



**Análisis de modos y efectos de falla (FMEA) en equipos de criticidad 1 de la empresa H.B  
Fuller Colombia S.A.S**

Jonny Andrés Gallo Marín

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesores

Giovanny Cano Muriel, Ingeniero Mecánico

Daniel Montoya Osorio, Ingeniero Mecánico

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

---

Cita	Gallo Marín [1]
<b>Referencia</b>	[1] J.A. Gallo Marín, “Análisis de modos y efectos de falla (FMEA) en equipos de criticidad 1 de la empresa H.B Fuller Colombia S.A.S”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.

Estilo IEEE (2020)

---



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Pedro León Simancas.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## Agradecimientos

Agradezco primeramente a **Dios** por todas las bendiciones recibidas a lo largo de mi vida, y por iluminar siempre mi camino. También agradezco a mi familia por brindarme su apoyo en los buenos y malos momentos y por darme la oportunidad de estudiar y formarme profesionalmente. Agradezco muy especialmente a mi asesor interno **Giovanny Cano Muriel** y a mi asesor externo **Daniel Montoya Osorio** porque gracias a sus conocimientos, consejos y enseñanzas me guiaron a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados deseados.

Agradezco a la empresa **H.B Fuller Colombia** por brindarme la oportunidad de realizar mis prácticas académicas en sus instalaciones y por inculcarme sus principios y valores, los cuales serán muy importantes en mi vida personal y profesional. Agradezco a toda la comunidad universitaria, y en particular, a mis profesores por su dedicación y pasión con la que nos transmiten sus conocimientos para convertirnos en unos profesionales formados con la misión y visión del Alma Máter. Finalmente, agradezco a mis amigos y compañeros con los que compartí en el campus universitario por todas las experiencias vividas.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	7
I. INTRODUCCIÓN .....	8
II. OBJETIVOS .....	10
A. Objetivo general .....	10
B. Objetivos específicos .....	10
III. MARCO TEÓRICO .....	11
IV. METODOLOGÍA .....	16
C. Recopilación de la información sobre los equipos .....	16
D. Identificación y realización de listado de funciones y fallas de los equipos .....	17
E. Evaluación y jerarquización de las fallas de los equipos .....	18
F. Definición de acciones recomendadas y/o mejoras en el plan de mantenimiento .....	19
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	20
VI. CONCLUSIONES .....	27
VII. REFERENCIAS .....	29

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1 ESCALA DE CRITERIOS DE SEVERIDAD .....	21
TABLA 2 ESCALA DE CRITERIOS DE OCURRENCIA.....	22
TABLA 3 ESCALA DE CRITERIOS DE DETECTABILIDAD .....	21
TABLA 4 ESCALA DE CRITICIDAD PARA LAS FALLAS SEGÚN EL RPN .....	21
TABLA 5 RESUMEN DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD .....	21
TABLA 6 RESUMEN DE LOS MODOS DE FALLA DE LOS FMEA .....	21
TABLA 7 LISTA DE LOS SUBSISTEMAS AFECTADOS POR LOS MODOS DE FALLA...	23
TABLA 8 CAMBIOS EFECTUADOS EN EL PLAN DE MANTENIMIENTO .....	25

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Formato empleado para el análisis FMEA.....	13
Fig. 2. Plano de la planta H.B Fuller Colombia .....	16
Fig. 3. Funciones y fallas en formato de FMEA .....	17
Fig. 4. Evaluación de criterios y cálculo del RPN.....	18
Fig. 5. Distribución de Pareto de criticidad de los equipos.....	20
Fig. 6. Distribución de la criticidad de los modos de falla.....	22
Fig. 7. Distribución de los modos de falla C1 por subsistema .....	24
Fig. 8. Distribución de los modos de falla C2 por subsistema .....	24
Fig. 9. Distribución de los modos de falla C3 por subsistema .....	25

## RESUMEN

En este informe realizado se muestran los resultados obtenidos luego de llevar a cabo un análisis de modos y efectos de falla en los equipos de criticidad 1, los cuales fueron previamente definidos mediante un análisis de criticidad en la planta de H.B Fuller Colombia.

El área de mantenimiento de la planta, actualmente se enfrenta principalmente al reto de realizar la gestión del mantenimiento de acorde con los estándares internacionales de la compañía, esto implica la necesidad de conocer a fondo todos los equipos, en aspectos como: Fichas técnicas y repuestos, las fallas y que tan críticas pueden ser si llegan a ocurrir, y, por último, que mantenimientos preventivos y con que periodicidad se requieren.

