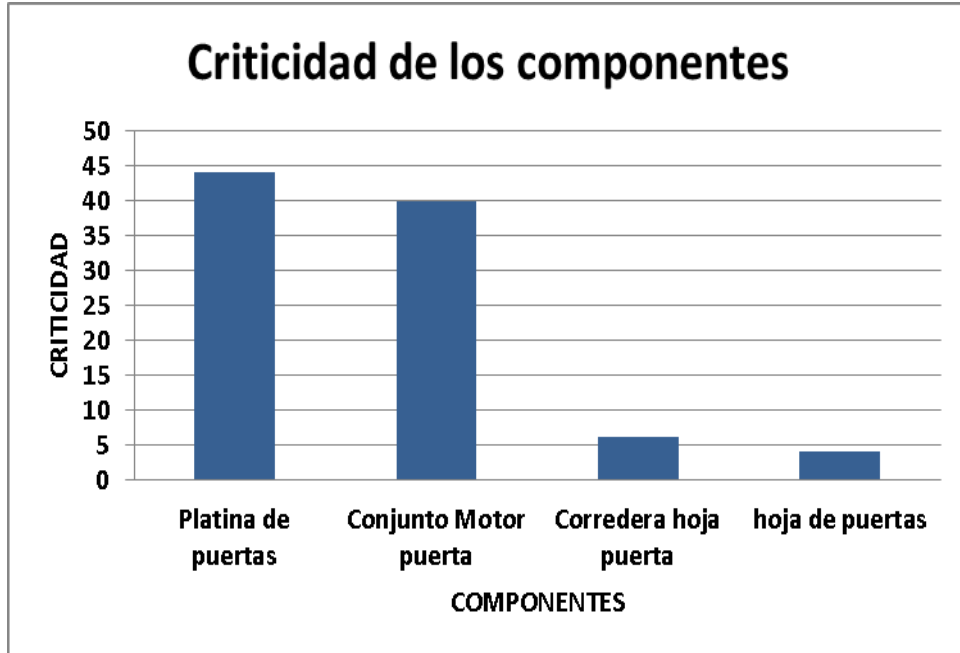


Gráfico 5. Jerarquización de los componentes críticos del sistema de puertas del tren NS93

Se puede concluir que la Platina de Puertas es el componente más crítico del sistema de puertas del tren NS93, seguido por el Conjunto Motor de puerta. Estos componentes serán entonces los que se someterán a un análisis de RCM.

## **6. Análisis de los modos de falla, efectos y criticidad de los componentes seleccionados.**

En el siguiente capítulo se desarrollará la metodología AMFEC (análisis de modos de fallas efectos y criticidad) para los componentes Platina de Puerta y el Conjunto Motor de puerta determinados anteriormente. Primero se comienza por determinar la función que cumple cada componente en el sistema de puertas, luego se determinan las maneras de cómo pueden fallar esas funciones, conocidas como modos de falla, y finalmente, se establece cuál es la criticidad de estos modos de falla con respecto a las consecuencias que afectan a la seguridad de las personas, al servicio de transporte que se ofrece y a los tiempos de indisponibilidad de los trenes. El valor obtenido de la criticidad de cada modo de falla se asume como el valor del riesgo, los cuales pueden agruparse, de acuerdo a criterios de la organización, en riesgo alto y moderado. Los datos correspondientes se obtienen de historiales de reparación del laboratorio de Platinas de Puertas y del laboratorio de Motores de puertas, de talleres Neptuno, del Metro de Santiago de Chile, para los años 2014 y 2015.

### **6.1. Análisis AMFEC de los componentes**

En la Tablas 5 y 6 se muestran las funciones que realizan la Platina de Puerta y el Conjunto Motor, las fallas de cada función y los modos de fallas correspondiente. La primera función es la principal y tiene relación directa con la obtenida en el análisis FAST del sistema de puerta con respecto a su entorno. La columna observaciones, indica si el modo de falla se ha presentado durante el periodo 2014 y 2015 de acuerdo al historial de averías y reparaciones. Si el modo de falla se encuentra a lo menos una vez en el historial de averías y reparaciones, en la columna OBSERVACIONES se escribe la palabra “Sin observaciones” si por el contrario el modo de falla no se encuentra se escribe la palabra “Difícil que ocurra”.

**Tabla 5. Funciones, fallas funcionales y modos de falla de la Platina de Puertas.**

ITEM	PIEZA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	OBSERVACIONES		
1	PLATINA DE PUERTAS	1.1 Procesar y ejecutar el comando de cierre y apertura proveniente de los ordenadores.	1.1.1 Incapaz de procesar y ejecutar el comando de cierre y apertura proveniente de los ordenadores.	1.1.1.1	Microcontrolador de platina deja de funcionar por sobreintensidad o calentamiento	Sin observaciones	
				1.1.1.2	Bobina réle comando de apertura (RCO) sin trabajo	Difícil que ocurra	
				1.1.1.3	Alta resistencia eléctrica de contactos de RCO	Difícil que ocurra	
				1.1.1.4	Bobina réle de comando de cierre (RCF) sin trabajo	Difícil que ocurra	
				1.1.1.5	Alta resistencia eléctrica de contactos de RCF	Difícil que ocurra	
				1.1.1.6	Bobina de réle de apertura (RO) sin trabajo	Sin observaciones	
				1.1.1.7	Alta resistencia eléctrica de contactos de RO	Sin observaciones	
				1.1.1.8	Bobina de relé de cierre (RF) sin trabajo	Sin observaciones	
				1.1.1.9	Alta resistencia eléctrica de contactos de RF	Sin observaciones	
				1.1.1.10	Diodo bidireccional sin continuidad	Difícil que ocurra	
				1.1.1.11	Fusible 396 de 7 amperios actuado	Difícil que ocurra	
		1.1.1.12	Falla de optoacopladores impide canalizar la las órdenes provenientes de los ordenadores a la platina a traves de los enlases serie RS485	Difícil que ocurra			
		1.2	1.2.1 Comandar alimentación hacia el motor de puertas con tensiones de 72Vcc al inicio y 36Vcc al final para la variación de velocidades al momento de ejecutar el cierre. Con tiempos de maniobra aprox. de 2,5s	1.2.1 Incapaz de comandar la alimentación hacia el motor de puertas con tensiones de 72 Vcc al inicio y 36 Vcc al final para variación de velocidades al momento de ejecutar el cierre. Con tiempos de maniobra aprox. de 2,5 s.	1.2.1.1	Falla del software que gestiona las velocidades de cierre de la puerta del microcontrolador	Difícil que ocurra
		1.3	1.3.1 Comandar alimentación hacia el motor de puertas con tensiones de 72 Vcc al inicio y 21,5 Vcc al final para la variación de velocidades al momento de ejecutar la apertura de puertas. Con tiempos de maniobra aprox. de 2,5s.	1.3.1 Incapaz de comandar la alimentación hacia el motor de puertas con tensiones de 72 Vcc al inicio y 21,5 Vcc al final para la variación de velocidades al momento de ejecutar la apertura de las puertas. Con tiempos de maniobra aprox. de 2,5 s.	1.3.1.1	Falla del software que gestiona las velocidades de apertura de la puerta del microcontrolador	Difícil que ocurra
		1.4	1.4.1 Comandar la apertura y cierre de puertas en modo degradado (se desconoce la posición de las hojas). Con tiempos de maniobra mayor de 4,5 s.	1.4.1 Incapaz de comandar la apertura y cierre de puertas en modo degradado (se desconoce la posición de las hojas). Con tiempos de maniobra mayor de 4,5 s.	1.4.1.1	Falla del software que gestiona la apertura o el cierre de las puertas en modo degradado del microcontrolador	Difícil que ocurra
		1.5	1.5.1 Comandar el enclavamiento y desenclavamiento de las puertas mediante el trinquete del motor.	1.5.1 Incapaz de Comandar el enclavamiento y desenclavamiento de las puertas mediante el trinquete del motor.	1.5.1.1	Bobina relé de enclavamiento (K1) sin trabajo	Difícil que ocurra
					1.5.1.2	Alta resistencia eléctrica en contactos del K1	Difícil que ocurra
1.5.1.3	Bobina relé desenclavamiento (K2) sin trabajo				Difícil que ocurra		
1.5.1.4	Alta resistencia en contactos del K2				Difícil que ocurra		
1.5.1.5	Bobina de relé de línea de tren (k3) sin trabajo				Difícil que ocurra		
1.5.1.6	Alta resistencia en contactos de K3	Difícil que ocurra					
1.6	1.6.1 Comandar el desenclavamiento de la puerta donde ah sido accionado un freno de emergencia (KSA), con tren detenido en el andén.	1.6.1 Incapaz de comandar el desenclavamiento de la puerta donde ah sido accionado un freno de emergencia con tren detenido en el andén.	1.6.1.1	Bobina rele' desenclavamiento (K2) sin trabajo	Difícil que ocurra		
			1.6.1.2	Alta resistencia eléctrica en contactos de K2	Difícil que ocurra		
			1.6.1.3	Bobina de de relé de freno de emergencia (RKSA) sin trabajo	Difícil que ocurra		
			1.6.1.4	Alta resistencia en contactos del RKSA	Difícil que ocurra		
1.7	1.7.1 Procesar la detección de obstaculos durante la apertura y el de las puertas mediante el análisis de la corriente del motor (torque)	1.7.1 Incapaz de procesar la detección de obstaculos durante la apertura y el cierre de las puertas mediante el análisis de la corriente del motor	1.7.1.1	Falla de software que gestiona la detección de obstaculos del microcontrolador	Difícil que ocurra		
1.8	1.8.1 Transmitir información del funcionamiento de las puertas a un ordenador	1.8.1 Incapaz de transmitir el funcionamiento de las puertas a los ordenadores	1.8.1.1	Microcontrolador de platina fuera de servicio por sobreint/calent. impide saber estado de la puerta	Sin observaciones		
			1.8.1.2	Falla de optoacopladores impide canalizar la información del estado de la puerta por los enlases series RS485 hacia los ordenadores	Difícil que ocurra		

