



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Mantenimiento de equipos de tracción eléctrica de aplicación ferroviaria

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Roberto Ilmardel Magaña Hernández

ASESOR DE INFORME

M.A. Víctor Manuel Vázquez Huarota



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Tabla de contenido

I. AGRADECIMIENTOS	3
1. OBJETIVO.....	4
2. INTRODUCCIÓN	4
3. PROYECTO Y MEDIO LABORAL	5
4. GENERALIDADES DEL MATERIAL RODANTE (TRENES) DE LA RED DEL STC METRO.....	7
5. DESARROLLO DE ACTIVIDADES	9
5.1 ESTADO INICIAL DE LA ETAPA DE MANTENIMIENTO	16
5.2 ACCIONES PARA REALIZAR.....	17
5.3 ADMINISTRACIÓN DE CAMPO PARA MEJORAR EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO	17
6. CASOS PRÁCTICOS	26
6.1 RESULTADOS	26
6.2 CASO PRÁCTICO #1.....	28
6.3 CASO PRÁCTICO #2.....	29
7. CONCLUSIONES.....	30
8. REFERENCIAS	31
9. ANEXOS	32
9.1 ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ EN MANTENIMIENTOS CORRECTIVOS	32
9.2 ANÁLISIS WEIBULL Y CURVA DE FIABILIDAD	32
9.3 CASOS PRÁCTICOS DE ANÁLISIS CAUSA RAÍZ	35

I. Agradecimientos

A mis padres gracias por todo el amor, apoyo y comprensión vertidos a lo largo de toda mi vida, gracias por siempre estar ahí en los momentos buenos y malos, guiándome con su gran ejemplo, inspirándome a ser mejor cada día.

A mi esposa Abigail, gracias por ser el motor de mi vida, fomentar mi fortaleza día con día y por tenerme el amor necesario para pasar una vida a tu lado.

A mi asesor y sinodales gracias por todo el tiempo empleado en mejorar y apoyar la elaboración de este trabajo, gracias por todas las enseñanzas, ideas y conocimientos compartidos, sin lugar a duda son una gran fuente de difusión del conocimiento.

A todos ellos gracias de todo corazón.

1. Objetivo

Garantizar la correcta ejecución de los procedimientos de mantenimiento preventivo en tiempo y forma, maximizando el tiempo de explotación de los trenes y minimizando el tiempo y número de paros.

2. Introducción

Alstom es una compañía francesa que diseña, provee y presta servicios de sistemas ferroviarios como vagones, señalización, equipos de automatización de operación ferroviaria, y anteriormente generación, transmisión y distribución eléctrica. Dicha organización está presente en 60 países con 36,500 empleados, generando pedidos por 60 mil millones de euros anuales y ganancia de 7.5 mil millones en el mismo plazo. Es importante mencionar que mi trabajo se basará en los trenes del metro de la Ciudad de México pertenecientes al Sistema de Transporte Colectivo (STC), como se muestra en la figura 1.

“El STC es un Organismo Público Descentralizado, cuyo objeto es la operación y explotación de un tren rápido, movido por energía eléctrica, con recorrido subterráneo, superficial para dar movilidad principalmente a usuarios de la Ciudad de México y la zona Metropolitana del Valle de México” (STC,2014).

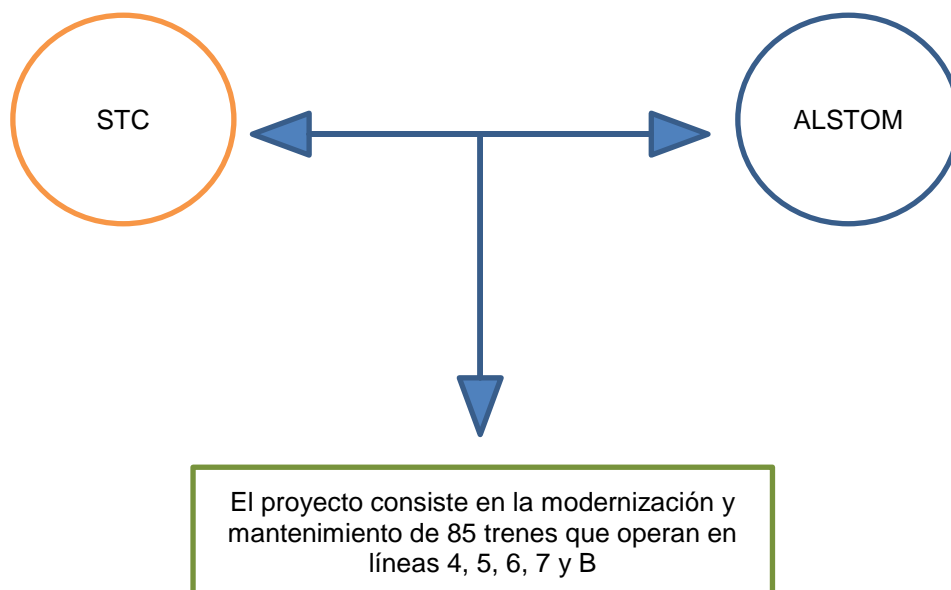


Figura 1 Proyecto conjunto STC-ALSTOM

“El STC tiene un parque vehicular de 390 trenes, de los cuales 292 de rodadura neumática que constan de 9 carros y 29 de 6 carros, de rodadura férrea, 12 están conformados de 9 carros, 27 de 6 y 30 de 7 carros.” (STC, 2019). Los cuales brindan servicio los 365 días del año a una red de 226.488 Km que transportan a 5 millones de usuarios diariamente, recorriendo anualmente un total de 42,620,362 [Km].

De dicho parque vehicular “se distinguen dos tipos de tecnología en su fabricación: el 26% cuenta con sistema de tracción-frenado del tipo electromecánico JH (árbol de levas). El resto cuenta con un sistema de tracción-frenado con semiconductores y control electrónico.” (STC, 2019)

Por lo anterior surge la necesidad homogeneizar y modernizar el control de los trenes a cargo del STC, por lo que a fin de combatir la obsolescencia tecnológica en los trenes que cuentan con tecnología JH, el STC lanzó la licitación pública nacional 30102015-009-14, “Sustitución del Sistema de Tracción Frenado de 85 Trenes JH, consistente en el Servicio de Modernización y su Mantenimiento, así como a los Sistemas de Puertas y de Generación de Aire”. Misma que posteriormente fue adjudicada a Alstom, con el objetivo de incrementar la fiabilidad operativa de los tres sistemas mencionados (Tracción-Frenado, Puertas y Generación de aire) a los valores indicados dentro de la misma.

3. Proyecto y medio laboral

Alstom se encuentra organizado de acuerdo con regiones y funciones o áreas de competencia de la siguiente manera:

- **TIS** (*Transport Information Solutions* principalmente encargado de soluciones llave en mano).
- **TLS** (*Train life services* encargado de servicios a lo largo de la vida de los trenes).
- **System & infra** (Sistemas e infraestructura encargado de instalaciones fijas como vías, señalización).

De manera geográfica se encuentra dividida en las siguientes regiones: Norteamérica, Latinoamérica, Francia, Europa, Oriente Medio y Asia-Pacífico.

A continuación, se muestra en la figura 2 la estructura organizacional del área TLS.

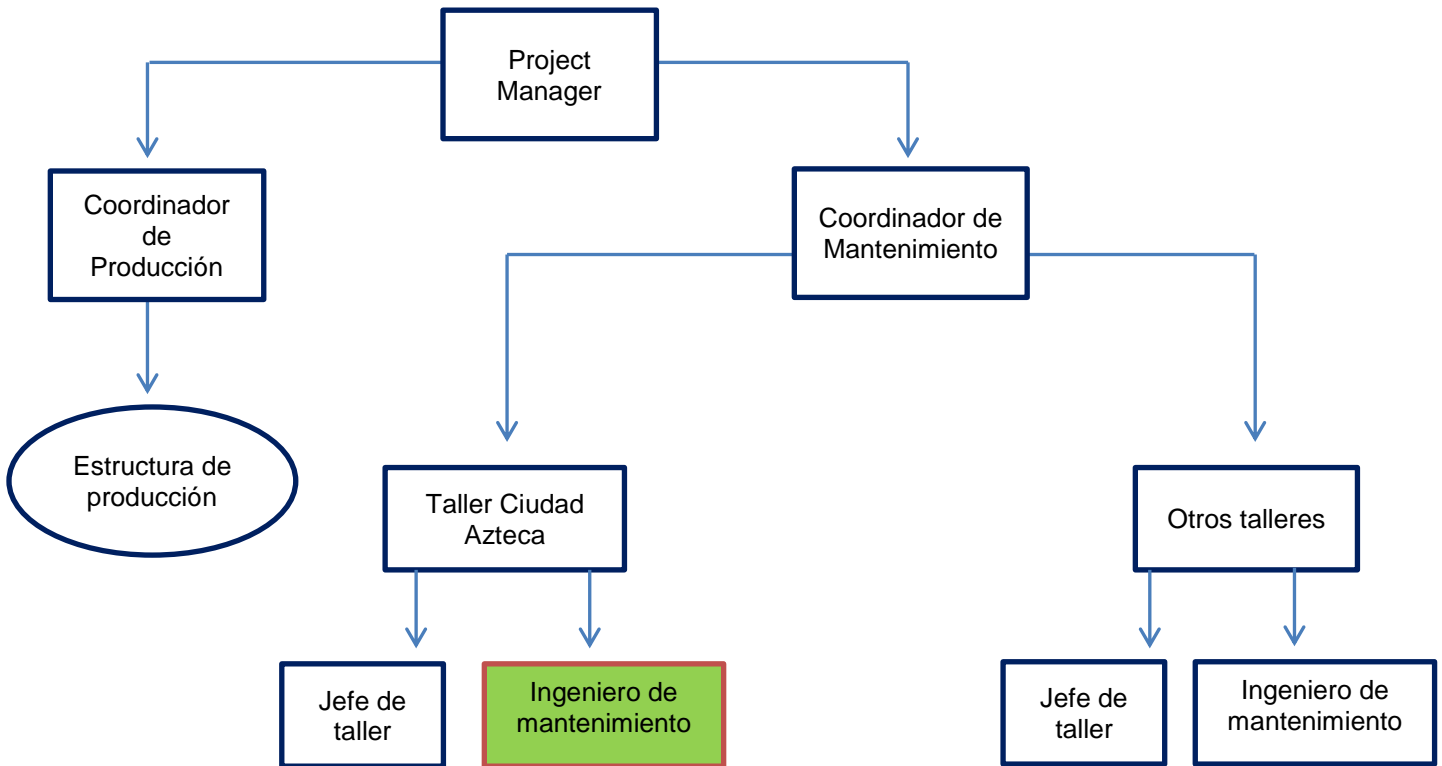


Figura 2 Organigrama proyecto MP68 área TLS

TLS (*Train Life Services*)

La rama de TLS (*Train life services* o servicios de vida útil en trenes) se dedica en contraposición al área de TIS, a dar servicios a equipos o trenes que no son nuevos, por lo que se requerirán técnicas y enfoques diferentes a aquellas realizadas en equipos nuevos, dentro de los servicios ofertados por TLS se encuentra el de mantenimiento, servicios de *overhaul* o revisión general, modernización o actualización de sistemas.



Figura 3 Funciones de TLS

Dentro del TLS tenemos las siguientes etapas o áreas de servicio.



Figura 4 Proceso de modernización y mantenimiento

De acuerdo con mi formación profesional, me encargo de los siguientes sistemas:

- Puertas.
- Generación de aire.
- Tracción y frenado eléctrico.

El reporte se centrará exclusivamente en el sistema de tracción-frenado, al ser además el sistema principal de obsolescencia que será sujeto a la modernización.

4. Generalidades del material rodante (trenes) de la red del STC metro

De acuerdo con el objetivo del proyecto que plantea incrementar la fiabilidad y homogeneizar el control del sistema de tracción frenado, es importante tener en cuenta los siguientes conceptos referentes a la conformación de un tren o convoy.

Cada tren está conformado por cuatro tipos de carros, de acuerdo con su función dentro del tren, los cuales son:

- **Carros tipo M:** Carros con tracción propia y cabina de conducción.
- **Carros tipo N:** Carros intermedios con tracción propia, sin cabina de conducción.
- **Carros tipo R:** Carros tipo remolque sin tracción propia y que además albergan equipos referentes a otros sistemas diferentes a la tracción como: generación de aire y la generación y regulación de energía.
- **Carro tipo PR:** Carro tipo remolque con la particularidad de albergar el sistema de pilotaje automático del cual a su vez conviven diferentes sistemas a lo largo de la red.

Se han definido los tipos de carro que conforman una formación o convoy del tren, ahora conviene conocer el concepto de elemento.

Elemento de un tren: Es el número de carros mínimo que pueden ser conformados a fin de que el convoy tenga todos los sistemas necesarios para que el tren presente autonomía propia, de acuerdo con la filosofía actual de la red del metro este número es tres, sin embargo, la formación mínima en la red actual es de seis carros, y solo existen las variedades de seis y nueve carros; es decir, dos y tres elementos.



Figura 5 Conformación de convoy de 3 elementos.

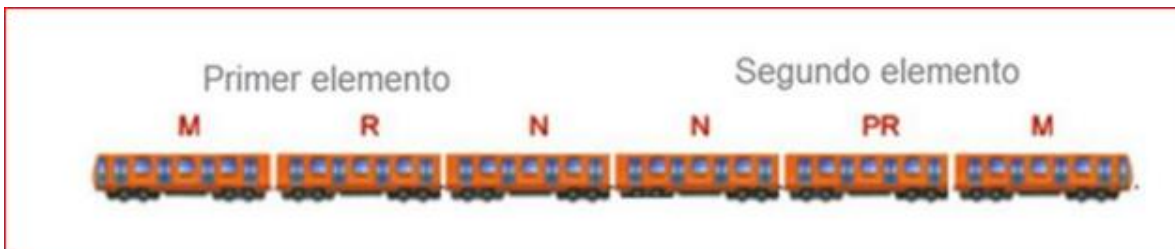


Figura 6 Conformación de convoy de 2 elementos.

Alcances de la modernización

- Trenes objetos de la modernización: 85.
- Modelos de tren: 3 (MP68-R93, MP68-R96, NM73B).
- Líneas involucradas: 4, 5, 6, 7 y B.
- Tipos de Pilotaje Automático: 3.
- Tipo de rodadura: Neumática en los 85 trenes.
- Voltaje de alimentación de potencia: 750 [V].
- Voltajes de alimentación de baja tensión o control: 72 [V].
- Tipos de motor: dos modelos de motores de DC.