Para afrontar estos nuevos retos, el líder de mantenimiento (Daniel Montoya Osorio) ha venido implementando la metodología de mantenimiento RCM (mantenimiento basado en la confiabilidad), iniciando con un análisis de criticidad de los equipos, cuyo resultado los permitió clasificar en los niveles 1,2 y 3, donde el nivel 1 es el más crítico y el nivel 3 el menos crítico. Como segundo paso en la implementación del RCM en la planta, se continuó con la realización de un análisis de modos y efectos de falla (FMEA) en los equipos de criticidad 1 con la finalidad de registrar todas las fallas, jerarquizarlas y determinar las acciones recomendadas para mitigarlas y prevenirlas.

El FMEA busca recopilar toda la información acerca de las fallas de los equipos y evaluarlas mediante 3 criterios (severidad, ocurrencia y detectabilidad), con el fin de jerarquizar dichas fallas en función de un parámetro conocido como RPN (número prioritario de riesgo por sus siglas en inglés), el cual se calcula según los 3 criterios mencionados anteriormente. Este análisis permitió identificar oportunidades de mejora en el plan de mantenimiento que actualmente ejecuta el área encargada, cuales repuestos son necesarios tener en stock y, además, permitió conocer cuáles de esas fallas son críticas para la seguridad, productividad y calidad de la empresa.

## I. INTRODUCCIÓN

H.B Fuller es una compañía multinacional fundada en 1887 por Harvey Benjamin Fuller, se dedica desde entonces al desarrollo y fabricación de adhesivos industriales, particularmente en la planta de Colombia, adhesivos a base de aceite mineral (línea Hot Melt) y adhesivos a base de agua (línea PVA).

El equipo de mantenimiento de la compañía ha venido trabajando en la implementación de la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), esto con el fin de encaminar la planta en el mediano plazo desde mantenimientos reactivos y correctivos hacia mantenimientos preventivos, y en el largo plazo hacia mantenimientos predictivos. Para ello, inicialmente se realizó un análisis de criticidad, en el cual se hizo un inventario de todas las máquinas y equipos de la planta, posteriormente, se evaluaron y clasificaron mediante una matriz de criticidad, la cual fue construida considerando y evaluando 5 aspectos fundamentales para la compañía como lo son: impactos en la seguridad, el medio ambiente, el mantenimiento y producción, la calidad, y los costos anuales. Una vez evaluada cada máquina o equipo, se realizó un análisis de Pareto, en el que se clasificaron todas las máquinas y equipos en niveles de criticidad 1,2 y 3, siendo el nivel 1 el más crítico y el nivel 3 el menos crítico [1].

El siguiente paso, siendo este en el que se centra el presente trabajo de grados, es realizar un análisis de modos y efectos de falla (FMEA) a las máquinas y equipos de criticidad 1. Inicialmente, se realizó una recopilación de información en la literatura sobre el análisis FMEA, esto con el fin de construir un punto de partida hacia una buena realización del análisis. Luego de esto, se conformó un equipo de trabajo encargado de realizar el análisis, el cual estuvo compuesto por el Ingeniero líder de mantenimiento, una ingeniera y diseñadora de instalaciones industriales, un coordinador de mantenimiento y seguridad, un técnico de mantenimiento y el practicante de mantenimiento, para un total de 5 personas.

El análisis FMEA consistió en realizar un listado de todas las funciones que son consideradas importantes por la compañía en las máquinas y equipos de criticidad 1, luego, se realizó un listado de las potenciales fallas funcionales que pudiesen ocurrir, seguidamente, se enlistaron todos los modos de falla que conlleven a ocasionar cada falla funcional, en este caso se consultaron las hojas de vida de los equipos, la información contenida en el software de



mantenimiento que emplea la compañía, manuales de los equipos, órdenes de servicio en las cuales se registran las intervenciones que realiza el personal de mantenimiento y se consultó al personal de mantenimiento mismo sobre los modos de falla que son de su conocimiento. Luego de esto, se determinó el efecto de falla a cada uno de los modos de falla, describiendo en este aspecto todo aquello que pueda ocurrir si se da el modo de falla. Luego se hizo un listado de las causas que pueden provocar los modos de falla, y finalmente, se registraron los controles o acciones de prevención con los que cuenta el equipo de mantenimiento para evitar que ocurran los modos de falla. Una vez realizado esto, se evaluaron 3 criterios para cada modo de falla, cuya escala va del 1 al 10, los cuales son: severidad, ocurrencia y detectabilidad. La severidad evalúa que tan grave es el efecto de la falla, la ocurrencia evalúa que tan repetitivo es que una causa ocasione un modo de falla y la detectabilidad evalúa que tan efectivos son los controles para evitar los modos de falla. Por último, se determinó un número prioritario de riesgo (RPN por sus siglas en inglés) para jerarquizar en orden de importancia todos los modos de falla y de esta forma generar un plan de acciones recomendadas para disminuir los valores de severidad, ocurrencia y detectabilidad, y así recalcular el nuevo RPN.