**Tabla 6. Funciones, fallas funcionales y modos de falla del Conjunto Motor de puerta.**

ITEM	PIEZA	FUNCIÓN	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	OBSERVACIONES
2	MOTOR PUERTAS	2.1 Producir el giro del tornillo de conjugación (sin fin) con una velocidad de hasta 1000 r.p.m y una potencia de 60 W.	2.1.1 Incapaz de producir el giro del tornillo de conjugación.	2.1.1.1 Perdida aislación rotor/estator por solenoide cortado	Sin observaciones
				2.1.1.2 Perdida aislación por carbones desgastados (polvo)	Sin observaciones
			2.1.2 Incapaz de producir la velocidad de 1000 r.p.m a una potencia de 60W	2.1.2.1 Perdida aislación rotor/estator por solenoide cortado	Sin observaciones
				2.1.2.2 Resistencia al giro por rodamientos desgastados	Sin observaciones
3	TRINQUETE	3.1 Impedir el giro del tornillo de conjugación, mediante la acción de trinquete sobre la rueda libre. La liberación de la rueda se realiza por un electroimán que empuja la el trinquete hacia afuera.	3.1.1 Incapaz de impedir el giro del tornillo de conjugación.	3.1.1.1 Brazo pivote trinquete, suelto o fracturado por fatiga de material	Sin observaciones
				3.1.1.2 Diente de rueda libre desgastado por rozamiento	Sin observaciones
				3.1.1.3 Tornillo seguro de rueda dentada rodado	Difícil que ocurra
			3.1.2 Incapaz de liberar la rueda libre mediante la acción del resorte	3.1.2.1 Resorte cortado por fatiga de material	Sin observaciones
		3.1.2.2 Resorte sin fuerza por pérdida de propiedad elástica		Sin observaciones	
		3.2 Enviar señal del accionamiento del trinquete a platina de puertas mediante limit swich.	3.2.1 Incapaz de enviar señal de accionamiento trinquete	3.2.1.1 Limit swich falla por falso contacto por suciedad	Sin observaciones
3.2.1.2 Limit swich quebrado	Sin observaciones				
4	ELECTROIMAN	4.1 Atraer el trinquete hacia la rueda libre venciendo la acción del resorte una vez energizado.	4.1.1 Incapaz de atraer el trinquete hacia la rueda libre	4.1.1.1 Electroimán defectuoso por cable de bobina cortado	Sin observaciones
				4.1.1.2 Bobina sin alimentación de tensión	Sin observaciones
			4.1.2 Incapaz de vencer la acción del resorte	4.1.2.1 Pérdida de aislación de la bobina	Sin observaciones
				4.1.2.2 Alta resistencia eléctrica en cable de la bobina	Sin observaciones
5	ENCODER	5.1 Informar a la platina de puerta la ubicación de las hojas de puerta mediante conteo del n° de vueltas del tornillo de conjugación .	5.1.1 Incapaz de informar a la platina de puertas la posición de las hojas de la puerta, mediante el conteo del número de vueltas del tornillo de conjugación	5.1.1.1 Falso contacto debido a soldadura fría	Sin observaciones
				5.1.1.2 Cable cortado	Sin observaciones
				5.1.1.3 Rueda incapaz de girar por rodamiento gripado	Sin observaciones
				5.1.1.4 Led de laser quemado	Difícil que ocurra

Cada modo de falla debe ser analizado con respecto a los efectos y consecuencias, que puede ocasionar a la seguridad de los pasajeros y a la operación del servicio. De la Tabla 7 a la 11, se muestran los efectos y consecuencias de cada modo de falla.

**Tabla 7. Efectos y Consecuencias de los modos de falla de la Platina de Puerta.**

SUBSISTEMA ELECTRICO			
PIEZA	MODO DE FALLA	EFCOTOS DE LA FALLA	CONSECUENCIAS DE LA FALLA
PLATINA DE PUERTAS	1.1.1.1	Platina queda fuera de servicio, no es posible abrir ni cerrar la puerta por comando. Se produce un retraso en el rodado del material afectando la explotación y la calidad del servicio.	Si la puerta queda abierta se debe intervenir en línea con pasajeros a bordo produciendo un retraso en la explotación, afectando a otros trenes. Si queda cerrada se produce un retraso porque los pasajeros deben utilizar otras puertas para ingresar o salir. Tren debe ser retirado de línea para ser enviado a talleres.
	1.1.1.6	Platina no puede ejecutar el comando de apertura de la puerta del coche. Se produce un retraso en la explotación y una degradación de la calidad de servicio.	Si la puerta no abre los usuarios deben utilizar otras puertas generando un retraso en la explotación, afectando a otros trenes. Tren debe ser retirado de línea para ser enviado a talleres.
	1.1.1.7	Platina no puede ejecutar el comando de apertura de la puerta del coche. Se produce un retraso en la explotación y una degradación de la calidad de servicio.	Si la puerta no abre los usuarios deben utilizar otras puertas generando un retraso en la explotación, afectando a otros trenes. Tren debe ser retirado de línea para ser enviado a talleres.
	1.1.1.8	Platina no puede ejecutar el comando de cierre de la puerta del coche. Se produce un retraso en la explotación y una degradación de la calidad de servicio.	Si la puerta queda abierta se debe intervenir en línea con pasajeros a bordo produciendo un retraso en la explotación, afectando a otros trenes. Si queda cerrada se produce un retraso porque los pasajeros deben utilizar otras puertas. Tren debe ser retirado de línea para ser enviado a talleres.
	1.1.1.9	Platina no puede ejecutar el comando de cierre de la puerta del coche. Se produce un retraso en la explotación y una degradación de la calidad de servicio.	Si la puerta queda abierta se debe intervenir en línea con pasajeros a bordo produciendo un retraso en la explotación, afectando a otros trenes. Si queda cerrada se produce un retraso porque los pasajeros deben utilizar otras puertas. Tren debe ser retirado de línea para ser enviado a talleres.
	1.8.1.1	Imposible saber el estado en que se encuentra la puerta. Como esta ya no esta operativa es recomendable bloquearla manualmente por seguridad. Se produce un retraso en la explotación y una degradación en la calidad del servicio.	El bloqueo de la puerta en línea genera un retraso en la explotación. Además el tren se debe ser retirado de línea para ser enviado a talleres.