Los trenes y equipos de tracción se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

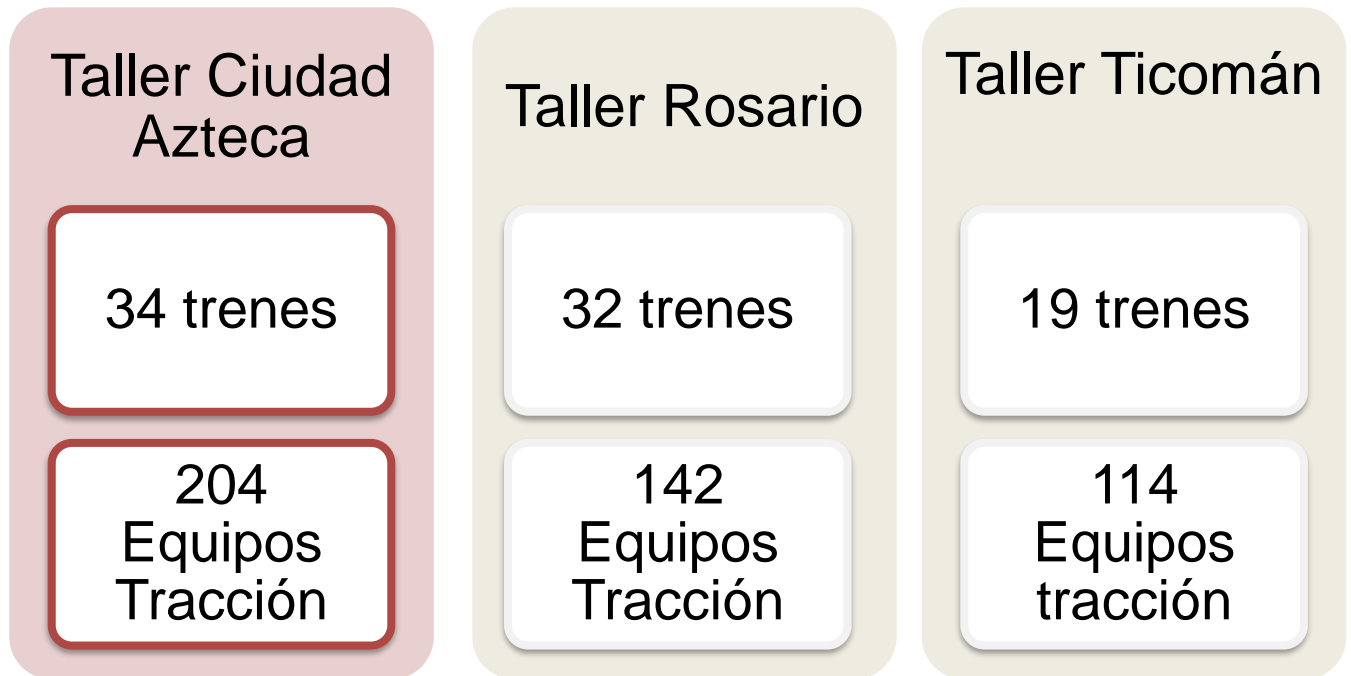


Figura 7 Distribución de equipos en las diversas líneas.

5. Desarrollo de actividades

La obsolescencia presenta en los trenes de las diferentes líneas del STC, es latente y prueba de ello es que los trenes objetos del contrato tienen entre 46 y 50 años en uso, dependiendo del modelo y presentaban de manera previa a la modernización para el caso de los 34 trenes de línea B, 400 fallas mensuales distribuidas de la siguiente manera:

Sistema	Promedio mensual de averías.
Tracción	300
Puertas	40
Generación aire	25
Generación energía	15
Otros	20

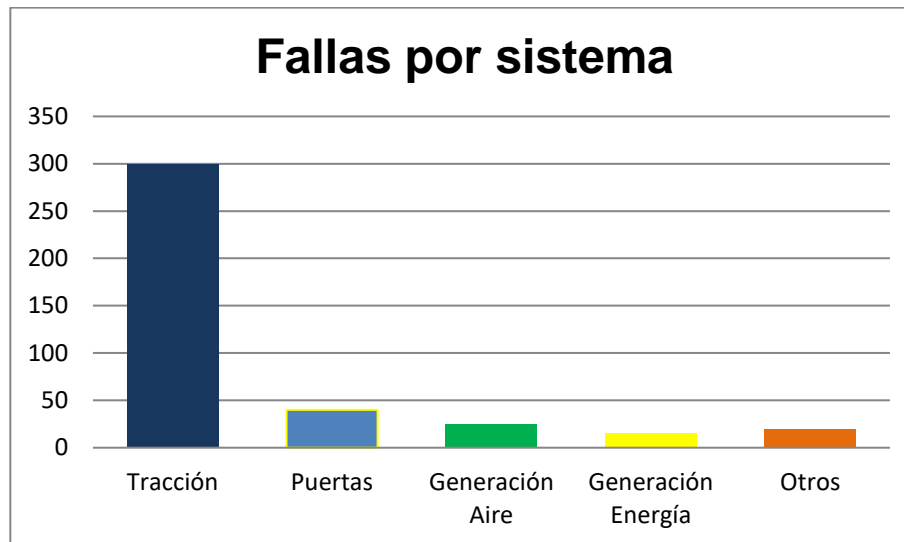


Figura 8 Estatus inicial fallas por sistema.

Más del 80% de las fallas corresponden de manera exclusiva a los sistemas de tracción y puertas, de las cuales referente al sistema de tracción 225 fallas en promedio corresponden a problemas en mecanismos de leva, generando desincronización en el sistema, mientras que en el sistema de puertas 30 de ellas corresponden al sistema de relevadores de control.

Para atender dicha problemática, se realizó la modernización de los sistemas de tracción (eliminando el mecanismo de levas), puertas (modernizando la arquitectura de control) y generación de aire por parte de la empresa Alstom, en las siguientes etapas:

- **Diseño**

La etapa de diseño fue realizada en la ciudad de Rotterdam, Holanda, y personal de México fuimos capacitados en la solución específica a fin de realizar las etapas posteriores de modernización y mantenimiento. El diseño en cuanto al sistema de tracción básicamente consta de un control de motores de DC mediante PWM (*Pulse-width modulation* o modulación de ancho de pulsos) controlado por IGBT (*Insulated gate bipolar transistor* o transistor bipolar de compuerta aislada) en configuración *tótem pole*.

- **Modernización (Producción)**

En esta etapa se toma un tren con tecnología antigua y se instalan los diferentes componentes sobre la estructura principal del tren, y se mantienen los siguientes equipos:

- Chasis.

- Hojas de puertas.
- Diferenciales.
- Conjunto de bogies.
- Cabinas.
- Equipos de generación de energía (Convertidores estáticos o motogeneradores, reguladores).



Figura 9 Conjunto bogie

Para contribuir al ahorro de costos, se rehabilitan aquellos equipos susceptibles de reutilizarse como son:

- Motores DC.
- Llaves de mando.
- Válvulas de frenado (EMDI).
- Contactador de toma de taller (KFP).

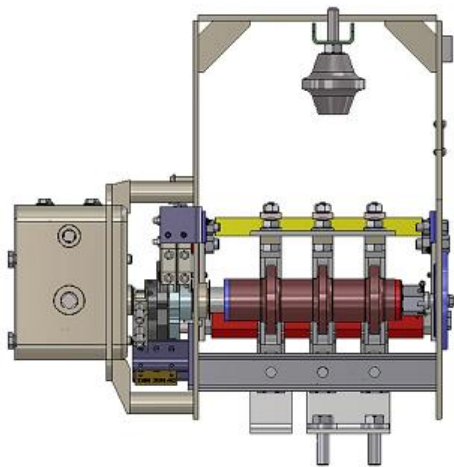


Figura 10 Equipos a rehabilitar (KFP Y EMDI)



Figura 11 Motor DC rehabilitado.

Así como se instalan los equipos que componen el nuevo sistema de tracción que son:

- Cofre con módulos de IGBT.
- Cofre de control.
- Cofre de manejo de alta tensión.
- Cableado tanto de potencia como de control.
- Resistencia de frenado (reóstato).
- Máster control (manipulador interfaz HMI).



Figura 12 Vista lateral de cofre de resistencias (reóstato) y cofre chopper.



Figura 13 Cofre de control

La instalación y rehabilitación de dichos equipos debe ser realizada a un ritmo de dos trenes por mes lo que equivale a 18 vagones o un vagón y medio por día, para realizar dicha tarea es necesaria la participación de personal con conocimiento de:

- Producción en serie.
- Supervisión de producción.
- Tiempos y movimientos.
- Sistemas de calidad.
- Mecánica (fijaciones mecánicas, estudios de líquidos penetrantes, tubería neumática).
- Soldadura y pailera.
- Cableado eléctrico.
- Instalación de equipos electromecánicos.
- Computación (programación y verificación del control).
- Sistema de tracción frenado en general a fin de validar la correcta instalación.

El tiempo de producción de un tren completo es de 30 días con un aproximado de 60 operarios, a fin de cumplir el requerimiento de dos trenes por mes es necesaria la operación en paralelo en diversos vagones y trenes, generando una planificación como la siguiente:

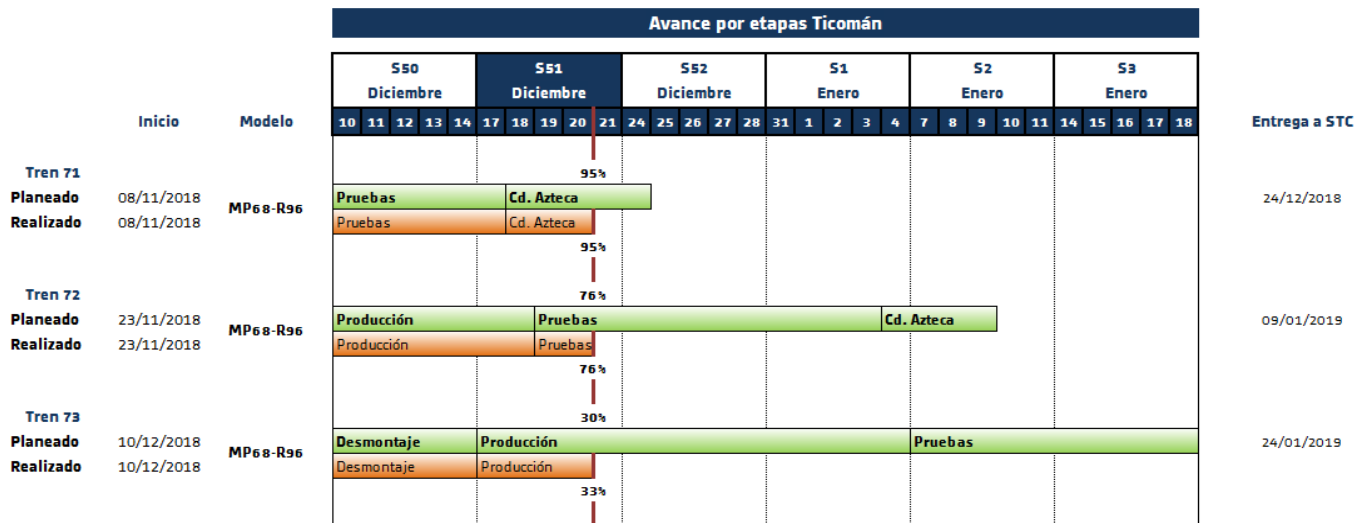


Figura 14 Planificación modernización de los trenes (producción).

- **Mantenimiento**

En esta etapa es donde inicia mi participación en el proyecto, posterior la instalación de los diversos equipos del sistema de tracción-frenado, se debe garantizar la fiabilidad del tren durante al menos 10 años posteriores a la modernización, mediante la ejecución de trabajos de mantenimiento preventivo y predictivo, entendiéndose mantenimiento como “Un conjunto de acciones tomadas para retener o regresar un sistema a sus condiciones operativas diseñadas. Extiende la vida útil de los sistemas y asegura la óptima disponibilidad de equipos instalados, así como equipos de uso en emergencias.” (Isermann, 2006)

Para ello algunos de los requisitos solicitados por el STC durante la duración del proyecto de mantenimiento son los siguientes:

- Incrementar la fiabilidad operativa del sistema de tracción-frenado a niveles iguales o mayores a 45,000 km / avería, del sistema de puertas a niveles iguales o mayores a 65,000 km / avería y el de generación de aire a niveles iguales o mayores a 150,000 km/ avería para el lote de 85 trenes (STC,2014).

- El tiempo promedio requerido para las labores de mantenimiento preventivo del sistema de tracción-frenado deberá ser menor o igual a 6.5 horas (MTTR ≤ 6.5 h) y permitir el cumplimiento de los niveles de fiabilidad y de disponibilidad especificados.

- Incrementar la disponibilidad del sistema de tracción-frenado, puertas y generación de aire a un nivel no menor del 99.27%.
- Ahorrar energía, mediante el diseño de un sistema de frenado eléctrico que permita niveles altos de regeneración de energía, de al menos el 35% de la energía consumida en la fase de tracción, bajo todas las condiciones de operación de las Líneas 4, 5, 6, 7 y B.

Respecto al primer punto referente a la fiabilidad se cuenta con la siguiente información:

- Previo a la modernización el 75% de las fallas de los trenes correspondían al sistema de tracción, lo cual resultaba en una fiabilidad promedio de 1300 km/avería, es decir una avería por tren cada 10 días.
- El sistema propuesto por Holanda con interacciones con equipos antiguos y rehabilitados tiene una fiabilidad promedio de 150000 km/avería por equipo, sin embargo, al existir 6 carros motrices por tren esto resulta en una fiabilidad promedio de 25000 km/avería por tren.