Con el tiempo la idea es repetir de forma regular el análisis FMEA formando un ciclo de mejora continua.

## II. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Realizar un análisis FMEA a los equipos de criticidad 1 previamente evaluados y clasificados, con el fin de jerarquizar las fallas y generar rutas de acción y mejora en los planes de mantenimiento para mitigarlas y eliminar aquellas que sean posibles.

### *B. Objetivos específicos*

- Realizar lista de las funciones principales en los equipos de criticidad 1.
- Definir e identificar las fallas, modos de falla, sus causas y sus efectos en los equipos.
- Determinar el número prioritario de riesgo (RPN) para los principales modos de falla a partir de la severidad, ocurrencia y detección de estos.
- Jerarquizar e identificar las fallas más críticas que afecten la seguridad, productividad o calidad en la planta.
- Generar planes de mantenimiento para atender los modos de falla de mayor riesgo, sometiéndolos a ciclos de mejora continua.

### III. MARCO TEÓRICO

El análisis de modos y efectos de falla (FMEA), es una herramienta desarrollada y empleada para definir e identificar fallos potenciales o conocidos, así como para evaluar y clasificar de manera objetiva sus efectos, causas y elementos de identificación, para de esta forma evitar su ocurrencia y tener un registro documentado de prevención [2].

Existen diferentes tipos de FMEA dependiendo de la aplicación en la que se emplea el análisis, algunos de ellos son:

- **FMEA de concepto:** Se emplea en sistemas o subsistemas que están en las fases iniciales antes del diseño.
- **FMEA de diseño:** Se emplea en sistemas o subsistemas que se encuentran en la fase de diseño y antes del prototipo y producción.
- **FMEA de proceso:** Se emplea en el análisis de los procesos de fabricación y montaje.
- **FMEA de máquinas y equipos:** Se emplea en el análisis de maquinaria y equipos para mejorar su eficacia y calidad.
- **FMEA de sistemas:** Se emplea en el análisis del sistema y sus funciones específicas.
- **FMEA de software:** Se emplea en el análisis de las funciones del software.
- **FMEA de servicio:** Se emplea en el análisis de los procesos del sector servicios antes de que sean puestos en marcha y el impacto de los fallos probables sobre el cliente o consumidor.

Para entender y llevar a cabo de forma adecuada este análisis, es necesario definir los siguientes conceptos:

- **Función de una máquina o equipo:** Son las acciones o actividades que se desean que realice una máquina o equipo. Para describir las funciones es necesario que estas estén compuestas por un verbo en infinitivo, seguido de un objeto y finalmente, un rango de estándar de funcionamiento en el que se desea que opere la máquina o equipo. Por ejemplo, una función de una bomba de agua sería: Suministrar caudal de agua entre 80 a 100 galones por minuto.

- **Falla funcional:** Es el estado en el cual una máquina o equipo opera por fuera del estándar de funcionamiento deseado. Las fallas funcionales pueden ser parciales, intermitentes o totales. Por ejemplo, una falla funcional parcial en la bomba de agua sería: suministro de caudal de agua inferior a 80 galones por minuto.
- **Modo de falla:** Un modo de falla es una forma o manera posible en la que una máquina o equipo puede presentar una falla funcional. Para describir un modo de falla es necesario que estos estén compuestos por un objeto, seguido de un adjetivo calificativo o verbo y finalmente, un porqué del modo de falla. Por ejemplo, un modo de falla de la bomba de agua sería: Eje de la bomba doblado por cargas desequilibradas.
- **Efecto de falla:** Es la descripción del impacto de un modo de falla en la operación, función, sistema o proceso, entre otros. Por ejemplo, un efecto de falla de la bomba de agua sería: La carencia de flujo de agua puede provocar un sobrecalentamiento en los procesos de corte de una planta que realiza operaciones de maquinado.
- **Causa:** Son aquellas circunstancias en las cuales se conduce a un modo de falla. Por ejemplo, una causa para el eje doblado en la bomba de agua sería: correa de transmisión desalineada.
- **Severidad:** Determina cuan grave es el efecto de un modo de falla. Generalmente se tienen en cuenta impactos en la seguridad, el medio ambiente, la productividad y la mantenibilidad.
- **Ocurrencia:** Determina la repetitividad de una causa de falla en el tiempo.
- **Detectabilidad:** Determina que tan efectivos son los controles o acciones preventivas en la identificación de modos de falla antes de que estos ocurran.