**Tabla 8. Efectos y Consecuencias de los modos de falla del Motor de puerta.**

SUBSISTEMA ELECTRICO			
PIEZA	MODO DE FALLA	EFCOTOS DE LA FALLA	CONSECUENCIAS DE LA FALLA
MOTOR DE PUERTAS	2.1.1.1	Motor queda fuera de servicio, no es posible abrir ni cerrar la puerta por comando. Se produce un retraso en el rodado del material afectando la explotación y la calidad del servicio.	Si la puerta queda abierta se debe intervenir en línea con pasajeros a bordo produciendo un retraso en la explotación, afectando a otros trenes. Si queda cerrada se produce un retraso porque los pasajeros deben utilizar otras puertas para ingresar o salir. Tren debe ser retirado de línea para ser enviado a talleres.
	2.1.1.2	Motor queda fuera de servicio, no es posible abrir ni cerrar la puerta por comando. Se produce un retraso en el rodado del material afectando la explotación y la calidad del servicio.	Si la puerta queda abierta se debe intervenir en línea con pasajeros a bordo produciendo un retraso en la explotación, afectando a otros trenes. Si queda cerrada se produce un retraso porque los pasajeros deben utilizar otras puertas para ingresar o salir. Tren debe ser retirado de línea para ser enviado a talleres.
	2.1.2.1	La apertura y cierre de puertas se produce a velocidades más bajas que las normales. Se produce un retraso en la explotación y una degradación en la calidad del servicio.	El retraso se va incrementado con cada cierre y apertura en cada estación provocando un retraso de los otros trenes en línea . Tren debe ser retirado de línea para ser enviado a talleres.
	2.1.2.2	La apertura y cierre de puertas se produce a velocidades más bajas que las normales. Se produce un retraso en la explotación y una degradación en la calidad del servicio.	El retraso se va incrementado con cada cierre y apertura en las estaciones, provocando un retraso de los otros trenes en línea . Tren debe ser retirado de línea para ser enviado a talleres.

**Tabla 9. Efectos y Consecuencias de los modos de falla del Trinquete.**

SUBSISTEMA ELECTRICO			
PIEZA	MODO DE FALLA	EFFECTOS DE LA FALLA	CONSECUENCIAS DE LA FALLA
TRINQUETE	3.1.1.1	Incapaz de mantener el trinquete sobre los dientes de la rueda libre. Puerta no se puede enclavar.	Como la puerta no enclava, no se autoriza la tracción. Se debe evacuar el tren con el consiguiente desmedro en el servicio ofrecido a los pasajeros y el retraso generado en línea. Si sucede mientras el tren se encuentra en la interestación podría ser causante de un accidente mortal con las vías energizadas
	3.1.1.2	Incapaz de mantener el trinquete sobre los dientes de la rueda libre, debido al desgaste de los dientes puerta no se puede enclavar.	Como la puerta no enclava, no se autoriza la tracción. Se debe evacuar el tren con el consiguiente desmedro en el servicio ofrecido a los pasajeros y el retraso generado en línea. Si sucede mientras el tren se encuentra en la interestación podría ser causante de un accidente mortal con las vías energizadas
	3.1.2.1	Incapaz de mantener el trinquete en posición desenclavado mediante la acción del resorte una vez que no actúa el electroiman	Si la puerta abre una vez que ya no actúa el electroiman queda en posición enclavada en apertura. Tren debe ser evacuado con el consiguiente desmedro en el servicio ofrecido a los pasajeros y el retraso generado en línea.
	3.1.2.2	Incapaz de mantener el trinquete en posición desenclavado mediante la acción del resorte una vez que no actúa el electroiman	Si la puerta abre una vez que ya no actúa el electroiman queda en posición enclavada en apertura. Tren debe ser evacuado con el consiguiente desmedro en el servicio ofrecido a los pasajeros y el retraso generado en línea.
	3.2.1.3	Limit swich no envía la señal de puerta enclavada a la platina de puertas. Sistema informático del tren no autoriza la salida	Como se desconoce estado de la puerta, no se autoriza la tracción. Se debe evacuar el tren con el consiguiente desmedro en el servicio ofrecido a los pasajeros y el retraso generado en línea.
	3.2.1.2	Limit swich no envía la señal de puerta enclavada a la platina de puertas. Sistema informático del tren no autoriza la salida	Como se desconoce estado de la puerta, no se autoriza la tracción. Se debe evacuar el tren con el consiguiente desmedro en el servicio ofrecido a los pasajeros y el retraso generado en línea.

**Tabla 10. Efectos y Consecuencias de los modos de falla del Electroimán.**

SUBSISTEMA ELECTRICO			
PIEZA	MODO DE FALLA	EFFECTOS DE LA FALLA	CONSECUENCIAS DE LA FALLA
ELECTROIMAN	4.1.1.1	Incapaz de atraer al trinquete hacia la posición de biestabilidad. No se puede enclavar o desenclavar la puerta	Como la puerta no enclava, no se autoriza la tracción. Se debe evacuar el tren con el consiguiente desmedro en el servicio ofrecido a los pasajeros y el retraso generado en línea. Si la puerta no se desenclava los pasajeros deben utilizar otras puertas para salir del tren produciéndose un retraso que se incrementa en línea
	4.1.1.2	Incapaz de atraer al trinquete hacia la posición de biestabilidad. No se puede enclavar o desenclavar la puerta	Como la puerta no enclava, no se autoriza la tracción. Se debe evacuar el tren con el consiguiente desmedro en el servicio ofrecido a los pasajeros y el retraso generado en línea. Si la puerta no se desenclava los pasajeros deben utilizar otras puertas para salir del tren produciéndose un retraso que se incrementa en línea
	4.1.2.1	Incapaz de vencer la acción del resorte para llevar el trinquete a la posición de biestabilidad y luego sobre o fuera de los dientes de la rueda libre. No se puede enclavar o desenclavar puerta.	Como la puerta no enclava, no se autoriza la tracción. Se debe evacuar el tren con el consiguiente desmedro en el servicio ofrecido a los pasajeros y el retraso generado en línea. Si la puerta no se desenclava los pasajeros deben utilizar otras puertas para salir del tren produciéndose un retraso que se incrementa en línea
	4.1.2.2	A medida que pasa el tiempo de trabajo aumenta la temperatura del solenoide debido a la resistencia. Se puede ver mermado el tiempo de accionamiento del campo magnético.	Puede que se produzca la acción de enclavamiento después que el resto de las puertas. Produce retraso en línea debido al enclavamiento tardío.

**Tabla 11. Efectos y Consecuencias de los modos de falla del Encoder.**

SUBSISTEMA		ELECTRICO	
PIEZA	MODO DE FALLA	EFFECTOS DE LA FALLA	CONSECUENCIAS DE LA FALLA
ENCODER	5.1.1.1	El encoder es incapaz de enviar información a la platina indicando el número de vueltas que ha realizado el tornillo de conjugación. Es imposible saber la posición de la puerta	Puerta abre y cierra a velocidad reducida (> 4.5seg) debido a que se desconoce la posición de las puertas durante la apertura y el cierre. Se produce un retraso de circulación del tren averiado que afecta el servicio ofertado a los usuarios.
	5.1.1.2	El encoder es incapaz de enviar información a la platina indicando el número de vueltas que ha realizado el tornillo de conjugación. Es imposible saber la posición de la puerta	Puerta abre y cierra a velocidad reducida (> 4.5seg) debido a que se desconoce la posición de las puertas durante la apertura y el cierre. Se produce un retraso de circulación del tren averiado que afecta el servicio ofertado a los usuarios.
	5.1.1.3	El encoder es incapaz de enviar información a la platina indicando el número de vueltas que ha realizado el tornillo de conjugación. Es imposible saber la posición de la puerta	Puerta abre y cierra a velocidad reducida (> 4.5seg) debido a que se desconoce la posición de las puertas durante la apertura y el cierre. Se produce un retraso de circulación del tren averiado que afecta el servicio ofertado a los usuarios.