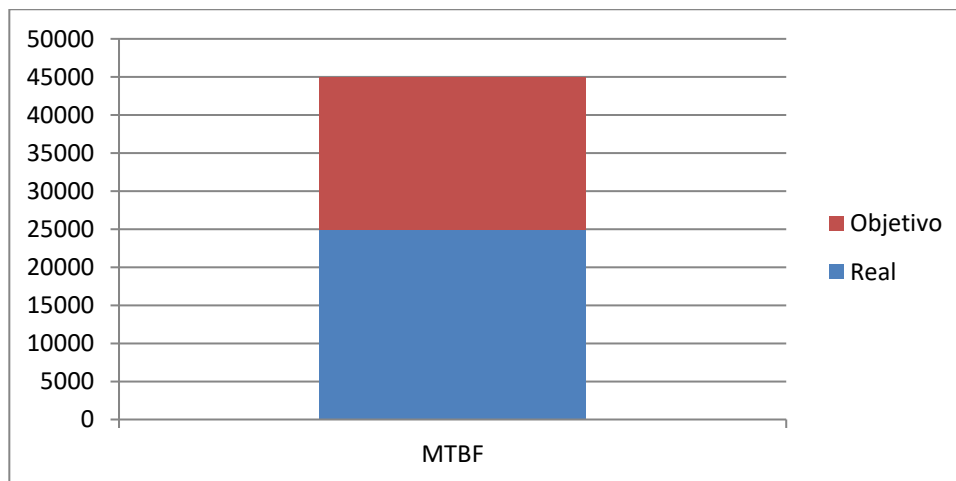


Figura 15 Fiabilidad real vs Objetivo.

La fiabilidad objetivo, evaluada mediante el *MKBF* (*mean kilometer between failure*) o kilometraje entre fallas y solicitada como mínima por el STC es en un 80% mayor que aquella proyectada por los diseñadores del sistema.

Es debido a esta gran diferencia entre la fiabilidad comprobada y la objetivo que se requiere de personal cuya función específica sea la de emprender acciones que eleven la fiabilidad de la

flota, y al mismo tiempo verifiquen el adecuado cumplimiento de los demás requisitos solicitados por el STC.

5.1 Estado inicial de la etapa de mantenimiento

Para el caso práctico presentado y lograr el aumento de fiabilidad necesario de 25,000 km/avería hasta 45,000 km/avería mínima, se realizó un levantamiento inicial mediante observación de la operación con los siguientes hallazgos:

1. Fiabilidad inicial de 20,000 km/avería (menor al objetivo y a la teórica).
2. Alto enfoque en tendencias de **mantenimiento correctivo**, en lugar de suprimirlas mediante el refuerzo del mantenimiento preventivo.
3. Alto grado de **personalización** de los mantenimientos, debido a confianza excesiva en experiencia del personal técnico encargado de la operación.
4. Falta de documentación relativa a las operaciones.
5. Falta de mantenimiento basado en condición, al no realizarse un levantamiento inicial de estatus del equipo (pruebas de entrada) ni seguimiento o toma de parámetros (verificación inicial de códigos de error en computadoras, mediciones de contadores y tiempos de actuación).
6. Falta de un flujo coherente y congruente de operaciones.
7. Demasiados intervalos de mantenimientos de acuerdo con la gran variedad de equipos involucrados, resultando en tiempos excesivos de mantenimiento y manipulación excesiva de los equipos, aumentando considerablemente el riesgo de error humano por sobre mantenimiento.
8. Exceso de trabajos en equipos mientras están instalados en el tren, aumentando el tiempo de paro del tren.
9. Baja confiabilidad en los registros tomados debido a error humano (errores de captura en las mediciones, trazabilidad de equipos, llenado de registros de operaciones).
10. Falta de análisis causa raíz en los casos que se tenían de mantenimiento correctivo y como consecuencia falta de plan de acción para evitar dichas averías.

5.2 Acciones para realizar

- Establecimiento de ciclo de Deming y administración de campo (**Gemba Kanri**) para los procesos de mantenimiento preventivo, a fin de solucionar los numerales 1-4, y 6 descubiertos en el levantamiento inicial.
- Definición de parámetros a seguir, medir y controlar, así como realización de pruebas de entrada a los trenes y que el mantenimiento preventivo incluya flexibilidad y se realice mantenimiento basado en condición a fin de solventar el punto 5.
- Establecimiento de registros electrónicos de parámetros y mediciones con filtros a fin de aumentar la fiabilidad de los registros obtenidos en el campo.
- Establecimiento y concentración de los procedimientos y manuales de mantenimiento en ciclos de bloque a fin de evitar múltiples internaciones de los trenes, por los diversos sistemas.
- Establecimiento de distintos alcances incluyendo alcances para realizar mantenimiento de equipos fuera del tren y en condiciones de laboratorio, a fin de minimizar el tiempo de internación del tren y que este se dedique por ejemplo al montaje y desmontaje de dichos equipos susceptibles de realizar su mantenimiento en laboratorio.
- Enfoque en realizar retornos de experiencia y retroalimentación de los mantenimientos correctivos a fin de realizar adecuaciones y modificaciones al diseño, capacitación o procedimientos de mantenimiento con base en dichas retroalimentaciones

5.3 Administración de campo para mejorar el mantenimiento preventivo

De acuerdo al levantamiento de información un tren recorrerá entre 12,000 y 13,000 [km] mensuales lo cual dará un promedio de 150,000 [km] anuales recorridos, a fin de cumplir con los múltiples intervalos de mantenimiento y al mismo tiempo reducir el número de internaciones del tren se definieron intervalos de mantenimiento de 15,000 [km] lo que equivale a una

realización de 10 mantenimientos en promedio realizados a un tren cualquiera, dichos niveles de mantenimiento se agruparon en 5 grandes alcances de mantenimiento cada uno englobando al anterior por completo y sumando actividades, y una actividad de revisión general que comprende básicamente un servicio de *overhaul* a todos los componentes del sistema como se muestra a continuación:

Nivel	Periodicidad	Alcance
Nivel 1	15,000 [km]	Nivel 1
Nivel 2	45,000 [km]	Nivel 1 + Complemento
Nivel 3	90,000 [km]	Nivel 2 + Complemento
Nivel 4	180,000 [km]	Nivel 3 + Complemento
Nivel 5	360,000 [km]	Nivel 4 + Complemento
RG (Revisión general)	720,000 [km]	Nivel 5 + Revisión general

Figura 16 Niveles de mantenimiento.

Lo cual se muestra en la siguiente cadencia de mantenimiento:

N1	N1	N2	N1	N1	N3	N1	N1	N2	N1	N1	N4
15,000	30,000	45,000	60,000	75,000	90,000	105,000	120,000	135,000	150,000	165,000	180,000
N1	N1	N2	N1	N1	N3	N1	N1	N2	N1	N1	N5
195,000	210,000	225,000	240,000	255,000	270,000	285,000	300,000	315,000	330,000	345,000	360,000
N1	N1	N2	N1	N1	N3	N1	N1	N2	N1	N1	N4
375,000	390,000	405,000	420,000	435,000	450,000	465,000	480,000	495,000	510,000	525,000	540,000
N1	N1	N2	N1	N1	N3	N1	N1	N2	N1	N1	RG
555,000	570,000	585,000	600,000	615,000	630,000	645,000	660,000	675,000	690,000	705,000	720,000

Figura 17 Cadencia de mantenimiento.

Esta cadencia de mantenimiento a lo largo de 10 años en una flota de 85 trenes resulta en un total de 8500 operaciones (10 años x 85 trenes x 10 mantenimientos anuales) de distintos niveles, por ello surge la necesidad de estandarizar dichas operaciones, señalando que cualquier ahorro de costo o tiempo, es extremadamente significativo al considerar dicho número de operaciones, a fin de realizar dicho proceso de estandarización se eligieron herramientas de automatización de procesos y administración de campo como lo son **Gemba Kanri, 5's, análisis 6M, Kaiser y ciclo de Deming.**

El nivel N3 comprende operaciones en todos los equipos facilitando que pueda ser escalado en ambas direcciones para los demás niveles de mantenimiento, por esta razón la implementación y análisis del sistema de administración de campo en el presente trabajo será realizado para dicho nivel de mantenimiento.

Implementación del mantenimiento preventivo.

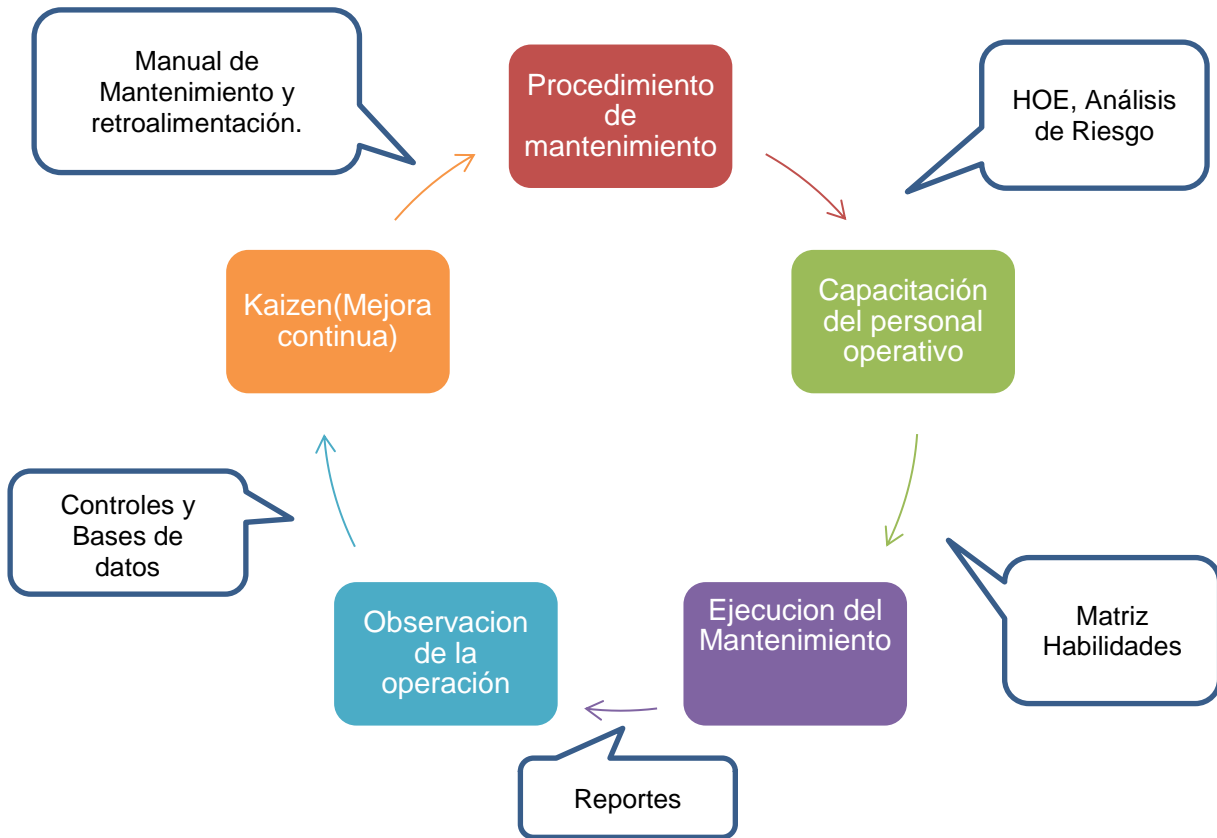


Figura 18 Implementación de ciclo de Deming.

En el rubro de mejora en la ejecución de los tiempos se realizó el siguiente proceso.

Se sugirió y estableció la siguiente secuencia de actividades.

	1 h		2 h		3 h		4 h		5 h		6 h		7 h	
	00:30	00:30	00:30	00:30	00:30	00:30	00:30	00:30	00:30	00:30	00:30	00:30	00:30	00:45
TEC 1	PRUEBAS DE ENTRADA	LOTO	Motores de tracción+EMDI+engrase de caja de mando de KFP+Limpieza e inspección Cofres Chopper, HV y Control+TMV de M1											Mantenimiento MC
TEC 2			Motores de tracción+EMDI+engrase de caja de mando de KFP+Limpieza e inspección Cofres Chopper, HV y Control+TMV de N1											COMIDA
TEC 3			Motores de tracción+EMDI+engrase de caja de mando de KFP+Limpieza e inspección Cofres Chopper, HV y Control+TMV de N2											COMIDA
TEC 4			Motores de tracción+EMDI+engrase de caja de mando de KFP+Limpieza e inspección Cofres Chopper, HV y Control+TMV de N3											COMIDA
TEC 5			Motores de tracción+EMDI+engrase de caja de mando de KFP+Limpieza e inspección Cofres Chopper, HV y Control+TMV de N4											COMIDA
TEC 6			Motores de tracción+EMDI+engrase de caja de mando de KFP+Limpieza e inspección Cofres Chopper, HV y Control+TMV de M2											Mantenimiento MC

Figura 19 Secuencia actividades mantenimiento Nivel 3.

De donde podemos observar que el proceso de mantenimiento estimado se realiza en 06:30 horas para 4 operarios y 6:45 para dos más, dando un total estimado de **39.5** horas hombre.

A fin de asegurar que las operaciones de mantenimiento sean realizadas por personal capacitado, se realiza el control por medio de la matriz de habilidades que se muestra a continuación:

Puesto	No. Empleado	Nombre	Lugar de Trabajo	Manejo Seguro de Montacargas Eléctrico.	Herramientas Manuales y Eléctricas	Crimpado	Torsión (Torque)	Herramientas e Instrumentos de Medición	LOTO	Pruebas Entrada / Salida	Mantenimiento Preventivo 11	Mantenimiento Preventivo 12	Mantenimiento Preventivo 13	Mantenimiento Preventivo IM1	TBPE Análisis, Detección y Corrección de Fallos por Sistema de Extracción Eventos MDC	Detección y Corrección de Fallos en Sistema de Tracción Frenado	ttProDiag Uso para Mantenimiento Correctivo y Preventivo de CONVERTIDOR MCP (Software)	Detección y Corrección de Fallos en Sistema de Aire	Detección y Corrección de Fallos en Sistema de Puertas de Pasajeros	Detección y Corrección de Fallos en Sistema de Puertas de Cabina.
Técnico	81524	Operario #1	Azteca	S	F	S	S	S	S	S	S	S	F	F	S	F	F	S	S	
Técnico	81581	Operario #2	Azteca	S	F	F	F	S	S	S	S	S	F	F	F	F	F	S	S	
Técnico	81592	Operario #3	Azteca	S	F	S	S	S	S	S	S	S	F	F	F	F	F	S	S	
Técnico	81593	Operario #4	Azteca	S	F	F	F	S	S	S	S	S	F	F	F	F	F	F	F	
Técnico	81595	Operario #5	Azteca	S	F	S	S	S	S	S	S	S	F	F	F	F	F	S	S	
Técnico	81633	Operario #6	Azteca	S	F	S	S	S	S	S	S	S	F	F	F	F	F	F	F	
Técnico	81736	Operario #7	Azteca	S	F	S	S	S	S	S	S	S	F	F	F	S	F	F	S	
Técnico	81749	Operario #8	Azteca	S	F	F	F	S	S	S	S	S	F	F	F	F	F	S	S	
Técnico	81750	Operario #9	Azteca	S	F	F	F	S	S	S	S	S	F	F	F	S	F	F	S	
Técnico	81949	Operario #10	Azteca	S	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	
Técnico	81950	Operario #11	Azteca	S	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	
Técnico	81951	Operario #12	Azteca	S	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	
Experto	E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Suficiente	S	2	14	0	7	7	11	11	11	11	11	11	0	0	5	0	0	9	9	
Formación	F	0	0	14	7	7	3	3	3	3	3	3	14	14	9	14	14	5	5	

Figura 20 Matriz de habilidades personal operativo.