Teniendo en cuenta estos conceptos, ya es posible iniciar el análisis FMEA. Para este análisis existen una serie de formatos sugeridos, los cuales son todos muy similares, en la figura 1 se muestra el formato empleado para realizar el análisis FMEA.



	tiempo muerto de producción o productos defectuosos por un máximo de 60 minutos
7	La falla genera un paro de la máquina o equipo entre 2 a 4 horas o la falla genera un tiempo muerto de producción o productos defectuosos por un máximo de 2 horas
8	La falla genera un paro de la máquina o equipo mayor a 8 horas o la falla genera un tiempo muerto de producción o productos defectuosos mayor a 2 horas
9	Afecta la seguridad del operario, personal de mantenimiento o la planta. Incumplimientos de regulaciones gubernamentales con advertencia
10	Afecta la seguridad del operario, personal de mantenimiento o la planta. Incumplimientos de regulaciones gubernamentales sin advertencia

- **La ocurrencia de las causas de falla:** Se evalúa en una escala del 1 al 10 donde el 1 es la menor frecuencia de repeticiones de la causa y el 10 es la mayor frecuencia de repeticiones de la causa. En la tabla 2 se muestra la definición los criterios para la ocurrencia.

TABLA 2  
ESCALA DE CRITERIOS DE OCURRENCIA

Ocurrencia	Descripción
1	La falla ocurre cada 5 años
2	La falla ocurre cada 2 años
3	La falla ocurre cada año
4	La falla ocurre cada 6 meses
5	La falla ocurre cada 3 meses
6	La falla ocurre cada mes
7	La falla ocurre cada semana
8	La falla ocurre cada día
9	La falla ocurre cada turno de trabajo
10	La falla ocurre cada hora o menos

- **La detectabilidad de los controles:** Se evalúa en una escala del 1 al 10 donde el 1 es la mayor efectividad y el 10 es la menor efectividad. En la tabla 3 se muestra la definición los criterios para la detectabilidad.

TABLA 3  
ESCALA DE CRITERIOS DE DETECTABILIDAD

Detectabilidad	Descripción
1	No se requieren controles en las máquinas o equipos. Los controles de diseño siempre detectarán una potencial causa y subsecuente falla
2	No se requieren controles en las máquinas o equipos. Los controles de diseño casi siempre detectarán una potencial causa y subsecuente falla
3	Los controles en las máquinas o equipos siempre podrán prevenir una falla inminente y detectar la causa
4	Los controles en las máquinas o equipos casi siempre podrán prevenir una falla inminente y detectar la causa
5	Los controles en las máquinas siempre podrán dar un indicador de una falla inminente
6	Los controles en las máquinas casi siempre podrán dar un indicador de una falla inminente
7	Los controles en las máquinas siempre identificarán las causas y los modos de falla después de que estos ocurren, pero no podrán preverlas
8	Los controles en las máquinas casi siempre identificarán las causas y los modos de falla después de que estos ocurren, pero no podrán preverlas
9	Los controles en las máquinas por lo regular identificarán las causas y los modos de falla después de que estos ocurren, pero no podrán preverlas
10	Los controles de diseño actuales no pueden detectar causas potenciales o no existen controles de diseño disponibles

Estos criterios fueron definidos mediante una serie de reuniones realizadas en conjunto con las áreas de mantenimiento, producción, calidad y seguridad. Una vez asignados los valores de los criterios antes mencionados, se procede a calcular el RPN (número prioritario de riesgo), este número se calcula como el producto de la severidad, ocurrencia y detectabilidad, teniendo su valor mínimo en 1 y su valor máximo en 1000, en este caso es posible jerarquizar y priorizar aquellos modos de falla con el mayor valor de RPN [3].

Finalmente, se plantean acciones recomendadas para atender dichos modos de falla de mayor riesgo con el fin de reducir el valor del RPN y se reevalúan nuevamente los criterios de severidad, ocurrencia y detectabilidad y se repite el análisis para realizar así un ciclo de mejora continua.

## IV. METODOLOGÍA

### C. Recopilación de la información sobre los equipos

Como punto de partida para la recolección de información sobre los equipos de la compañía, se realizó un recorrido de reconocimiento por la planta guiado por los técnicos de mantenimiento, el cual permitió tener un primer contacto con los equipos de criticidad 1 y así poder identificar el contexto de operación y algunas de sus funciones. En la figura 2 se muestra la distribución de la planta para tener un punto de referencia de la ubicación de los equipos.