### 6.1.1. Criterios de ponderación del riesgo para los modos de falla de los componentes.

Una vez definidos los efectos y consecuencias de cada modo de falla se está en condición de obtener el modo de falla más crítico. Para realizar este análisis en particular, el grupo de trabajo propone tablas de ponderación, para la cuantificación de la Frecuencia y de las consecuencias de los modos de falla. La Tabla 12 muestra la frecuencia con que se han presentado los modos de falla, durante el periodo en cuestión, otorgando el valor 4 a la categoría de Frecuencia más alta.

**Tabla 12. Cuantificación de Frecuencia de los modos de falla.**

<b>Frecuencia</b>	<b>Fallas</b>	<b>Cuantificación</b>
<b>Alta</b>	<b>De 15 a 20</b>	<b>4</b>
<b>Media</b>	<b>De 10 a 14</b>	<b>3</b>
<b>Baja</b>	<b>De 4 a 9</b>	<b>2</b>
<b>Remota</b>	<b>De 1 a 3</b>	<b>1</b>

Las tablas 13 y 15 muestran la cuantificación con respecto a cada categoría de consecuencia que afecta al servicio, a las personas y a los tiempos de indisponibilidad de los trenes, producto de los modos de falla. El valor 4 es el asignado a la categoría de consecuencia llamada Catastrófica. La Tabla 14, cuantifica los niveles de consecuencia para las personas donde se asigna valores entre 3 y 12, de tal manera de ser concordante con la política de la empresa, la cual tiene como prioridad la seguridad del usuario.

**Tabla 13. Cuantificación de los niveles de consecuencia al servicio.**

<b>Consecuencias</b>	<b>Servicio</b>	<b>Cuantificación</b>
<b>Catastrofica</b>	<b>Tren debe ser evacuado</b>	<b>4</b>
<b>Crítico</b>	<b>Puerta debe ser bloqueada</b>	<b>3</b>
<b>Mínimo</b>	<b>Apertura y cierre lento</b>	<b>2</b>
<b>Insignificante</b>	<b>Servicio normal</b>	<b>1</b>

**Tabla 14. Cuantificación de los niveles de consecuencia a las personas.**

Consecuencias	Personas	Cuantificación
Catastrófica	Victimas mortales	12
Crítico	Posible victima Mortal	9
Mínimo	Heridas menores	6
Insignificante	Posible herida	3

**Tabla 15. Cuantificación de los niveles de consecuencia a los tiempos de indisponibilidad.**

Consecuencias	Tiempos de indisponibilidad	Cuantificación
Catastrófica	De 45 a 60 hrs	4
Crítico	De 30 a 44 hrs	3
Mínimo	De 15 a 29 hrs	2
Insignificante	De 1 a 14 hrs	1

### **6.1.2. Evaluación del riesgo de los modos de fallas seleccionados para cada componente.**

La norma europea UNE-ENE50126 define el riesgo como: “La tasa probable de ocurrencia de un peligro que ocasione daño, y el grado de severidad de dicho daño”.

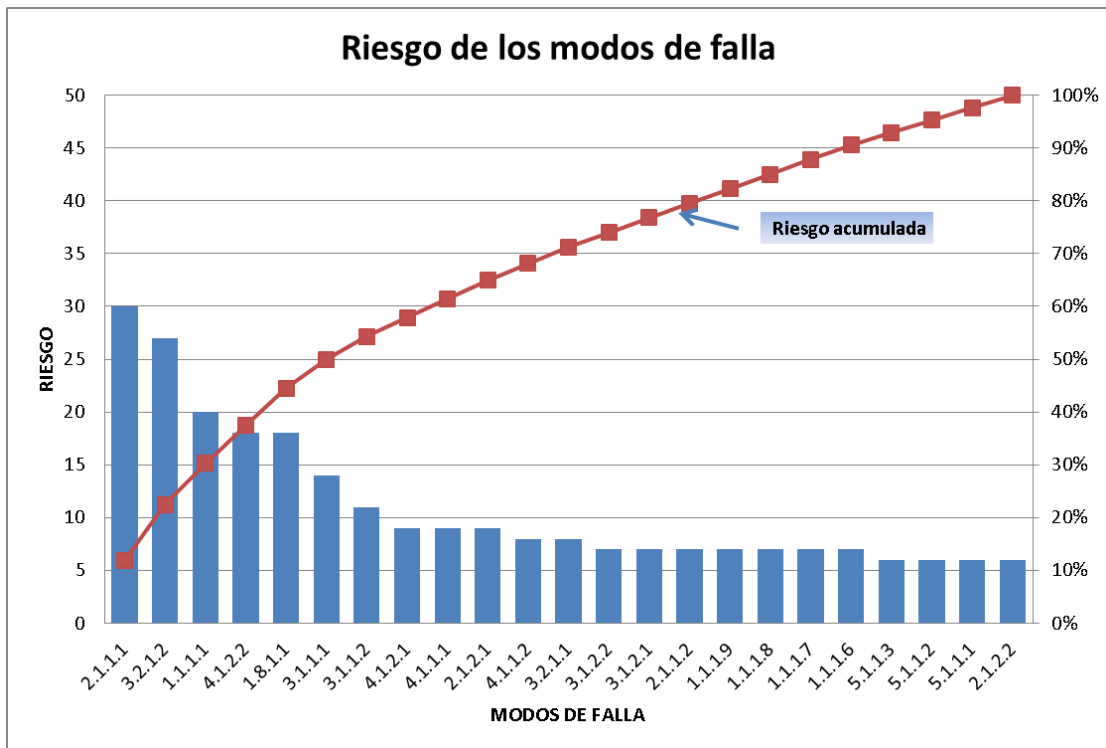
Como se menciona anteriormente, la evaluación del riesgo no es más que la obtención del valor de la criticidad, en este caso, tal como se indicó en el Capítulo 5, el valor de la frecuencia ( $F$ ) se multiplica por el valor de la sumatoria de las consecuencias al servicio de pasajeros, a las personas y a los tiempos de indisponibilidad de los trenes, denominado “C total”. En la Tabla 16 se muestra la cuantificación del riesgo para cada modo de falla por componente.

**Tabla 16. Evaluación del riesgo de los modos de falla de componente del sistema de puertas.**

MODO DE FALLA	F	CONCECUENCIAS ( C )			Riesgo	
		Personas	T. No disp.	Servicio	F x C total	
1.1.1.1	Microcontrolador de platina deja de funcionar por sobreintensidad o calentamiento	2	3	4	3	20
1.1.1.6	Bonina de réle de apertura ( RO) sin trabajo	1	3	1	3	7
1.1.1.7	Alta resistencia eléctrica de contactos de RO	1	3	1	3	7
1.1.1.8	Bobina de relé de cierre (RF) sin trabajo	1	3	1	3	7
1.1.1.9	Alta resistencia eléctrica de contactos de RF	1	3	1	3	7
1.8.1.1	Microcontrolador de platina fuera de servicio por sobreinten/calent. impide saber estado de la puerta	2	3	3	3	18
2.1.1.1	Pérdida aislación rotor/estator por solenoide cortado	3	3	4	3	30
2.1.1.2	Pérdida aislación por carbones desgastados (polvo)	1	3	1	3	7
2.1.2.1	Pérdida aislación rotor/estator por solenoide cortado	1	3	4	2	9
2.1.2.2	Resistencia al giro por rodamientos desgastados	1	3	1	2	6
3.1.1.1	Brazo pivote trinquete, suelto o fracturado por fatiga de material	1	9	1	4	14
3.1.1.2	Diente de rueda libre desgastado por rozamiento	1	6	1	4	11
3.1.2.1	Resorte cortado por fatiga de material	1	3	1	3	7
3.1.2.2	Resorte sin fuerza por perdida de propiedad elástica	1	3	1	3	7
3.2.1.1	Limit swich falla por falso contacto por suciedad	1	3	1	4	8
3.2.1.2	Limit swich quebrado	3	3	2	4	27
4.1.1.1	Electroimán defectuoso por cable de bobina cortado	1	3	2	4	9
4.1.1.2	Bobina sin alimentación de tensión	1	3	1	4	8
4.1.2.1	Pérdida de asilación de la bobina	1	3	2	4	9
4.1.2.2	Alta resistencia eléctrica en el cable de la bobina	2	3	2	4	18
5.1.1.1	Falso contacto debido a soldadura fría	1	3	1	2	6
5.1.1.2	Cable cortado	1	3	1	2	6
5.1.1.3	Rueda incapaz de girar por rodamiento gripado	1	3	1	2	6

Una vez obtenidos los valores de riesgo para cada modo de falla se puede distinguir aquellos que representan un mayor impacto para la confiabilidad del sistema de puertas del tren NS93.