Y con la finalidad de resguardar la integridad física del personal operativo, para cada tipo de operación se realiza un análisis de seguridad como el siguiente:

TIPO DE ANALISIS:		PROCESO:		AREA:		DEPARTAMENTO:		FECHA:			
PROCESO		MANTENIMIENTO N3		AZTECA		MANTENIMIENTO		10/01/2017			
EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL REQUERIDO: PROTECCIÓN DE CABEZA, ANTEOJOS DE SEGURIDAD, UNIFORME, GUANTES, BOTAS DIELECTRICAS, ROPA ALTA VISIBILIDAD, TRAJE TYVEK, MASCARILLA CONTRA				T= TIPO DE CONTROL: 1: PPE; 2 CONTROL ADMIN. 3 GUARDAS Y PROTECC; 4 MEDIDAS COLECTIVAS Y 5 ELIMIN. O SUBST.							
ANALIZADO POR: Karla Bonilla/Roberto Magaña				REVISADO POR: Arturo Contreras		AUTORIZADO POR: Javier García					
SEVERIDAD POTENCIAL											
DEFINITIVA	DE	5	BAJA	BA	2	MENOR	ME	1	MAYOR		
ALTA	AL	4	IMPROBABLE	IM	1	MODERADA	MO	2	CATASTRÓFICO		
MEDIA	ME	3				ALTA	AL	3			
ACTIVIDADES DEL PROCESO DESARROLLADA		RIESGOS POTENCIALES			PREVIO			ACCIONES RECOMENDADAS O PROCEDIMIENTOS		CONTRO	
		TIPO DE RIESGO Y CONSECUENCIAS			PB	SP	E			T	PB SP E
Limpieza general del motor electrico	Caida a nivel, por piso resbaloso.	ME	MO	6			1	BA	ME	2	
		3	2					2	1		
Limpieza exterior de cofres chopper, HV y control.	Exposición a polvo metalico y polvo de carbon.	AL	AL	12			1	BA	ME	2	
		4	3					2	1		
Inspección visual del cableado, DET	Caída a diferente nivel, por acceso a equipo. Movimientos inesperados por trabajo simultaneo con otras personas.	AL	MO	8			1	BA	ME	2	
		4	2					2	1		
	Exposición a polvo metálico.	AL	AL	12			1	BA	ME	2	
		4	3					2	1		

Figura 21 Análisis de seguridad mantenimiento nivel N3.

Ejecución del mantenimiento.

Durante la ejecución del mantenimiento se registraron y midieron los siguientes tiempos promedio por actividad:

- Pruebas de entrada: 40 min p/persona.
- Loto (Consigna e inmovilización del tren): 20 min p/persona.
- Mantenimiento a motores: 2 horas p/ persona por carro.
- Engrase caja de mando KFP: 0.5 horas p/persona.
- Limpieza de cofres: 2 horas.
- TMV: 15 minutos.
- Desplazamientos: 45 min p/persona.
- Mantenimiento MC: 0.5 horas por carro **M**.

Resultando en un total de: **40** [horas hombre].

Lo cual representa una desviación de $\frac{t_p - t_r}{t_p} = \frac{39.5 - 40}{39.5} = -0.0126$, es decir, 1.26% de tiempo extra al planeado.

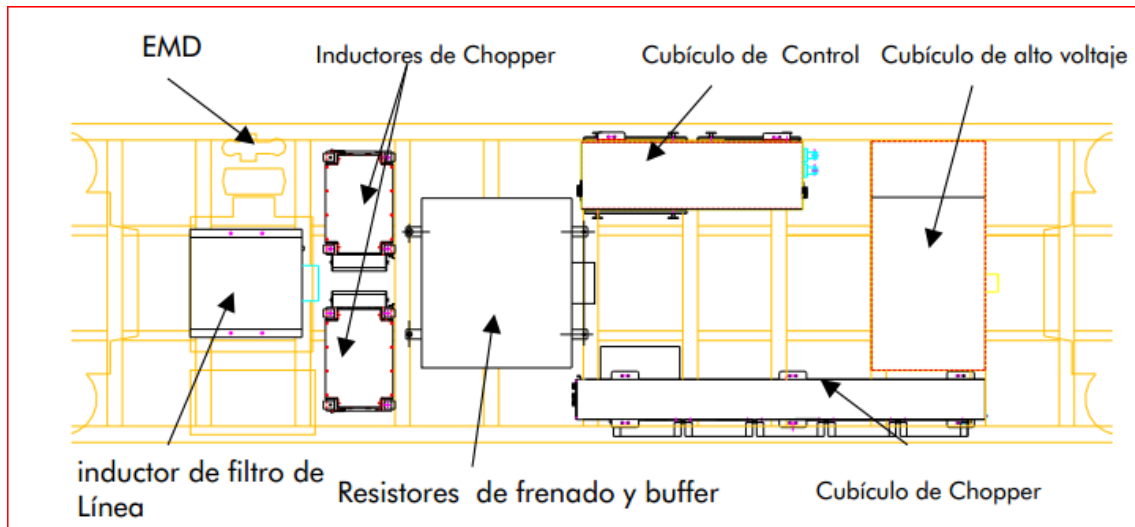


Figura 22 Distribución de equipos de tracción en bajo bastidor.

Es notorio que el rubro de desplazamientos es significativo al ser un equipo de larga extensión como lo es un tren, por lo que es de suponerse que eliminando o disminuyendo dichos tiempos mediante kaizen se logra una mejora significativa en el tiempo de ejecución que se acerque a la primera aproximación prevista. De la misma manera el mantenimiento a motores es una tarea de especial atención debido a la repetitividad y dimensiones del órgano motor.

Por lo que se estableció un diagrama de desplazamientos en el tren, a fin de minimizar los movimientos en un carro en particular durante la ejecución del mantenimiento, además de la siguiente secuencia de actividades propuesta.

	Day 1																																			
	1 Hora			2 Horas			3 Horas			4 Horas			5 Horas																							
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60												
TEC 1	Pruebas de Entrada (40 min)						LOTO (20 min)						Motor 1	Motor 2	Motor 3	TMV	Motor 4	HV	Caja KFP, T-E, nodos	Limpieza de cofres (Chopper, HV, Control)	EMDI	Mantenimiento														
TEC 2													M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	M1	MC	
TEC 3													Motor 1	Motor 2	Motor 3	TMV	Motor 4	HV	Caja KFP, T-E, nodos	Limpieza de cofres (Chopper, HV, Control)	EMDI	Mantenimiento														
TEC 4													N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1	N1
TEC 5													M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3	M3
TEC 6													M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	M2	MC

Figura 23 Secuencia actividades mantenimiento N3 mejorada.

A fin de disminuir los desplazamientos de ascenso, descenso y entrada y salida de la fosa de atención del tren se diseñó un aditamento en forma de banco que permite inspeccionar todas las posiciones de escobillas de un motor de tracción desde la posición inferior, evitando que se requiera salir de la misma para la verificación, reduciendo de significativamente dicha manera los movimientos innecesarios y por consiguiente el tiempo de ejecución de dicha actividad.



Figura 24 Banco inspección motores.

Posterior a la elaboración de dicha secuencia y con la implementación del uso del aditamento se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Pruebas de entrada: 40 min p/persona.**
- **Loto: 20 min p/persona.**
- **Mantenimiento a motores: 1 horas p/ persona.**
- **Engrase caja de mando KFP: 15 minutos p/persona.**
- **Limpieza de cofres: 1.5 horas.**
- **TMV: 5 minutos.**
- **Mantenimiento MC: 0.5 horas por carro M.**

Dando un total de **25 horas hombre** de las 30 horas estimadas. Es decir, un ahorro del **16.66%** referente a la última estimación y una mejora del **36.7 %** respecto al primer estimado.

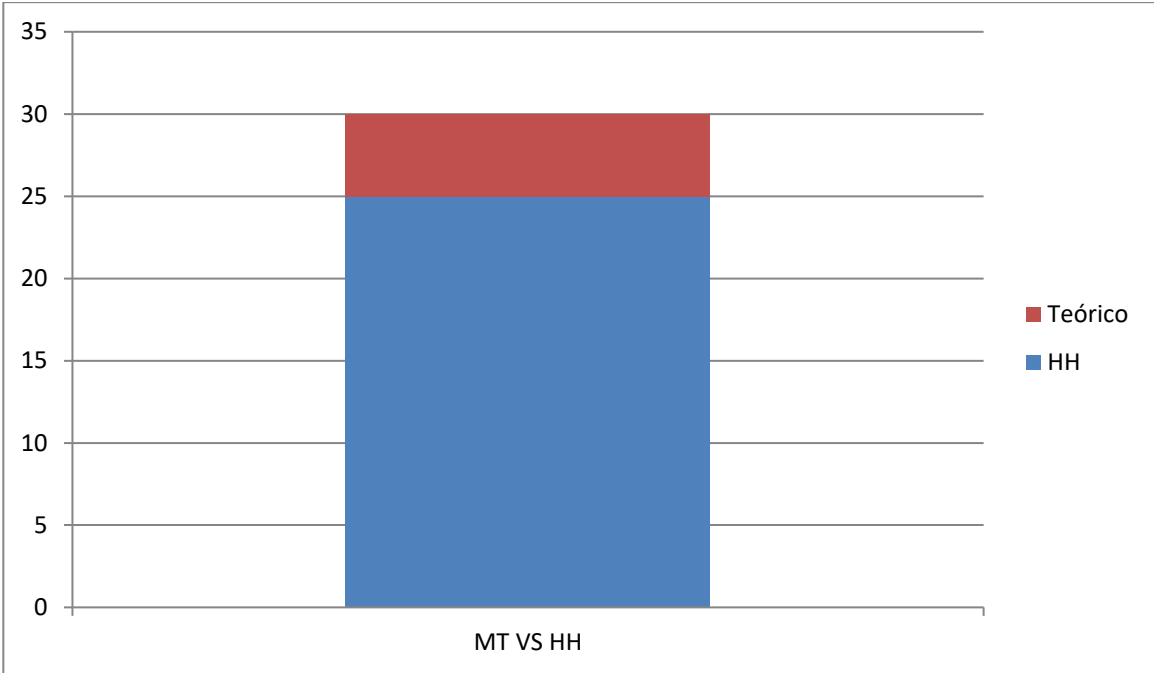


Figura 25 Horas hombre teóricas vs reales.

Podemos observar en la figura que las horas hombre realizadas fueron menores a las estimadas lo cual debido a las 8500 operaciones de mantenimiento resulta en un ahorro de 6000 horas hombre, lo cual equivale al ahorro de una persona en horas hombre durante 3 años.

Como se mencionó en el levantamiento inicial, existía un bajo grado de fiabilidad tanto en el llenado de reportes como en la toma de mediciones realizadas a los equipos, principalmente debido a errores humanos de distracción, caligrafía, memoria al no ser realizados en campo en la mayoría de las veces, ante esta problemática la solución propuesta fue el establecimiento de controles electrónicos mediante el desarrollo de una aplicación para evitar dichos errores de captura y rastreabilidad, a su vez la aplicación es la encargada de recordar el flujo de operaciones en el tren a los técnicos.

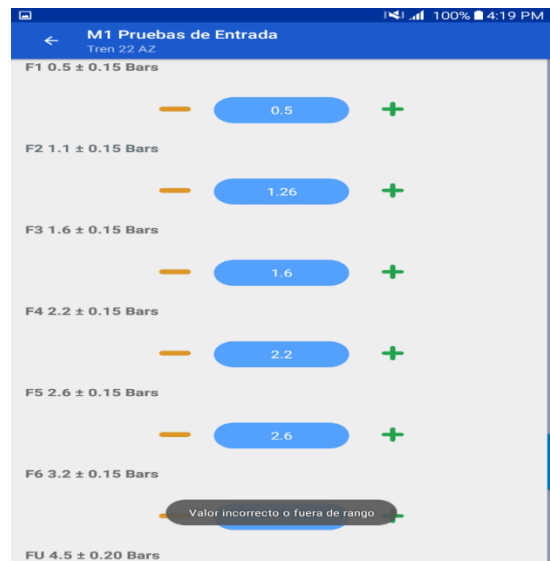


Figura 26 Indicación campos faltantes o fuera de rango.

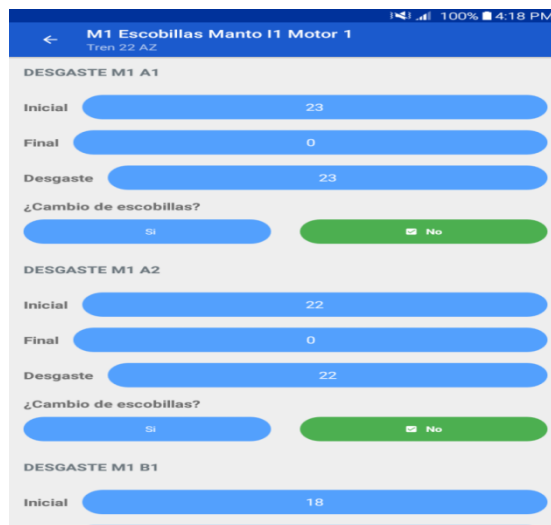


Figura 27 Registro de puntos de medición.

6. Casos Prácticos

6.1 Resultados

Referente a la ejecución de mantenimiento preventivo se obtuvo un ahorro de tiempo de internación promedio en el mantenimiento de 36.7% como fue demostrado en el capítulo 5, además de ser reducidas el número de internaciones requeridas y aumentar la fiabilidad de dichas intervenciones.