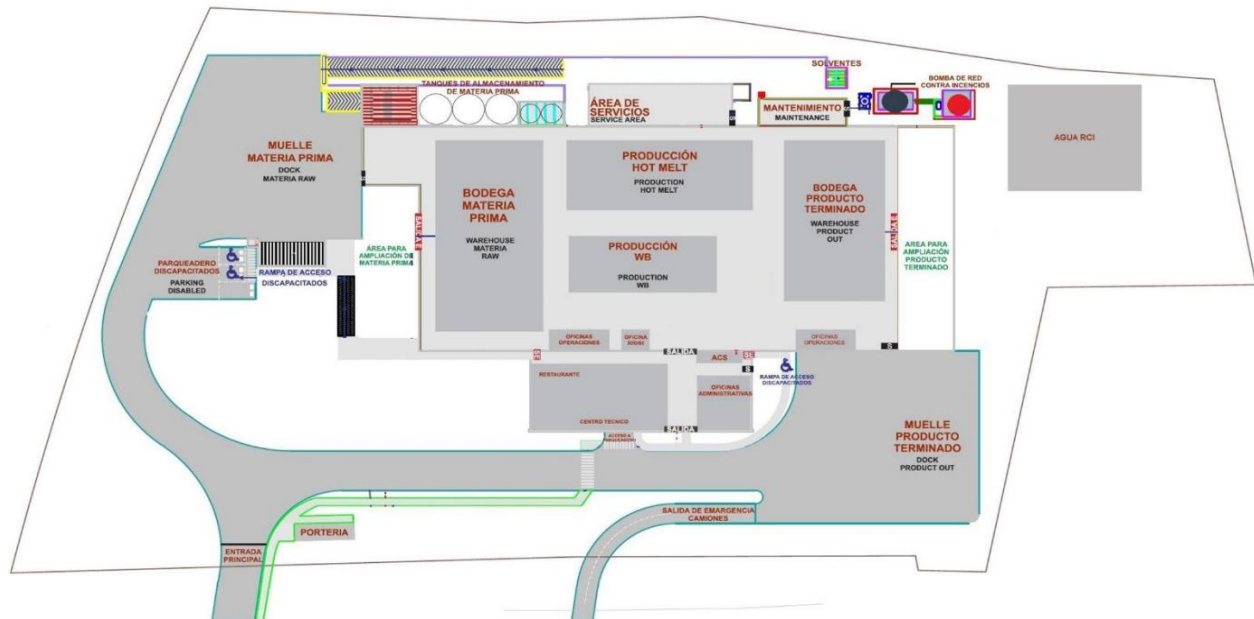


Fig. 2. Plano de la planta H.B Fuller Colombia

Luego de realizados los recorridos en planta, se continuó la recolección de información por medio de las hojas de vida de los equipos, gracias a estas se logró obtener información sobre los repuestos y algunas de las fallas más comunes de cada equipo. Adicionalmente, se recurrió a las órdenes de servicio, las cuales se almacenan tanto en físico como en formato digital y estas permitieron recopilar información sobre fallas menos comunes y el tiempo de reparación de aquellas fallas, siendo estos datos de vital importancia para el FMEA. Por último, se obtiene información a través del software de mantenimiento llamado “mantenimiento fácil”, el cual permitió conocer los mantenimientos preventivos y la periodicidad con la que se realizan.



Toda esta información sirvió como base para evaluar los criterios de severidad, ocurrencia y detectabilidad, a la vez que ayudó a identificar algunas de las fallas.

#### *D. Identificación y realización de listado de funciones y fallas de los equipos*

Una vez finalizada la etapa de recolección de información, se programaron 2 reuniones por semana (miércoles y viernes) durante todo el periodo de prácticas académicas, en las que el equipo de trabajo realizó el listado de las funciones principales y secundarias que se consideraron importantes para la compañía de cada uno de los equipos de criticidad 1, seguidamente se enlistaron todas las fallas y sus modos de falla con sus respectivas causas y métodos de detección si las había. En la figura 3 se muestra un segmento del formato del FMEA diligenciado con funciones y fallas asociadas a uno de los equipos de criticidad 1 de la empresa (calentador de aceite térmico).