El Gráfico 6 muestra el nivel de riesgo de los modos de falla, ordenados de izquierda a derecha en forma decreciente. Además, mediante la curva se muestra el riesgo acumulado de los modos de falla.



**Gráfico 6. Valor de riesgo por cada modo de falla del sistema de puerta del tren NS93.**

De acuerdo a lo que se aprecia en el Gráfico 6 el grupo de trabajo ha decidido considerar los siete primeros modos de falla (2.1.1.1, 3.2.1.2, 1.1.1.1, 4.1.2.2, 1.8.1.1, 3.1.1.1 y 3.1.1.2) que alcanzan un riesgo acumulado cercano al 55%, como críticos. Por lo tanto, los dos primeros modos de falla 2.1.1.1 y 3.2.1.2 se asumen como de riesgo alto, mientras que los cinco restantes de riesgo moderado.

La Tabla 17 muestra los modos de falla ordenados de acuerdo a su nivel de riesgo.

**Tabla 17 . Clasificación de los modos de falla críticos con respecto a su nivel de riesgo.**

	Modos de Falla		Riesgo
Riesgo Alto	2.1.1.1	Pérdida aislación rotor/estator por solenoide cortado	30
	3.2.1.2	Limit swich quebrado	27
Riesgo Moderado	1.1.1.1	Microcontrolador de platina deja de funcionar por sobreintensidad o calentamiento	20
	4.1.2.2	Alta resistencia eléctrica en el cable de la bobina	18
	1.8.1.1	Microcontrolador de platina fuera de servicio por sobreinten/calent. impide saber estado de la puerta	18
	3.1.1.1	Brazo pivote trinquete, suelto o fracturado por fatiga de material	14
	3.1.1.2	Diente de rueda libre desgastado por rozamiento	11

Estos modos de falla serán objeto del análisis de la lógica RCM en el próximo capítulo para obtener las acciones de mantenimiento necesarias para mejorar la confiabilidad del sistema de puerta del tren.

## 7. Aplicación de la lógica de decisión RCM a los modos de falla seleccionados.

El siguiente capítulo trata cada modo de falla clasificado de alto y mediano riesgo de acuerdo a la lógica de decisión RCM, determinando la forma de manejar cada modo de falla analizado. Para establecer la tarea más adecuada a cada modo de falla, se ha utilizado el algoritmo de decisión dispuesto en la norma SAE JA1012.

La Figura 23 muestra, como ejemplo de aplicación, el algoritmo de decisión utilizado para el modo de falla 2.1.1.1, en el cual se llega a una tarea programada de restauración o desincorporación.

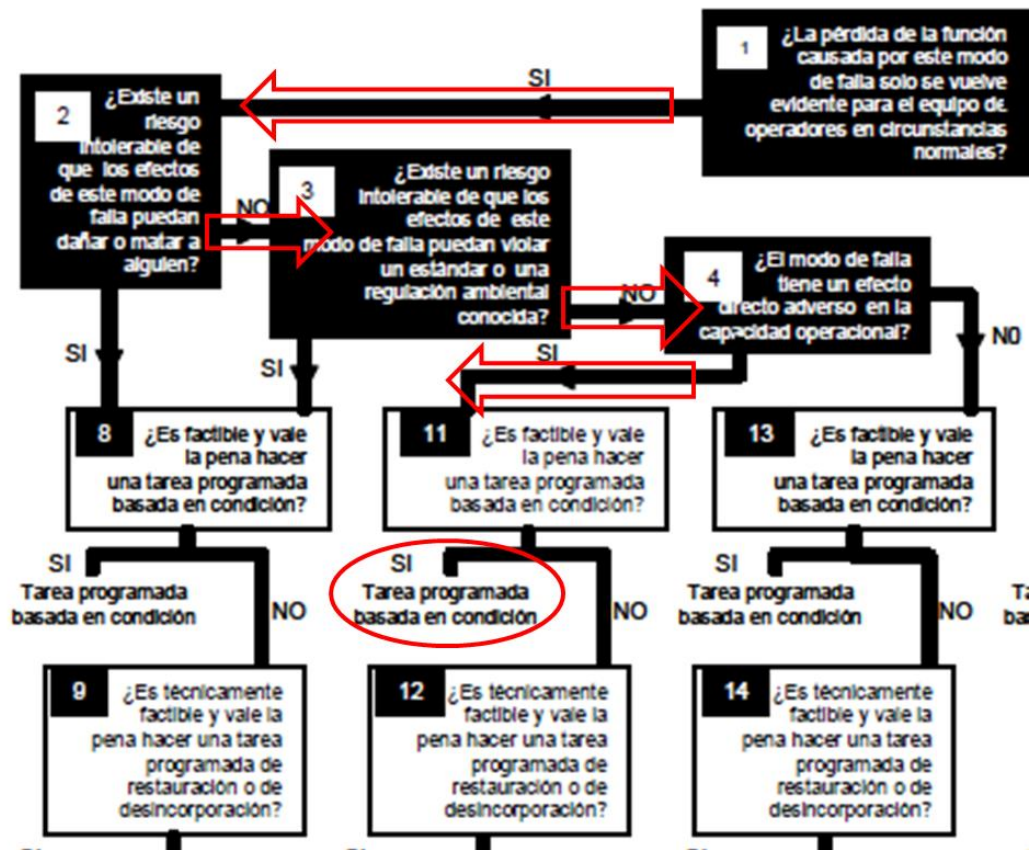


Figura 23. Análisis del modo de falla 2.1.1.1 de acuerdo a la lógica RCM

Así como en el ejemplo del modo de falla 2.1.1.1 se han analizado también el resto de los modos de falla de acuerdo con el algoritmo de lógica RCM. La tarea de

mitigación en particular es la que se muestra en el próximo capítulo y que al ser incorporadas configuran una modificación al plan de mantenimiento actualmente aplicado.

El rediseño del trinquete, será encargado al proveedor de componentes mecánicos y electrónicos FAIVELEY de acuerdo a las condiciones dispuestas por el Departamento de Mantenimiento. La Tabla 18 muestra los modos de falla indicando su valor de riesgo y la tarea programada de acuerdo a la aplicación de la lógica RCM.

**Tabla 18. Tareas de mitigación de los modos de falla críticos de acuerdo a la lógica RCM.**

MODO DE FALLA		Riesgo	Tipo de acción de mantenimiento para mitigación del riesgo
2.1.1.1	Pérdida aislación rotor/estator por solenoide cortado	30	Tarea programada basada en condición
3.2.1.2	Limit swich quebrado	27	Podria ser deseable un rediseño
1.1.1.1	Microcontrolador de platina deja de funcionar por sobreintensidad o calentamiento	20	Tarea programada basada en condición
4.1.2.2	Alta resistencia eléctrica en el cable de la bobina	18	Tarea programada basada en condición
1.8.1.1	Microcontrolador de platina fuera de servicio por sobreinten/calent. impide saber estado de la puerta	18	Tarea programada basada en condición
3.1.1.1	Brazo pivote trinquete, suelto o fracturado por fatiga de material	14	Rediseño obligatorio
3.1.1.2	Diente de rueda libre desgastado por rozamiento	11	Tarea programada de desincorporación

## **8. Propuesta de modificación del plan de mantenimiento.**

En el siguiente capítulo se desarrollan acciones de mitigación para los modos de falla de alto y mediano riesgo de la Platina de Puertas y el Conjunto Motor. En cada ítem se indica el encargado de la acción de mantenimiento y la periodicidad, si así procede.