La disminución de tiempo de internación en HH se muestra a continuación.

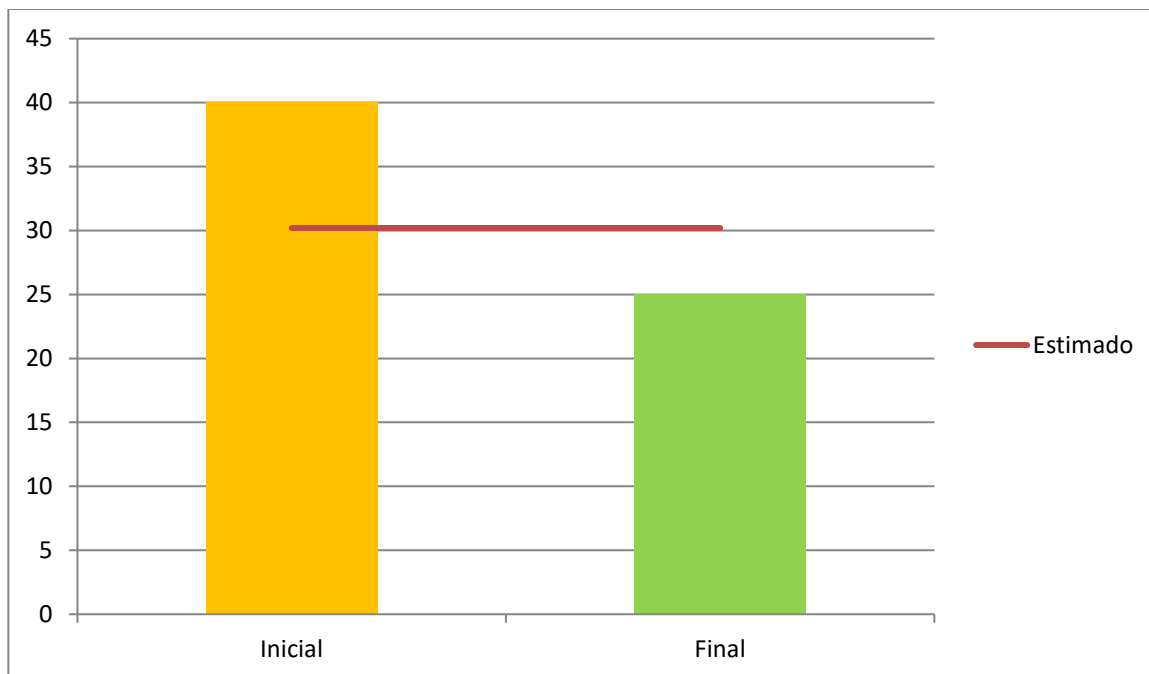


Figura 28 Comparativo tiempos inicial y final ejecución mantenimiento.

En cuanto a la fiabilidad de la flota se obtiene lo siguiente:

La fiabilidad histórica de la flota y previa a la implementación de las acciones de mejora mencionadas era:

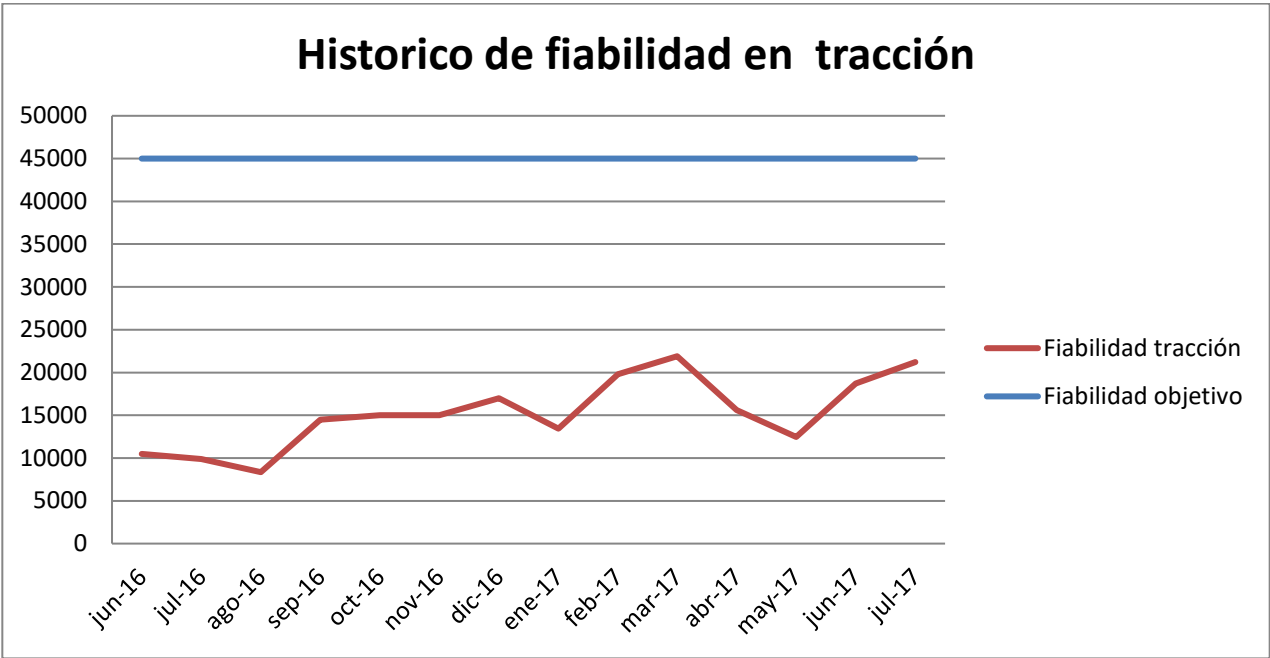


Figura 29 Fiabilidad histórica del sistema.

De donde se puede observar que si bien se encontraba por niveles 10 veces mejores a aquellos existentes previos a la modernización, esta era aún insuficiente para el nivel requerido por el STC.

La fiabilidad de la flota posterior a la implementación de la metodología de trabajo sustentada en el presente reporte es la siguiente:

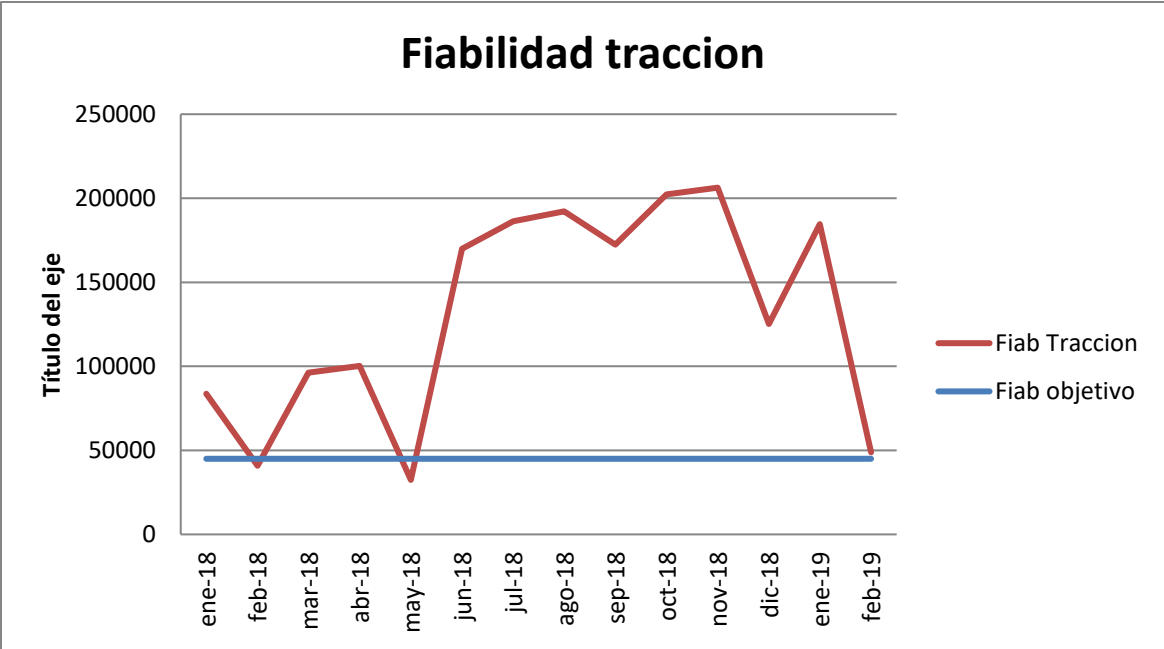


Figura 30 Resultados posteriores a la implementación de la filosofía de mantenimiento.

- En la figura 33 se observa que posterior a las acciones tomadas el índice obtenido de fiabilidad llega a ser incluso 10 veces superior a la posterior a la modernización y 100 veces a la de los equipos de origen en algunos meses, y en general salvo dos ocasiones en todas las posteriores se cumplen con los índices objetivos y previo a dichas acciones no se habían logrado los objetivos, por lo que se pueden calificar de satisfactorias las estrategias implementadas, ya que han sido cumplidos los índices de fiabilidad solicitados por el STC.

De manera particular analicemos la cadena de mantenimientos de algunos trenes.

TREN	N1		N1		N2		N1		N1		N3	
	Kilometraje	Fecha	Kilometraje2	Fecha3	Kilometraje4	Fecha5	Kilometraje6	Fecha7	Kilometraje8	Fecha9	Kilometraje10	Fecha11
61	16501	13/12/2018	34197	05/02/2019	48671	15/03/2019	64375	22/04/2019	78187	31/05/2019	93843	03/07/2019
62	15679	06/03/2019	29581	05/04/2019	44496	09/05/2019	58758	12/06/2019	74919	18/07/2019		
65	14573	14/02/2019	30732	01/04/2019	47047	08/05/2019	62146	11/06/2019				
67	15840	09/01/2019	30249	24/05/2019	44263	05/07/2019	59728	13/08/2019				
68	16196	15/05/2019	31856	26/07/2019								
70	15722	26/04/2019										
71	16195	16/07/2019										

Figura 31 Registro de mantenimientos realizados en diversos trenes.

Para el tren 65 se obtiene un historial de mantenimientos y reparaciones obteniendo los siguiente:

6.2 Caso práctico #1

14-02-19	6	65	TREN	TREN	PREVENTIVO	TRACCION	MANTENIMIENTO I1(15,000)	
01-04-19	75	65	TREN	TREN	PREVENTIVO	TRACCION	MANTENIMIENTO I1(30,000)	
08/05/19	97	65	TREN	TREN	PREVENTIVO	TRACCION	MANTENIMIENTO I2(45,000)	
11/06/19	123	65	TREN	TREN	PREVENTIVO	TRACCION	MANTENIMIENTO I1(60,000)	
08/05/19	137	65	R	3136	PREVENTIVO	TRACCION	FRENADOS BAJOS	EMDI CON FU A 4.1 BAR
08/05/19	137	65	N	1123	PREVENTIVO	TRACCION	FRENADOS BAJOS	EMDI CON FU A 4.1 BAR

Figura 32 Ejemplo de historial de mantenimiento de un tren.

De donde podemos observar que no han existido averías desde que el tren ingresó a dar servicio y durante prácticamente ocho meses que tiene de rehabilitado el sistema de tracción, y concluir que la metodología ha dado los resultados esperados.

6.3 Caso práctico #2

Para el caso del tren 61 tenemos lo siguiente:

FECHA	FOLIO	TREN	CARRO	NUMERO	TIPO INTERV	SISTEMA	EVENTO (FOLIO)	CONSTATACIÓN ALSTOM
13-12-18	184	61	TREN	TREN	PREVENTIVO	TRACCION	MANTENIMIENTO I1(15,000)	
05-02-19	5	61	TREN	TREN	PREVENTIVO	TRACCION	MANTENIMIENTO I1(30,000)	
05-02-19	5	61	M	6	PREVENTIVO	TRACCION	FRENADOS BAJOS	EMDI CON FU A 4.1 BAR
05-02-19	5	61	PR	3026	PREVENTIVO	TRACCION	FRENADOS BAJOS	EMDI CON FU A 4.1 BAR
15-03-19	61	61	TREN	TREN	PREVENTIVO	TRACCION	MANTENIMIENTO I2(45,000)	
15-03-19	61	61	N	1077	PREVENTIVO	TRACCION	FRENADOS BAJOS	EMDI CON FU A 4.1 BAR
15-03-19	61	61	N	1208	PREVENTIVO	TRACCION	RESISTENCIA PRECARGA CON FUGA DE ARENA	RESISTENCIA PRECARGA CON FUGA DE ARENA
22-04-19	84	61	TREN	TREN	PREVENTIVO	TRACCION	MANTENIMIENTO I1(60,000)	
22-04-19	84	61	R	3013	PREVENTIVO	TRACCION	FRENADOS BAJOS	EMDI CON FU A 4.1 BAR
31/05/19	123	61	TREN	TREN	PREVENTIVO	TRACCION	MANTENIMIENTO I1(75,000)	
03/07/19	143	61	TREN	TREN	PREVENTIVO	TRACCION	MANTENIMIENTO I3(90,000)	

Figura 33 Ejemplo de historial de mantenimiento e incidencias tren 61.

No han existido tampoco correctivos desde que el tren ingresó a dar servicio y se observa el seguimiento a los distintos ajustes, conservaciones y calibraciones requeridos durante las operaciones de mantenimientos.

7. Conclusiones

Se propuso una metodología de trabajo que aumentara la fiabilidad de los equipos modernizados eliminando los ingresos no programados de trenes ya que esto representa pérdidas sustanciales en costos, eficiencia y personas no transportadas.

Posterior a la aplicación de la metodología propuesta se observó una mejora en los tiempos de internación programada del 36.7% por evento de mantenimiento, y una mejora en la fiabilidad del 1000%, superando incluso en un 300% el índice solicitado por el STC, en el rubro de mantenimiento preventivo, mientras que en el correctivo se eliminaron en promedio 300 ingresos no programados a lo largo de la flota de manera mensual, considerando un tiempo promedio de reparación de 4.5 horas., se ha aumentado en 1350 horas la operación de los trenes, lo que equivale a la transportación de 1.5 millones de personas de manera mensual tan sólo en el taller a mi cargo, por estas razones se concluye que el modelo de trabajo planteado, así como su implementación resultaron exitosas, mejorando de manera considerable el tiempo de explotación de los trenes de línea de la Ciudad de México.