SUBSISTEMA	FUNCIÓN	FALLA	MODO DE FALLA	EFEECTO DE FALLA	CAUSA
Quemador	Calentar aceite térmico hasta una temperatura entre 200 a 215 °C	Temperatura del aceite térmico inferior a 200 °C	Calentamiento ineficiente por fuga de combustible	No se alcanza la temperatura deseada en el aceite térmico y por consiguiente en los mixer, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos. Adicionalmente, la fuga de combustible genera un riesgo de incendio o explosión en la planta.	Conductos de combustible fisurados o rotos
Quemador	Calentar aceite térmico hasta una temperatura entre 200 a 215 °C	Temperatura del aceite térmico inferior a 200 °C	Calentamiento ineficiente por falta de aire	No se alcanza la temperatura deseada en el aceite térmico y por consiguiente en los mixer, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos. Reemplazar el filtro saturado implica detener el equipo y esto afecta la producción.	Filtro de aire saturado
Quemador	Calentar aceite térmico hasta una temperatura entre 200 a 215 °C	Temperatura del aceite térmico inferior a 200 °C	Calentamiento ineficiente por falta de aire	No se alcanza la temperatura deseada en el aceite térmico y por consiguiente en los mixer, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos. Reemplazar el ventilador implica detener el equipo y esto afecta la producción.	Aspas del ventilador rotas
Quemador	Calentar aceite térmico hasta una temperatura entre 200 a 215 °C	Temperatura del aceite térmico inferior a 200 °C	Calentamiento ineficiente por falta de aire	No se alcanza la temperatura deseada en el aceite térmico y por consiguiente en los mixer, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos. Adicionalmente, el eje desalineado puede generar un paro del equipo y su reparación requiere el cese de la operación.	Eje del ventilador desalineado
Quemador	Calentar aceite térmico hasta una temperatura entre 200 a 215 °C	Temperatura del aceite térmico inferior a 200 °C	Calentamiento ineficiente por falta de aire	No se alcanza la temperatura deseada en el aceite térmico y por consiguiente en los mixer, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos. Adicionalmente, los rodamientos desgastados del eje del ventilador pueden generar un paro del equipo.	Rodamiento del eje del ventilador desgastado
Quemador	Calentar aceite térmico hasta una temperatura entre 200 a 215 °C	Temperatura del aceite térmico inferior a 200 °C	Calentamiento ineficiente por falta de combustible	No se alcanza la temperatura deseada en el aceite térmico y por consiguiente en los mixer, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos. Adicionalmente, la falla en la válvula solenoide puede generar un paro del equipo.	Válvula solenoide de entrada de gas no abre por completo
Quemador	Calentar aceite térmico hasta una temperatura entre 200 a 215 °C	Temperatura del aceite térmico inferior a 200 °C	Calentamiento ineficiente por bajo caudal de mezcla aire-combustible	No se alcanza la temperatura deseada en el aceite térmico y por consiguiente en los mixer, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos, la obstrucción en la boquilla puede generar un paro del equipo y afectar la producción.	Boquilla del quemador obstruida

Fig. 3. Funciones y fallas en formato de FMEA

Cabe resaltar que como se muestra en la figura 3 una función puede tener varias fallas, y estas a su vez pueden tener diferentes modos de falla, los cuales también pueden tener diferentes causas. Esta situación provoca que el FMEA se pueda volver demasiado extenso y complejo si se analizan los equipos a una escala demasiado pequeña en su taxonomía, lo cual sería desfavorable en lugar de ser beneficioso, por esta razón se decidió analizar sólo aquellos componentes esenciales de cada equipo de la compañía en una primera instancia, para luego en un futuro

cuando se tenga consolidadas la metodología de mantenimiento RCM, se pueda profundizar en estos análisis en una escala menor de la taxonomía de los equipos.

#### *E. Evaluación y jerarquización de las fallas de los equipos*

Una vez finalizada la etapa de registro de funciones y fallas, el equipo de trabajo se reunió para evaluar cada una de ellas basándose en las escalas de criterio de severidad, ocurrencia y detectabilidad, previamente definidas y mostradas en las tablas 1,2 y 3. Luego de calificados cada uno de los criterios se calculó el número prioritario de riesgo (RPN por sus siglas en inglés), el cual es un número adimensional que permite conocer de forma objetiva cuan crítica es una falla en aspectos sobre todo como: la seguridad. calidad. productividad y medio ambiente, estos factores se encuentran implícitos en el criterio de severidad, el RPN se calcula con la siguiente expresión.

$$RPN = Severidad * Ocurrencia * Detectabilidad \quad (1)$$

El RPN permitió determinar cuales fallas son las más importantes, y de esta forma poder jerarquizarlas para atenderlas de forma organizada. En la figura 4 se muestra un segmento del formato FMEA diligenciado con los valores de los criterios y el cálculo del RPN.