Lo primero es realizar una descripción del plan de mantenimiento preventivo que se aplica actualmente al sistema de puertas del tren NS93.

### **8.1. Descripción del Plan de mantenimiento preventivo actual que se aplica al sistema de puertas del tren NS93**

El plan de mantenimiento preventivo actual que se aplica al sistema de puertas de pasajeros del tren NS93, corresponde al mantenimiento preventivo genérico indicado por el fabricante ALSTON, el cual se muestra en el Anexo B. De acuerdo a éste, las periodicidades de intervención se dividen en 4 visitas técnicas, repartidas de acuerdo al siguiente orden cronológico:

#### **Mantenimiento preventivo de primer nivel**

Con la indicación **Is**, a los 9.500 km. Este contempla:

1. Comprobación General.
2. Comprobación de desgaste o de vida útil de algunos elementos.
3. Cambio de elementos de desgaste.
4. Lubricación.

Con la indicación **Ib**, a los 19.000 km. Este contempla:

1. Comprobación General.
2. Comprobación de desgaste o de vida útil de algunos elementos.

3. Cambio de elementos de desgaste.
4. Lubricación.

Con la indicación **Im**, a los 30.000 km. Este contempla:

1. Comprobación General.
2. Comprobación de desgaste o de vida útil de algunos elementos.
3. Cambio de elementos de desgaste.
4. Lubricación.
5. Cambio de órganos que han alcanzado el número de km previsto para las operaciones de mantenimiento preventivo de segundo nivel.

### **Mantenimiento preventivo de segundo nivel**

Con la indicación **R**, a los 500.000 km. Este contempla:

1. Comprobación General.
2. Comprobación de desgaste o de vida útil de algunos elementos.
3. Cambio de elementos de desgaste.
4. Lubricación.
5. Revisión general de segundo nivel.

El mantenimiento preventivo de primer y segundo nivel a la rueda libre y al conjunto motor son los que se muestran en las Figuras 24 y 25.

Como se aprecia en la Figura 24, la rueda libre tiene un mantenimiento preventivo intermedio de primer nivel, a los 120.000 kms de acuerdo a la indicación en la columna Im con x4 (**Im** multiplicada por cuatro) y un mantenimiento preventivo de segundo nivel a los 500.000 km de acuerdo a la indicación de la columna R con x.

Denominación	Descripción	Is	lb	Im	R	Dirección
Cableado	Controlar el bloqueo correcto de todos los conectores eléctricos			x3	X	NS
Dispositivo de cerradura a rueda libre	Lubricación de la rueda libre			x4	X	1.1.5

**Figura 24. Plan de mantenimiento preventivo de la rueda libre.(Fuente: Manual de mantenimiento de trenes NS93, Alstom)**

La Figura 25 muestra el mantenimiento preventivo de segundo nivel correspondiente al cambio y revisión de la motorización. Esta se realiza a los 1.500.000 km, y se muestra con la indicción en la columna R de x3.

Denominación	Descripción	Is	lb	Im	R	Dirección
Mecanismo	Control de los elementos de sujeción			x4	X	1.2.2
	Control de los topes de apertura			x3	X	1.2.2
	Limpieza del riel de guiado inferior			X	X	1.2.2
	Cambio de los topes				x3	Parte 4
	Cambio y revisión de la suspensión				x3	RDC
	Cambio y revisión de la motorización para reparación				x3	RDC
	Cambio y revisión del tornillo de conjugación				x3	RDC
	Cambio y revisión del cojinete opuesto al motor				x3	RDC
	Cambio y revisión de los brazos equipados				x3	RDC

**Figura 25. Plan de mantenimiento preventivo del sistema de puertas.(Fuente: Manual de mantenimiento de tren NS93, Alstom)**

## 8.2. Acciones de mantenimiento propuestas para los modos de falla seleccionados

Se ha decidido proponer las siguientes acciones de mantenimiento para mitigar los modos de falla mostrados en la Tabla 18. Estas acciones se integran complementando el plan de mantenimiento actual, exceptuando las acciones de rediseño que se realizan sólo una vez.

Las tareas de mitigación para el riesgo se muestran a continuación en la Tabla 19.

**Tabla 19. Acciones de mitigación para los modos de falla críticos del sistema de puerta del tren NS93.**

MODO DE FALLA		Riesgo	Tipo de acción de mantenimiento para mitigación del riesgo	Encargado	Tipo de acción de mantenimiento para mitigación del riesgo
2.1.1.1	Perdida aislación rotor/estator por solenoide cortado	30	Tarea programada basada en condición	Mantenimiento Menor	a) Variable a monitorear: aislación eléctrica b) Medir aislación eléctrica al Motor de puerta en funcionamiento c) Determinar valor máximo de aislación permitido d) Generar plan de recambio del componente e) Periodicidad: Por definir
3.2.1.2	Limit swich quebrado	27	Podría ser deseable un rediseño	Mantenimiento Mayor	a) Se encarga el diseño del nuevo Limit Switch a la empresa FAIVELEY
1.1.1.1	Microcontrolador de platina deja de funcionar por sobretensión o calentamiento	20	Tarea programada basada en condición	Mantenimiento Menor	a) Variable a monitorear: Voltaje eléctrico b) Medir voltaje eléctrico de la Platina de puerta en funcionamiento c) Determinar valor máximo de voltaje permitido d) Generar plan de recambio del componente e) Periodicidad: Por definir
4.1.2.2	Alta resistencia eléctrica en el cable de la bobina	18	Tarea programada basada en condición	Mantenimiento Menor	a) Variable a monitorear: aislación eléctrica b) Medir aislación eléctrica de la bobina del Electroimán en funcionamiento c) Determinar valor máximo de aislación permitido d) Generar plan de recambio del componente e) Periodicidad: Por definir
1.8.1.1	Microcontrolador de platina fuera de servicio por sobretensión/calent. impide saber estado de la puerta	18	Tarea programada basada en condición	Mantenimiento Menor	a) Variable a monitorear: Voltaje eléctrico b) Medir voltaje eléctrico de la Platina de puerta en funcionamiento c) Determinar valor máximo de voltaje permitido d) Generar plan de recambio del componente e) Periodicidad: Por definir
3.1.1.1	Brazo pivote trinquete, suelto o fracturado por rozamiento	14	Rediseño obligatorio	Mantenimiento Mayor	a) Se encarga el diseño del nuevo trinquete a la empresa FAIVELEY
3.1.1.2	Diente de rueda libre desgastado por rozamiento	11	Tarea programada de desincorporación	Mantenimiento Mayor	a) Determinar estado y funcionamiento de la Rueda libre b) Generar plan de recambio del componente c) Periodicidad: cada 1.500.000 km (R2)

Como se puede apreciar las acciones de mitigación generadas de la lógica RCM comprenden cuatro tareas programadas basadas en condición, una tarea de desincorporación programada y dos tareas de rediseño.

Para el caso de los modos de falla 2.1.1.1, 1.1.1.1, 4.1.2.2 y 1.8.1.1 correspondientes a los siguientes componentes: Motor de Puerta, Platina de Puerta y Electroimán, se ha decidido realizar una tarea programada basada en condición, cuya periodicidad se debe definir. Para definir esta periodicidad se deben realizar mediciones de aislación para el caso del Motor de Puerta y el Electroimán y mediciones del voltaje consumido para el caso de la Platina de Puerta, durante el mantenimiento de primer nivel cada 9.500 km. Los valores obtenidos de las mediciones, permitirán establecer un valor máximo permitido de funcionamiento, para la variable, antes de que se presente la falla funcional y el componente deba ser reemplazado.

Para el caso del modo de falla 3.2.1.2, correspondientes al componente Limit Swich, se ha propuesto realizar una tarea de rediseño. Esta tarea se ha encargado a la empresa FAIVELEY.

Para el caso del modo de falla 3.1.1.1, correspondiente al componente Trinquete, la tarea de rediseño se ha encargado a la empresa FAIVELEY.