Realizar el mantenimiento y los procedimientos correspondientes al mismo, para los diversos sistemas de un tren requiere de los conocimientos de diversas áreas y técnicas de ingeniería, la ingeniería mecatrónica reúne este requisito integrador de técnicas, razón por la cual mi formación dentro de la facultad fue la que me permitió lograr exitosamente este reto profesional, y cuando hubo momentos en los que existían cosas desconocidas , sin duda me fue provista la habilidad de investigación, actualización y autoformación, dichas habilidades fueron necesarias al investigar temas de seguridad y fiabilidad ferroviaria como lo son diseño a prueba de fallas, diseño robusto y normas de seguridad ferroviarias.

8. Referencias

- 1.- Sistema de Transporte Colectivo. (2019). Acerca de. Ciudad de México. Recuperado el 14 de octubre de 2019 de <https://www.metro.cdmx.gob.mx/organismo/acerca-de>.
- 2.- Sistema de Transporte Colectivo. (2019). Parque Vehicular. Ciudad de México. Recuperado el 14 de octubre de 2019 de <http://www.metro.cdmx.gob.mx/parque-vehicular>.
- 3.- Sistema de Transporte Colectivo. (2019). Parque Vehicular. Ciudad de México. Recuperado el 14 de octubre de 2019 de <http://www.metro.cdmx.gob.mx/parque-vehicular>.
4. Isermann, R. (2006). *Fault-diagnosis Systems An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Impreso en Alemania: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
5. - Sistema de Transporte Colectivo. (2014). Licitaciones. Ciudad de México. Recuperado el 14 de octubre de 2019 de http://data.metro.cdmx.gob.mx/licitacion/doc_servicios/30102015_009_14.pdf

9. Anexos

9.1 Análisis de causa raíz en mantenimientos correctivos

Como se mencionó en el levantamiento inicial, una de las principales razones por las que existían demasiados ingresos no programados de trenes era por fallas no analizadas y por consecuencia sin acciones que eliminarán la ocurrencia de dichos fallos o anomalías, razón por la cual a fin de poner a cero los equipos se realizó el análisis de los dos casos siguientes que correspondían al 80% de ingresos no programados, el 20% restante era atribuible a error humano durante actividades de mantenimiento, mismo que fue disminuido por las acciones emprendidas en el capítulo 5.2.

9.2 Análisis Weibull y curva de fiabilidad

“El análisis de la fiabilidad se basa en la suposición de fallas aleatorias. Esto es especialmente cierto para equipos eléctricos y electrónicos, así como equipos grandes con muchos componentes y las fallas sistemáticas parecer aparecer de manera aleatoria debido a su gran tamaño”⁵

Debido a las dimensiones y número de equipos el tren y en especial una flota particular de trenes cae bajo el supuesto mencionado en el párrafo anterior, es por este comportamiento aleatorio que menciona R. Esmeran, que surge la necesidad de clasificar y discriminar dichas fallas, ya que debido a dicha distribución aleatoria sería fácil desestimar problemas de fondo si son descartados y viceversa desestimarlos pensando que son aleatorios cuando pudieran ser todo menos eso, y al revés podrían tomarse acciones equivocadas al confundir una falla aleatoria con una sistémica, a su vez también podría confundirse una disminución de índice de fallas, generadas a raíz de la disminución de número de componentes del universo original debido justamente a dicha tasa de fallas, es por ello que resulta de importancia vital la adecuada clasificación de dichos casos, y para ello una herramienta muy útil es la distribución de Weibull.

Consideré la función de densidad de Weibull para una variable aleatoria.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad \dots t > 0$$

De donde β es el parámetro de forma, y η es el parámetro de escala

La ecuación de fiabilidad Weibull es:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

La probabilidad de falla es entonces

$$F(t) = 1 - R(t)$$

$$1 - F(t) = R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

$$\ln[1 - F(t)] = -\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta$$

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] = \beta \ln t - \beta \ln \eta$$

Sea $Y = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]$, $x = \ln t$, $C = -\beta \ln \eta$

Tenemos entonces una ecuación de la siguiente forma

$$Y = \beta x + C$$

La probabilidad de fallo o función de anti-fiabilidad se ha estimado empíricamente mediante la siguiente manera.

$$F(t) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$$

De donde i = al número de fallos y n es el tamaño de la muestra

Esta expresión da origen a una curva conocida como de bañera, de la siguiente manera.

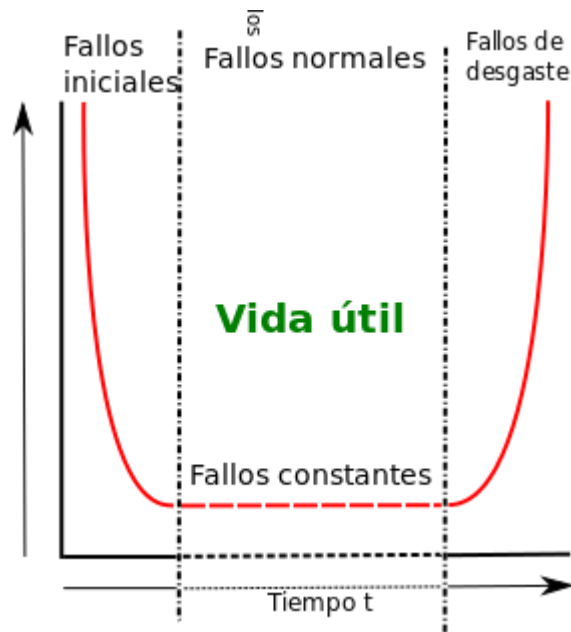


Figura 34 Curva típica de fallos a lo largo de la vida útil de un equipo.

En donde se pueden apreciar 3 zonas definidas, la primera conocida como zona de muerte infantil en donde $\beta < 1$ en esta fase la fiabilidad mejorará los productos defectuosos serán reemplazados por productos sin defecto, la segunda conocida como zona de vida útil o zona de fallas aleatorias donde $\beta \cong 1$ y con tasa de fallos constante y por último la zona conocida como zona de envejecimiento o desgaste, con $\beta \gg 1$, en esta zona la tasa de fallos incrementa, el envejecimiento o fin de la vida útil ha llegado y se corre el riesgo de quedarse sin partes de refacciones o de detener equipos a causa del alto nivel de fallas.

A fin de mejorar la fiabilidad en equipos eléctricos y electrónicos derivados de dicho comportamiento natural se pueden realizar las siguientes acciones.

- Eliminar aquellos componentes que tengan mortalidad infantil

La primera zona puede ser eliminada o reducida mediante una variedad de técnicas una de las cuales es realizar ensayos a fin de forzar defectos latentes, en componentes eléctricos y

electrónicos esto se logra a través de ciclos térmicos y vibraciones, posterior a ello es necesario conducir pruebas, la población que apruebe dichas pruebas o sobreviva, se encontrará en la segunda zona de la curva, por lo cual su probabilidad de fallo ha sido disminuida.

- Disminuir la tasa de fallos $\lambda(t)$ en la zona de vida útil.

Esto se logra mediante la mejora y homogeneización de las condiciones a las que está sometido el sistema, evitando variaciones bruscas en las mismas, esto se logra mediante atenuadores de corriente, voltaje, hechos típicamente a través de filtros R/C.

- Extender el desgaste prematuro a fin de retrasar el fin de la vida útil.

Esto se logra disminuyendo las actuaciones y ciclos a los que son sometidos los equipos, esto es de particular importancia y aplicabilidad para sistemas mecánicos, sin embargo esto también puede ser aplicado a equipos eléctricos y electrónicos, esto debido a que como menciono una de las principales razones de las fallas eléctricas y electrónicas son conexiones deficientes, estas conexiones generarán oscilaciones en los parámetros eléctricos del sistema generando fallas abruptas, o acelerando el fin de la vida útil, es para ello que en las inspecciones de mantenimiento preventivo se prevé la verificación de conexiones eléctricas a fin de detectar estas desviaciones, este fenómeno se ve acrecentado en un equipo móvil como lo es un tren, debido a que dicho movimiento genera vibraciones susceptibles de crear conexiones deficientes en el cableado.

9.3 Casos Prácticos de análisis causa raíz

Caso # 1

De acuerdo con las estadísticas se comenzaron a observar un aumento en fallas de módulos 15A1 (conjunto controlador de IGBT de potencia) por lo que es necesario hacer el análisis Weibull a fin de verificar si este comportamiento es esperado dentro de la vida útil o no, para ello se inició con la siguiente clasificación de fallos de módulo 15A1

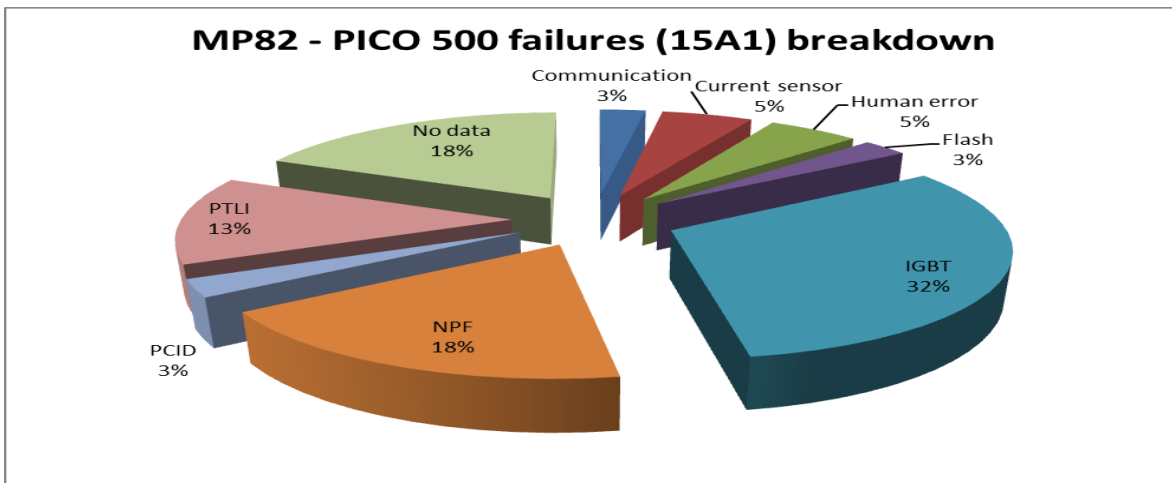


Figura 35 Distribución modo de falla asociada a módulo de transistores de potencia.

De donde se observan 3 grandes modos de fallo que concentran el 63% de las fallas, que son falla de IGBT con un 32% del total del universo, falla de tarjeta controladora de dicho módulo (PTLI) con un 13% y falla no reproducida en un 18%. Concentrando todos los tipos de falla de módulo 15A1 en el tiempo y prediciéndolo con el modelo Weibull tenemos lo siguiente:

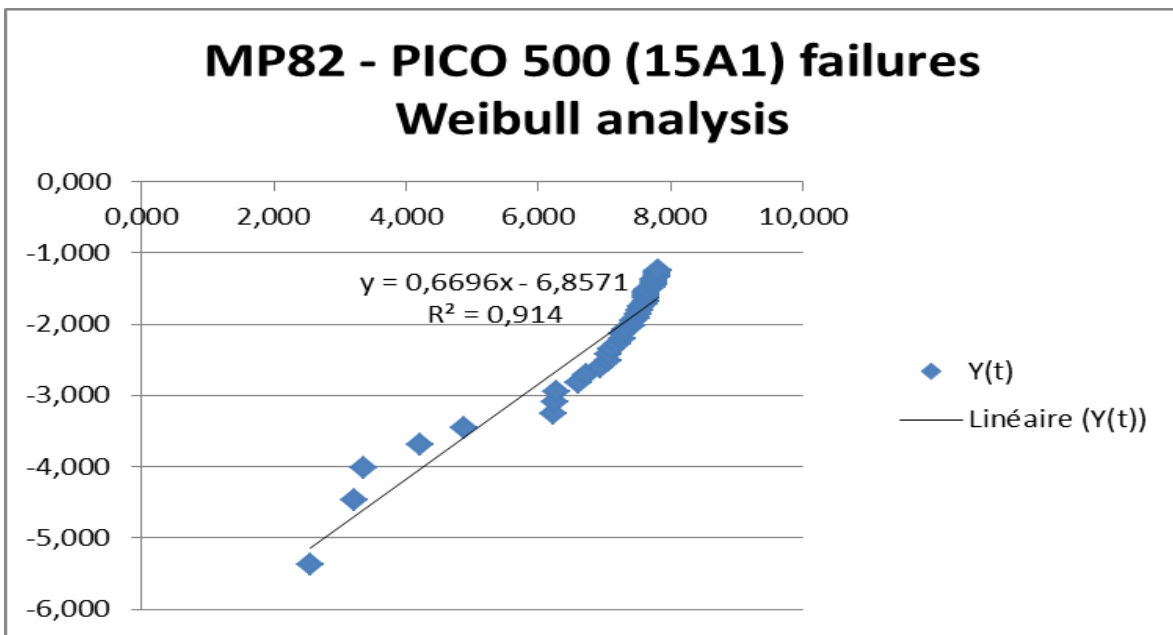


Figura 36 Análisis Weibull de fallos en módulos de transistores de potencia.

De donde se observa que el coeficiente de correlación es de sólo 0.914 lo cual no brinda la suficiente precisión en la predicción de fallas.

Sin embargo si separamos cada una de las causas tenemos lo siguiente: para el IGBT

N°	TTF (Days)	Failure modes	F(t)	Y(t)	Ln(t)
1	1152	IGBT	0,0047	-5,3676	7,0493
2	1655	IGBT	0,0113	-4,4770	7,4116
3	1802	IGBT	0,0180	-4,0110	7,4967
4	1871	IGBT	0,0246	-3,6925	7,5342
5	1985	IGBT	0,0313	-3,4499	7,5934
6	2043	IGBT	0,0379	-3,2536	7,6222
7	2064	IGBT	0,0445	-3,0885	7,6324
8	2122	IGBT	0,0512	-2,9459	7,6601
9	2229	IGBT	0,0578	-2,8203	7,7093
10	2416	IGBT	0,0645	-2,7080	7,7899
11	2424	IGBT	0,0711	-2,6064	7,7932
12	2427	IGBT	0,0778	-2,5135	7,7944

Figura 37 Frecuencia de fallos tomando exclusivamente los transistores de potencia.