EFECTO DE FALLA	VERIDAD	CAUSA	FRECUENCIA	MÉTODOS DE DETECCIÓN	DETECCIÓN	NPR
No se alcanza la temperatura deseada en el vapor de agua, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos.	4	Difusor bloqueado	3	Revisión periódica	2	24
No se alcanza la temperatura deseada en el vapor de agua, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos.	5	Ventilador desgastado	3	Revisión periódica	4	60
No se alcanza la temperatura deseada en el vapor de agua, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos.	4	Damper atascado	2	Revisión periódica	2	16
No se alcanza la temperatura deseada en el vapor de agua, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos.	6	Boquilla taponada	4	Revisión periódica	3	72
No se alcanza la temperatura deseada en el vapor de agua, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos.	8	Serpentin oxidado	2	Ultrasonido	2	32
No se alcanza la temperatura deseada en el vapor de agua, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos.	8	Incrustaciones en el serpentín	2	Ultrasonido	2	32
No se alcanza la temperatura deseada en el vapor de agua, lo cual puede afectar a la calidad de la producción y generar tiempos muertos.	9	Refractario partido	1	Revisión periódica	4	36
No se genera vapor, lo cual provoca que no exista calentamiento en la descarga de producto, y por tanto, se puede solidificar el producto y producir taponamientos.	7	Electrodo de ignición gas reventado	4	Revisión periódica	1	28

Fig. 4. Evaluación de criterios y cálculo del RPN

Una vez conocido el valor del RPN de cada falla, se determinó con el equipo de trabajo 3 niveles de criticidad para las fallas, donde el nivel 1 es el más crítico y el nivel 3 el menos crítico, esto con el fin de poderlas jerarquizar objetivamente. En la tabla 4 se muestra la escala para la clasificación de la criticidad de las fallas según el RPN.

TABLA 4  
ESCALA DE CRITICIDAD PARA LAS FALLAS SEGÚN EL RPN

Nivel de criticidad	Descripción	Criterio
1	Fallas críticas que deben ser atendidas lo más pronto posible. La falla compromete la seguridad, calidad, productividad o el medio ambiente.	RPN mayor a 250
2	Fallas no críticas pueden ser atendidas en paros de oportunidad o paros programados.	RPN entre 100 y 250
3	Fallas que no requieren intervención a menos que sean de fácil solución	RPN menor a 100

#### F. Definición de acciones recomendadas y/o mejoras en el plan de mantenimiento

Finalizada la etapa de evaluación y jerarquización de las fallas, se continuó con la definición de acciones recomendadas y/o mejoras en el plan de mantenimiento para cada una de

las fallas, esto con el fin de impactar principalmente en el valor de la ocurrencia y la detectabilidad y así disminuir el valor del RPN, sin embargo, no se recomienda disminuir el valor de la severidad dado que se puede llegar a cometer el error de subestimar la gravedad de las fallas. La definición de las acciones recomendadas y mejoras en el plan de mantenimiento busca mitigar y eliminar si es posible las fallas que pueden ocurrir y de esta manera mejorar la eficacia y desempeño de los equipos de la planta.

Esta definición de las acciones recomendadas se llevó a cabo por el equipo de trabajo del FMEA con la asesoría de algunos fabricantes y expertos, determinando la necesidad de realizar cambios en la periodicidad de los mantenimientos preventivos que en la actualidad realiza el área encargada, adicionalmente, se identificaron mantenimientos preventivos que no se tenían en el plan de mantenimiento, por lo que se añadieron al software “mantenimiento fácil” y se programaron según la periodicidad determinada. Finalmente, se encontraron una serie de repuestos críticos que se deben tener en stock por que son importados o por que según la falla se debe contar con dicho repuesto de forma inmediata.

Se busca que en el futuro se realice de nuevo el FMEA con el objetivo de hallar nuevas fallas que pudieron ser ignoradas anteriormente o que aparezcan por cambios en el contexto operacional de los equipos, también se busca reevaluar los criterios y recalcular el RPN con el fin de revisar la efectividad de las acciones recomendadas y las mejoras en el plan de mantenimiento, recordando que sólo se busca impactar en la ocurrencia y detectabilidad de las fallas.

La realización de los FMEA a los equipos de la empresa se debe realizar de forma continua de forma que se constituya un ciclo de mejora continua, y de esta manera se disminuyan constantemente los valores del RPN de las fallas y estas desaparezcan de forma gradual.

## V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Dado que el FMEA se realizó en los equipos de criticidad 1 de la empresa, es necesario conocer cuántos, y cuales son, por ello, en este apartado de resultados y análisis se iniciará mostrando los resultados obtenidos en el trabajo de análisis de criticidad realizado con anterioridad. En la figura 5 se muestra la distribución de Pareto de todos los equipos de la

compañía en los 3 niveles de criticidad y en la tabla 5 se muestra un resumen del análisis de criticidad.