Para el caso del modo de falla 3.1.1.2, correspondiente al componente Rueda Libre, se ha propuesto realizar una tarea programada de desincorporación propuesto cada 1.500.000 km aproximadamente. Esta tarea consiste en el cambio del componente durante el mantenimiento mayor o gran revisión.

Cabe mencionar que la última mantención preventiva de segundo nivel se realizó al 98,5 % del parque de motores de puertas del tren NS 93 y fue el año 2011.

La decisión de proponer realizar las acciones de mitigación para las Tareas basadas en condición a los 9.500 km obedece a aprovechar mejor la periodicidad del mantenimiento de primer nivel que se realiza actualmente.

Las lecturas de aislación y tensión se pueden obtener in situ conectando el instrumento a los conectores J del Conjunto Motor y Platina de puerta.

Las acciones de mitigación que se muestran en la Tabla 19 permitirán establecer, en un futuro cercano, la periodicidad de un nuevo plan de mantenimiento predictivo para los modos de falla en cuestión.

## **9. Evaluación económica del plan de mantenimiento propuesto y comparación con el plan existente.**

En el presente capítulo se evalúa el costo de implementación de las acciones de mitigación para los modos de fallas que se muestran en la Tabla 19. Estas acciones permitirán definir los intervalos de periodicidad de las tareas basadas en condición. Los valores de los costos del mantenimiento que se indican en la presente memoria son aproximados, pues la organización se reserva el derecho a entregar información de este tipo con fines de uso público.

Para todos los casos, la cantidad total de puertas, considerando todo el parque de trenes NS93 pertenecientes a Línea 5, es de un total de 756 unidades.

La evaluación económica consiste en la comparación de los costos asociados al mantenimiento preventivo de primer nivel que se aplica actualmente a los 9.500 km versus el costo resultante de integrar las acciones de mantenimiento para la mitigación del riesgo.

Los siguientes modos de falla son considerados en esta evaluación:

- 2.1.1.1 Pérdida de aislación rotor/estator por solenoide cortado
- 1.1.1.1 Microcontrolador de Platina deja de funcionar por sobreintensidad o calentamiento.
- 4.1.2.2 Alta resistencia eléctrica en el cable de la bobina
- 1.8.1.1 Microcontrolador de Platina queda fuera de servicio por sobreintensidad o calentamiento impide saber el estado de la puerta.

A continuación, se muestra la Tabla 20 donde aparece el costo de mano de obra al realizar el mantenimiento preventivo de primer nivel, con una periodicidad de 9.500 km, al parque total de trenes, es decir 756 puertas. Este mantenimiento no considera insumos, porque es sólo de inspección de funcionamiento. Se estima que se tarda un año aproximadamente en realizar este mantenimiento preventivo al parque total.

**Tabla 20. Costos del mantenimiento preventivo de primer nivel.**

<b>MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE PRIMER NIVEL A LOS 9.500 km</b>		<b>CANTIDAD</b>
Costo de mano de obra por unidad	[\$/u]	3.039
Total unidades del parque	[u]	756
<b>Costo total mantenimiento preventivo del parque anual</b>	<b>[\$]</b>	<b>2.297.484</b>

La Tabla 21 muestra el costo total anual al realizar el mantenimiento preventivo al parque total de trenes de Línea 5 incorporando la acción de mitigación. Esta acción considera incluir un técnico más para que realice las mediciones de aislación al Conjunto Motor de Puertas y las mediciones de tensión o voltaje a las Platinas de Puerta.

**Tabla 21. Costos del mantenimiento preventivo de primer nivel incluyendo la acción de mitigación.**

<b>MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE PRIMER NIVEL A LOS 9.500 km MÁS ACCIÓN DE MITIGACIÓN</b>		<b>CANTIDAD</b>
Costo de mano de obra por unidad	[\$/u]	3.039
Costo mano de obra en nuevas tareas basadas en condición	[\$/u]	1.422
Total unidades del parque	[u]	756
<b>Costo total mantenimiento preventivo del parque</b>	<b>[\$]</b>	<b>3.372.138</b>

Al comparar los costos totales anuales del mantenimiento preventivo de primer nivel a los 9.500 km que se realiza actualmente versus la incorporación de las acciones de mitigación se aprecia una diferencia de \$1.074.654.

El modo de falla 3.1.1.2 Diente de rueda libre desgastado por rozamiento no fue considerado en la evaluación de costos pues la acción de mitigación del riesgo resultó ser la que actualmente se aplica en el mantenimiento preventivo de segundo nivel al 1.500.000 de km.

Los modos de falla 3.2.1.2 Limit Swich quebrado y 3.1.1.1 Brazo pivote trinquete suelto o fracturado por rozamiento no fueron considerados en la evaluación de costos pues la acción de mitigación resulta en un rediseño del componente y no en un mantenimiento preventivo.

Luego se puede decir que el costo de realizar las acciones de mitigación para los modos de falla 2.1.1.1, 1.1.1.1, 4.1.2.2 y 1.8.1.1, es bajo si se considera que estas permitirán implementar las tareas basadas en condición mejorando la confiabilidad del sistema de puertas del tren NS93. Por ejemplo, con respecto a los datos que se muestran en la Tabla 1, al minimizar los efectos de los modos de falla mencionados, se puede esperar reducir el número de fallas en un 82% y los tiempos de indisponibilidad en un 74%.

## CONCLUSIONES

El mantenimiento predictivo es una herramienta potente para mejorar cualquier plan de mantenimiento, ya que la implementación de las tareas basadas en condición permite ajustar mejor la periodicidad de las visitas técnicas, generando una respuesta de mantenimiento más adecuada al contexto operacional actual de Metro S.A.

Con respecto al objetivo de evaluar económicamente el plan de mantenimiento propuesto y compararlo con el existente, este se cumplió parcialmente. La explicación es que no se cuenta con la información con respecto al costo total del plan de mantenimiento que se realiza actualmente. Sin embargo, se estableció una diferencia cuantitativa con respecto al costo de la visita técnica que se realiza a los 9.500 km, donde se incorporan las tareas basadas en condición.

El análisis de los componentes del sistema de puertas del tren NS 93 de Metro de Santiago, utilizando herramientas como la jerarquización de acuerdo a índices de criticidad y la metodología del mantenimiento centrado en la confiabilidad permite determinar los componentes de mayor relevancia con respecto a la confiabilidad y seguridad del transporte de pasajeros, de acuerdo a parámetros establecidos por la propia organización, permitiéndonos agregar valor a nuestras tareas de mantenimiento y mejorar el servicio de transporte que se presta a la comunidad.

Durante el transcurso de esta memoria se contó con el apoyo y ayuda, entre otros, del personal técnico de material rodante de Talleres San Eugenio y del laboratorio de platinas de puertas de Talleres Neptuno, quienes aportaron con archivos de información, conocimiento técnico y experiencia, sin embargo no se formó un equipo dedicado de trabajo, con el cual se habría hecho más expedita la interpretación de la información y por consiguiente el desarrollo de la metodología RCM, aportando al trabajo en equipo de las diferentes áreas (mantenimiento y operaciones) y enriqueciendo el desarrollo de conocimiento interno de la organización.

De los siete modos de falla seleccionados y analizados bajo la lógica RCM cuatro resultaron en tareas basadas en condición (un 57%), como parte de las acciones de mantenimiento preventivo que minimicen el número de fallas y los tiempos de indisponibilidad durante la operación. Esto permitirá a futuro la implementación de un plan de mantenimiento preventivo que se ajuste mejor a las condiciones operacionales del sistema de puertas del tren NS93 en Metro de Santiago S.A.

La lógica RCM da como resultado, para eliminar el modo de falla 3.1.1.1, una tarea de rediseño del Trinquete, esto se justifica debido a que este componente es una pieza fundamental para evitar que las puertas se abran cuando el tren se encuentra en movimiento.