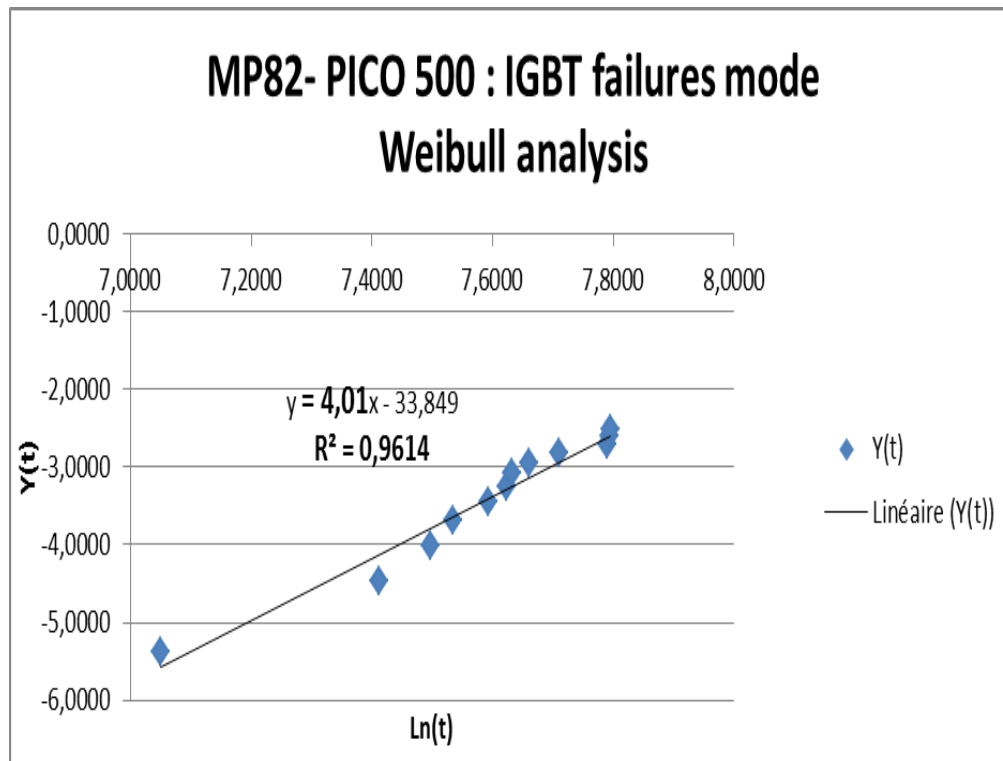


Figura 38 Análisis Weibull de fallos solo en transistores de potencia

- Resultando un coeficiente de correlación de 0.96 lo cual es suficientemente fiable en predicción.

- Y se obtiene un valor $\beta = 4.01$ por lo cual se confirma el envejecimiento de los IGBT, así como una $\eta = 4634$ días.

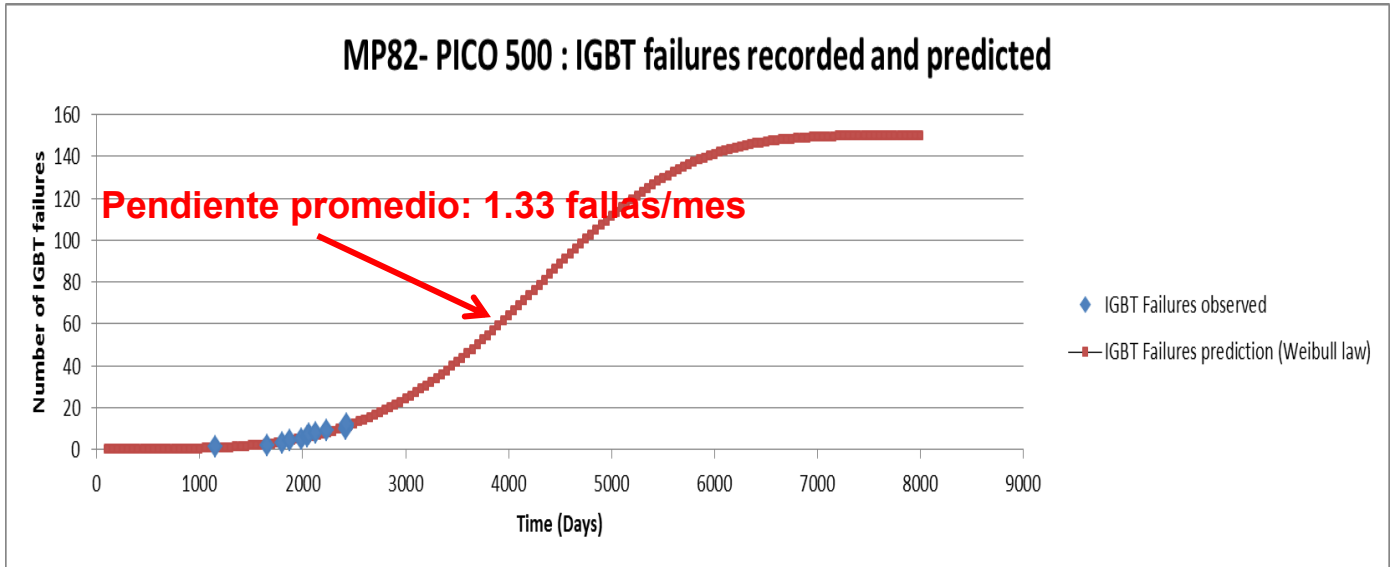


Figura 39 Modelo predictivo frecuencia de fallos en transistores de potencia.

- 99% de la flota estará fuera de servicio después de 6800 días de operación (19 años).

Para el caso de la Tarjeta PTLI controladora de dicho hardware se tiene lo siguiente:

N°	TTF (Days)	Failure modes	F(t)	Y(t)	Ln(t)
1	1162	PTLI	0,0047	-5,3676	7,058
2	1427	PTLI	0,0113	-4,4770	7,263
3	1712	PTLI	0,0180	-4,0110	7,445
4	1761	PTLI	0,0246	-3,6925	7,474
5	1896	PTLI	0,0313	-3,4499	7,548

Figura 40 Frecuencia de fallos en tarjeta controladora de transistores.

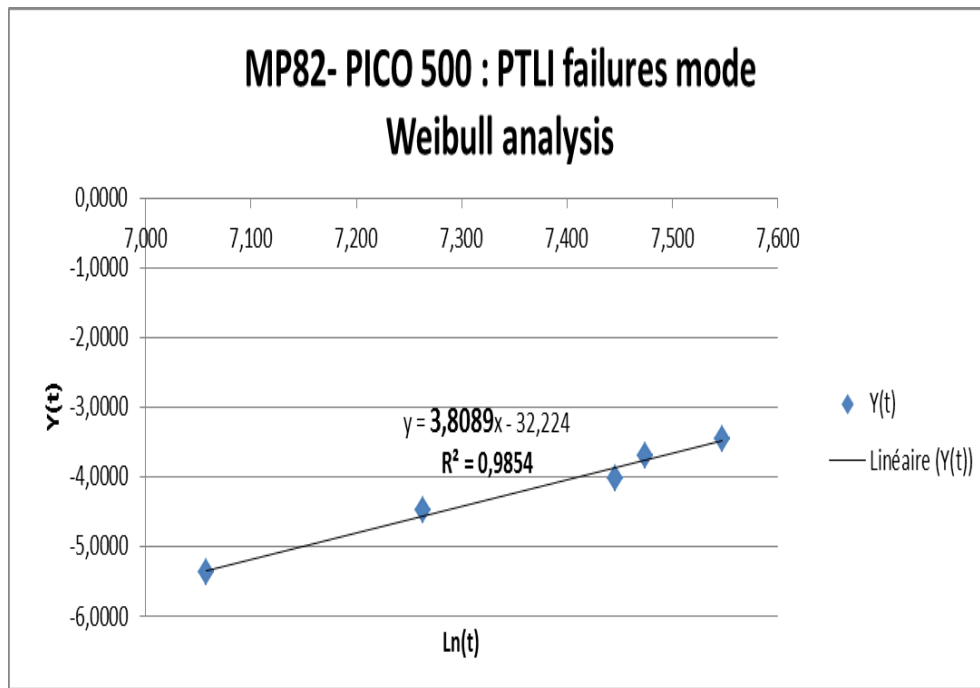


Figura 41 Análisis de fallos Weibull en tarjeta controladora de transistores de potencia.

- Se observa un coeficiente de correlación de 0.98 lo cual indica que la distribución Weibull aplica completamente.
- Y se obtiene un valor $\beta = 3.80$, que confirma el envejecimiento de la tarjeta controladora de IGBT (PTLI), así como una $\eta = 4817$ días.

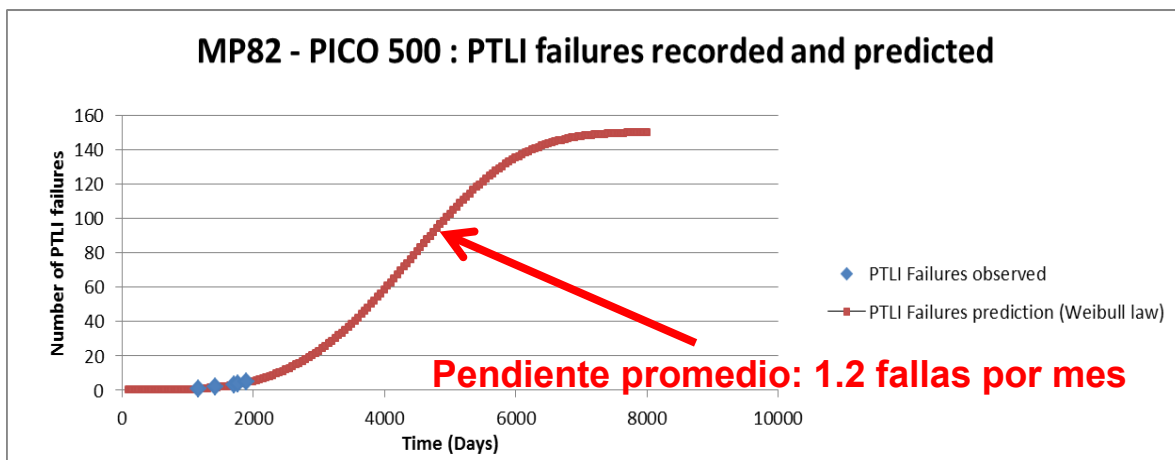


Figura 42 Modelo predictivo de fallos en tarjeta controladora de transistores de potencia.

- 99% de la flota estará fuera de servicio después de 7200 días de operación (20 años).

De lo anterior se deduce que para el caso práctico anterior los IGBT se confirma que han pasado de estar en su vida útil y han pasado a su fase de envejecimiento, por lo que es necesario reemplazarlos y/o realizar mejoras en su diseño.

Para realizar dichas mejoras y verificar la razón de que hayan llegado al fin de su vida útil se utilizará el siguiente diagrama de Ishikawa.

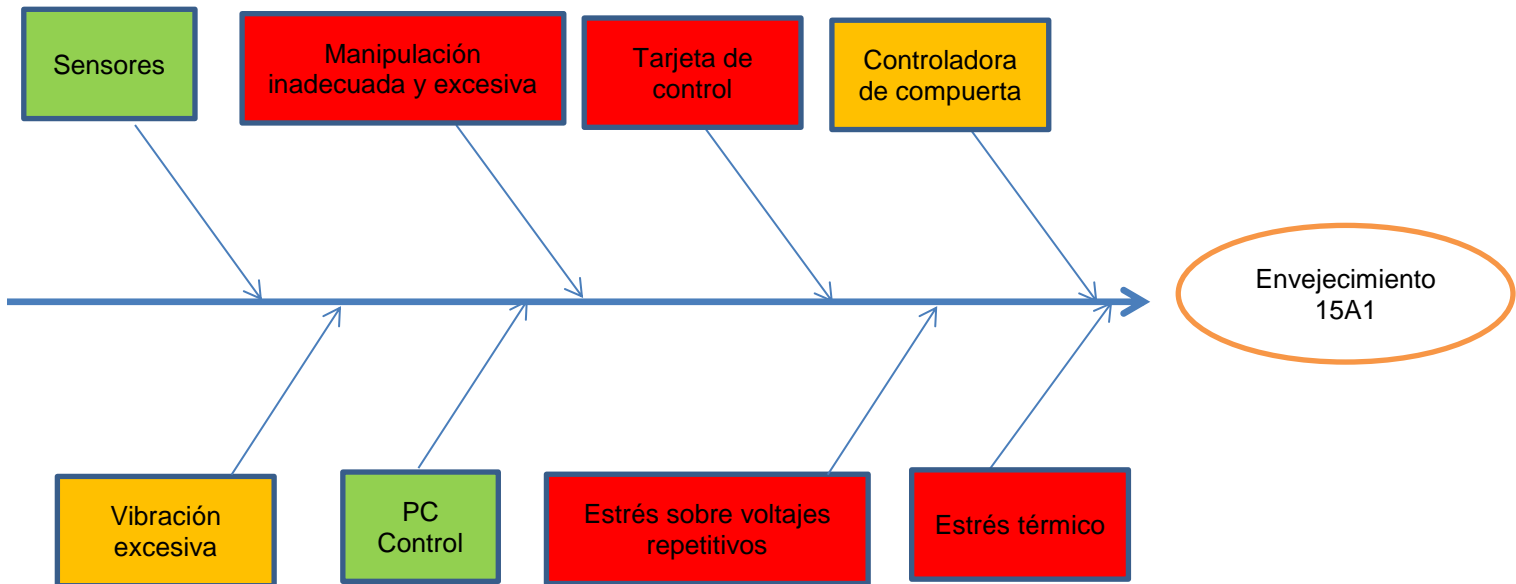


Figura 43 Diagrama Ishikawa para fallos de módulo de transistores.

Estudios posteriores revelarían como causas raíz el estrés térmico, los sobre voltajes repetitivos y la manipulación inadecuada y excesiva, a fin de corregir y subsanar dichas deficiencias se tomaron las siguientes acciones.

A fin de evitar el sobre voltajes excesivos y frecuentes se bajó el índice nominal de voltaje en las subestaciones que proveen del voltaje de trabajo a los equipos de potencia de tracción, mismos que estaban diseñados para trabajar con equipos de menor eficiencia razón por la cual requerían mayor potencia y voltaje por consecuencia.

Como solución al estrés térmico se colocaron ventiladores que si bien no descendían la temperatura distribuían el aire alrededor del cofre a fin de mejorar y evitar los gradientes extremos de temperatura entre dos zonas de dicho encofrado.

Manipulación inadecuada y excesiva, la revisión rutinaria de dicho equipo fue eliminada de los planes de mantenimiento y en el caso de ser requerida se utilizaría equipamiento adecuado para equipos electrostáticamente sensibles, posterior a ello la tasa de fallas que era de 1.2 fallas al mes, descendió a 0.2 fallas/mes, siendo exitosas las acciones y resultados.

Caso #2

Cada tren en promedio recorre entre 13 y 15 vueltas al día, esto implica alrededor de 30 cambios de asignación de contactos en el contactor de sentido de marcha que no es otra cosa más que un puente H mecánico, como se observa a continuación

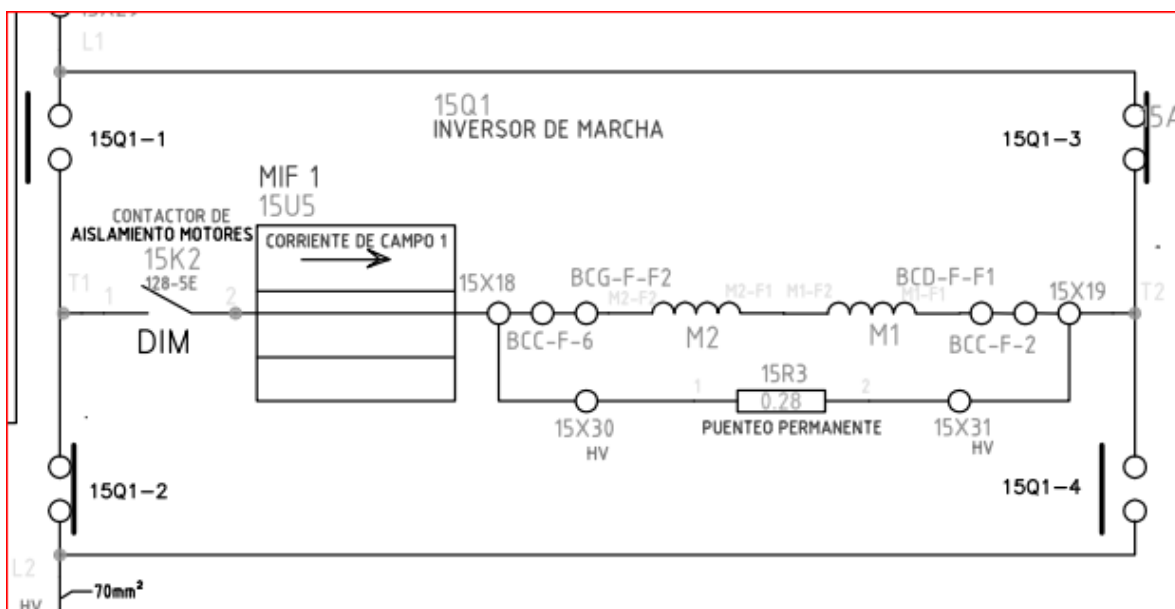


Figura 44 Circuito eléctrico inversor de sentido de marcha y contactor aislador de motores DC.

Se puede observar en la figura que los contactos 2 y 3 están asignados del contactor 15Q1, que es el puente H previamente mencionado, también se observa un contacto N/A este contacto es un contacto de potencia que corresponde a la necesidad de poder evitar una autoexcitación por parte de los campos del motor de DC en caso de falla, como lo pudiera ser una pérdida de excitación en dichos campos, este contactor 15K2 también conocido como DIM, solo pasa a su estado Cerrado, posterior a la asignación de un sentido de marcha de manera que garantiza que siempre que sea asignado la corriente el circuito y sentido de corriente a través de los campos del motor han sido asignados.

Del promedio de 13 a 15 vueltas recorridas por un tren durante una jornada se obtiene un total de entre 25 y 30 accionamientos del DIM a lo largo del día. La computadora principal del sistema de tracción tiene un sistema de monitoreo que indica cuantas veces se ha realizado dicho accionamiento, como se muestra a continuación.

Boolean;DIM_CLOSED;Número de veces que el contactor de aislamiento del motor 'DIM' está cerrado;;6944;0;0;NONE

Figura 45 Contador accionamiento de contacto aislador de campo de motores DC.

Sin embargo y posterior a llevar a cabo un registro por cada carro motriz (M o N) se observó que el promedio de dichos accionamientos se encontraba alrededor de 50-70

Aperturas por día	165000
	Contador Dim
-	16/02/2018
53	8548
55	8922
53	8567
54	8914
56	9057
53	8584

Figura 46 Promedio de operaciones diarias contactor aislador de campo de motores DC.

Debido a que el número de actuaciones y el esquema de control de dicho contactor está relacionado con el número de solicitudes de cambio de sentido de marcha se monitorearon las señales de solicitud de cambio de sentido de marcha provenientes de la cabina de los trenes encontrándose lo siguiente.

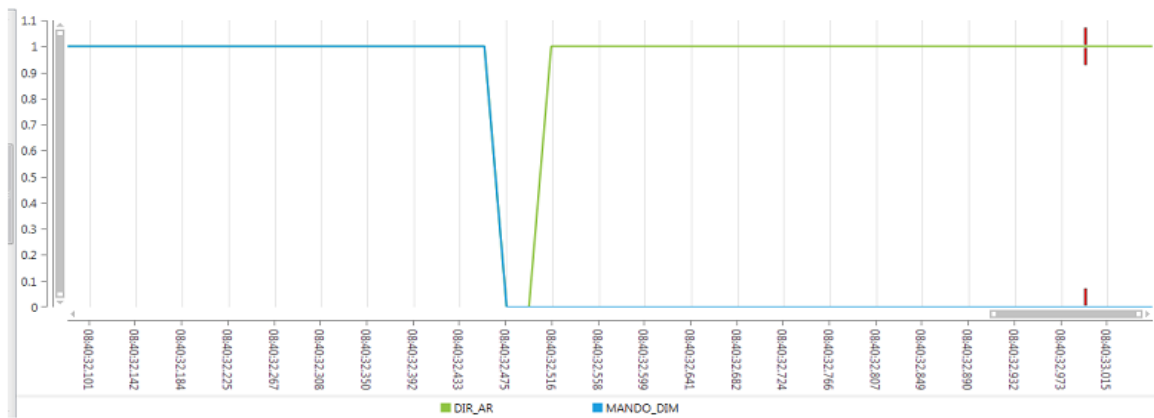


Figura 47 Secuencia accionamiento contactores durante cambio de sentido de marcha.

En esta imagen se observa que existe una oscilación en la señal de comando de sentido de marcha (DIR_AR, sentido de marcha hacia atrás) de 60 [ms], provocando aperturas no controladas en dicho actuador. La solución que se propuso fue la siguiente.

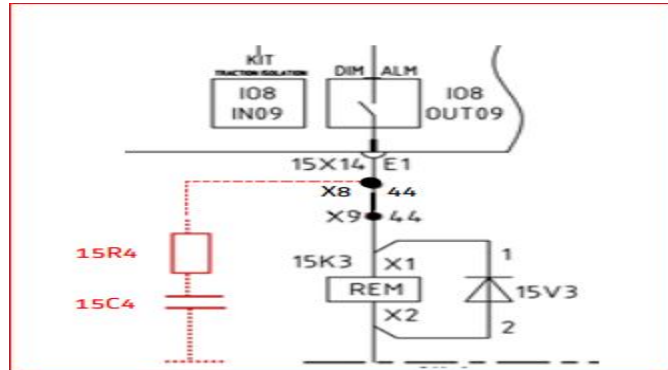


Figura 48 Filtro RC para señal de cambio de sentido de marcha.

Donde la bobina REM corresponde al relevador encargado de energizar al contactor, el cual a su vez proviene de un relevador en la tarjeta de entradas y salidas de la computadora controladora de la tracción, podemos observar que al cerrarse el contacto DIM_ALM tiene dos funciones ahora, energizar el relevador REM y cargar el capacitor circuito RC en rojo, abrirse el contacto DIM_ALM, el relevador REM se mantiene energizado por la descarga del circuito 15R4 y 15C4, se propuso una constante de tiempo superior a 1 [s] a fin de garantizar que el contactor solo obedeciera los comandos que permanecieran estables durante más de un segundo.

Dicha solución fue implementada mediante el sistema de calidad 5M y su HOE fue generada como se ejemplifica a continuación.

Emplear los borneros disponibles, colocar la resistencia 15R4 y capacitor 15C4.

Figura 4 Panel de Resistencia y Capacitor.

Soldar las terminales de los componentes en los borneros disponibles. La polaridad del capacitor la terminal positiva va orientada hacia arriba(ver figura 4).¹

a. Para el capacitor 15C4:1 (+) positivo, 15C4:2 (-) negativo.

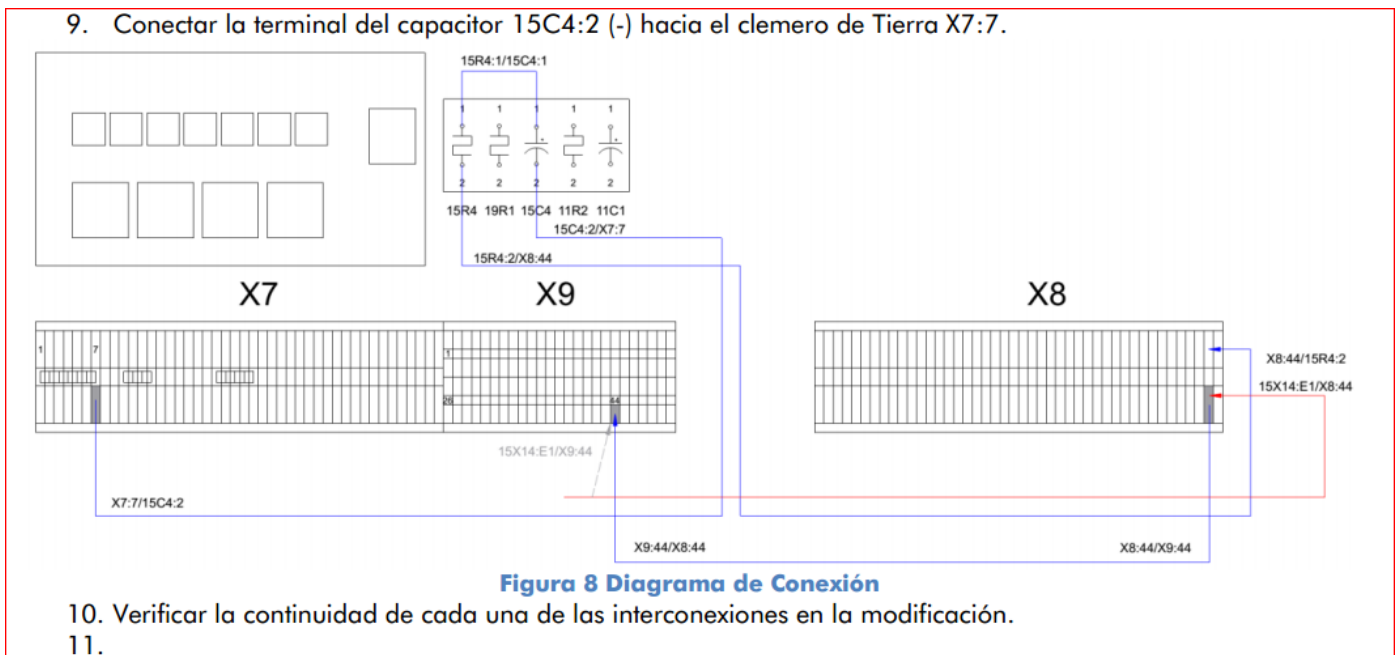
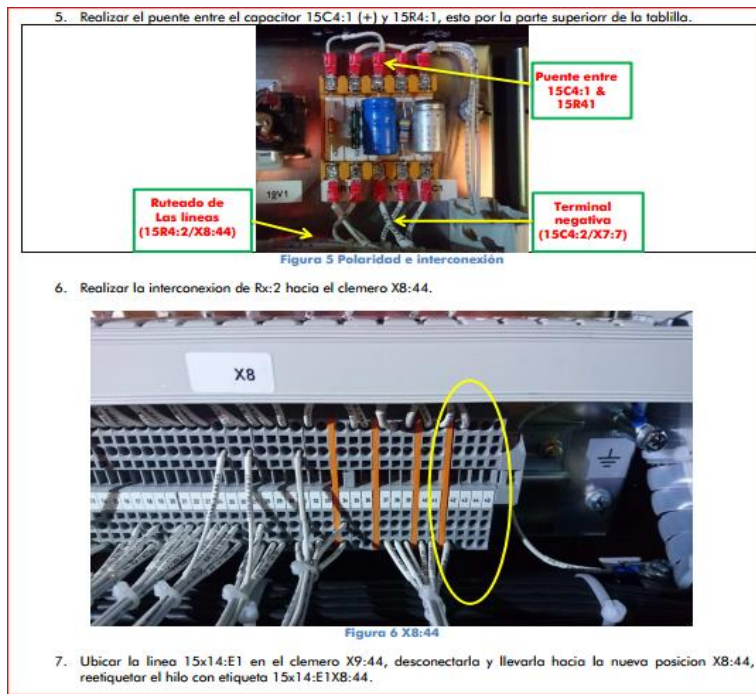


Figura 49 Ejemplo de HOE (Hoja de operación estándar).

Esta solución como se puede observar corresponde exclusivamente al hardware sin embargo una modificación también debió ser realizada en el software controlador a fin de que no detectara como falla y reaccionara de acorde a dicha temporización ya que el software monitorearía que el corto la variable DIM_ALM y que el contactor permanece cerrado durante un segundo más, el resultado de dicha modificación fue el siguiente.

-	20/03/2018
27	9400
27	9800
27	9438
26	9750
26	9899
27	9456

Figura 50 Promedio de accionamientos de contactor con señales de mando filtradas.

En donde se puede observar que los accionamientos de dicho actuador se redujeron a la mitad y ya corresponden con el número de accionamientos y vueltas que recorre alargando así la vida útil del contactor DIM y alargando así el tiempo requerido entre mantenimientos para dicho equipo.