El análisis revela modos de falla críticos para la seguridad de las personas, correspondientes a los modos de falla 3.1.1.1 y 3.1.1.2 del Trinquete y Rueda Libre respectivamente, que a pesar de tener un nivel de riesgo moderado, ponderan los valores más altos de nivel de consecuencia para los usuarios, por lo que la implementación de las medidas de mitigación es de carácter urgente. Cuando la seguridad de los usuarios o pasajeros de Metro S.A. está en riesgo, no se pueden escatimar esfuerzos de cualquier tipo.

El desarrollo de la herramienta RCM al sistema de puertas del tren NS93, permite proponer una modificación al plan de mantenimiento actual, el que viene incorporado en el manual del fabricante ALSTOM de los trenes NS93 que comenzaron a circular a partir del año 1996, en la red Metro de Santiago. Esta propuesta se adecua más a las condiciones operacionales actuales, sobre todo tomando en cuenta el aumento de carga de pasajero por metro cuadrado durante las horas punta.

El desarrollo de esta memoria debe ser considerado como un plan piloto del RCM dentro de la empresa Metro S.A. donde la recomendación fundamental es que se deben generar políticas que permitan el desarrollo y fomento del RCM en el interior de la organización, que se permitan instancias de colaboración dentro de las distintas

áreas, que se impulse su implementación y el seguimiento del comportamiento de las nuevas tareas propuestas.

El conocimiento que se obtiene de esta memoria con respecto al mantenimiento centrado en la confiabilidad permite, al Departamento de Mantenimiento de Material Rodante, contar con nuevas herramientas de planificación, gestión y control del mantenimiento que se aplica a los trenes en la red de Metro S.A.

La utilización y aplicación de la metodología RCM al sistema de puertas del tren NS93, permite a futuro utilizarla en otros sistemas de la red Metro, de esta forma lograr tener un mantenimiento con mejores índices de confiabilidad en la operación de los trenes.

## REFERENCIAS

- SAE JA1012, N. S. (2002). Una Guía para la Norma del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC). Prácticas recomendadas Para Vehículos Aeroespaciales y de Superficie. ISO estándar: Ginebra, Suiza.
- UNE-EN 50126 (2005). Aplicaciones ferroviarias. Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad (RAMS). Madrid, España.
- [http://s.i.meca.free.fr/pdf/analyse\\_fonctionnelle.pdf](http://s.i.meca.free.fr/pdf/analyse_fonctionnelle.pdf)
- Tassinari, R. (1992). Pratique de l'analyse fonctionnelle. Dunod.
- Moubray, J. (2004). RCM Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Edición en español. Asheville, North Carolina, USA: Aladon LLC.
- Alstom (2003). Material rodante NS93 Metro de Santiago de Chile. Manual de mantenimiento del tren.(6 edición)
- Amendola, L. J. (2006). Gestión de proyectos de activos industriales. Editorial de la UPV.
- Rivera Guzmán E. J. (2014). Diseño de un plan de mantenimiento, centrado en confiabilidad (RCM), para sistemas principales de cargador frontal WA1200-3 KOMATSU.(memoria de licenciatura inédita). Universidad Técnica Federico Santa María. Santiago de Chile.

- FUNDIBEQ (2015). Diagrama de Pareto. Recuperado de <http://www.fundibeq.org>
- SOTUYO, S. (2006). Los 10 Mandamientos del RCM2-Claves para el éxito de un Proyecto de Implementación RCM. Ed: Ellmann, Sueiro y Asociados.
- Ellmann, Sueiro y Asociados (2015). Costo-beneficio de la implementación de RCM2, mantenimiento centrado en la confiabilidad. Recuperado de [http://ellmann.net/archivos/articulos/7/Costo\\_Beneficio\\_de\\_la\\_implementacion\\_del\\_RCM2.pdf](http://ellmann.net/archivos/articulos/7/Costo_Beneficio_de_la_implementacion_del_RCM2.pdf)



**Anexo B: Plan de mantenimiento de puertas de tren NS93 de acuerdo a manual de mantenimiento del tren NS 93 del fabricante Alstom.**

**PUERTAS DE ACCESO PASAJEROS**

Denominación	Descripción	Is	Ib	Im	R	Dirección
Empuñadura de alarma K.SA	Control de funcionamiento	X	X	X	X	PCS 3.1.5
	Cambio y revisión del cajón				x3	RDC
Indicador de anuncio de cierre de puerta	Control de funcionamiento	X	X	X	X	PCS 3.1.2
Mecanismo	Lubricación del tornillo de conjugación			x4	X	1.1.4
	Lubricación de la suspensión			x4	X	1.1.3
	Control del estado y de la presencia de los topes de seguridad de los acoplamientos			x4	X	1.2.2
	Control de la ausencia de holgura angular entre las bridas de acoplamiento y su árbol correspondiente			x4	X	1.2.2

Denominación	Descripción	Is	Ib	Im	R	Dirección
Mecanismo	Control de los elementos de sujeción			x4	X	1.2.2
	Control de los topes de apertura			x3	X	1.2.2
	Limpieza del riel de guiado inferior			X	X	1.2.2
	Cambio de los topes				x3	Parte 4
	Cambio y revisión de la suspensión				x3	RDC
	Cambio y revisión de la motorización para reparación				x3	RDC
	Cambio y revisión del tornillo de conjugación				x3	RDC
	Cambio y revisión del cojinete opuesto al motor				x3	RDC
	Cambio y revisión de los brazos equipados				x3	RDC
Codificador óptico	Cambio del codificador				x3	Parte 4
Hojas	Control del estado de los cristales, de las juntas delantera	X	X	X	X	1.2.2
	Control de los llaves de junta y juntas perifericas y limpieza			X	X	1.2.2
	Control del desgaste de las zapatas del riel de guiado inferior			X	X	1.2.2
	Control del esfuerzo manual	X	X	X	X	2.1.4
	Cambio y revisión				x3	RDC
Organos de comando del pupitre	Control de la parada de la señal acústica			X	X	2.1.1
	Control del desbloqueo de las puertas			X	X	2.1.2
	Control de las secuencias de apertura y cierre de las puertas			X	X	PCS 3.1.1
Dispositivo de detección de obstáculos FCF	Control del estado general			x4	X	PCS 3.1.3
	Control de funcionamiento			x4	X	PCS 3.1.4
	Cambio del dispositivo FCF para reparación				x3	RDC

Denominación	Descripción	Is	lb	Im	R	Dirección
Cableado	Controlar el bloqueo correcto de todos los conectores eléctricos			x3	X	NS
Dispositivo de cerradura a rueda libre	Lubricación de la rueda libre			x4	X	1.1.5

#### 1.1.5. Lubricación de la rueda libre

Figura 9.2.2.a

- Abrir las dovelas exteriores.
- Limpiar la rueda libre con alcohol desnaturalizado o con un paño seco.
- Aplicar 5 cm<sup>3</sup> de grasa.
- Manipular las puertas para repartir la grasa.
- Retirar la grasa excedente.

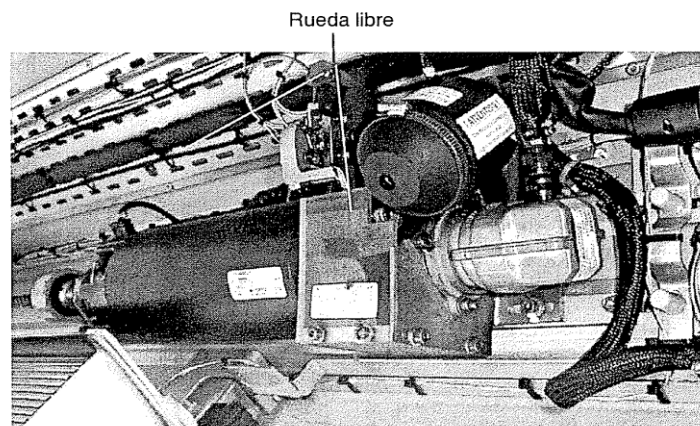
#### LUBRICANTE UTILIZADO:

Grasa KLUBER Isoflex LDS18 special

**Nota :** Cantidad de grasa 5 cm<sup>3</sup>

#### PERIODICIDAD:

120 000 km o 1 vez/año



**Lubricación de la rueda libre**