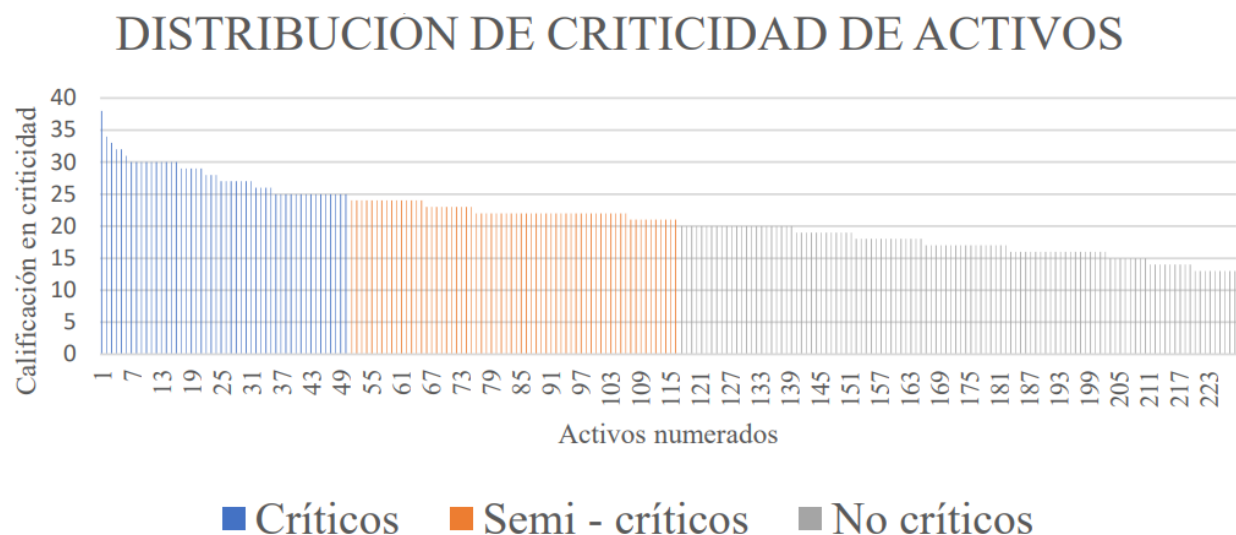


Fig. 5. Distribución de Pareto de criticidad de los equipos

TABLA 5  
RESUMEN DEL ANÁLISIS DE CRITICIDAD

Nivel de criticidad	Porcentaje de equipos	Número de equipos
Criticidad 1	22%	50
Criticidad 2	29%	66
Criticidad 3	49%	112
Total	100%	228

Nota: Tomado de J.P. Castellanos Cadena, “Análisis de criticidad de activos para la empresa HB Fuller Colombia S.A.S”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2021.

Luego de realizado el análisis de criticidad y el análisis de Pareto se obtuvo que 50 equipos, o lo que es lo mismo, el 22% de los equipos de la empresa son de criticidad 1. Esto implicó que se realizaran 50 FMEA (1 FMEA por cada equipo de criticidad 1), completando así el 100% de los equipos de criticidad 1, a continuación, se muestran los resultados obtenidos en este trabajo de grados.

En total se registraron 1739 modos de fallas distribuidos en los 50 equipos analizados, esto supone un aproximado de 35 modos de falla por equipo. Adicionalmente, estos 1739 modos de falla fueron jerarquizados en los 3 niveles de criticidad obteniendo que el 39% de ellos son de criticidad 1, el 47% son de criticidad 2 y el 14% son de criticidad 3. En la tabla 6 se muestra el resumen de los FMEA realizados y en la figura 6 se muestra la distribución de la jerarquización de los modos de falla.

TABLA 6  
RESUMEN DE LOS MODOS DE FALLA DE LOS FMEA

Nivel de criticidad	Porcentaje de modos de falla	Número de modos de falla
Criticidad 1	38%	661
Criticidad 2	47%	817
Criticidad 3	15%	261
Total	100%	1739



Fig. 6. Distribución de la criticidad de los modos de falla

De acuerdo con la tabla 6 y la figura 6, se tiene que hay 661 modos de falla cuyo valor de RPN es superior a 250 y que representan un alto riesgo en temas de seguridad, productividad, calidad y/o medio ambiente para la compañía en el caso de que se puedan presentar, sin embargo,

hay que tener en cuenta que, de estos 661 modos de falla, muchos son repetidos, pero ocurren en un equipo diferente, por lo que las acciones recomendadas también pueden repetirse en los equipos, y se pueden solucionar varios a la vez. Esto de igual forma ocurre con todos los modos de falla de criticidad 2 y de criticidad 3.

Dado que es posible agrupar los modos de falla en función de los subsistemas del equipo en que se originan, en la tabla 7 se muestran aquellos subsistemas que son mayormente afectados por los modos de falla.

TABLA 7  
LISTA DE SUBSISTEMAS MAYORMENTE AFECTADOS POR LOS MODOS DE FALLA

<b>Subsistema</b>	<b>Modos de falla C1</b>	<b>Modos de falla C2</b>	<b>Modos de falla C3</b>
Motores eléctricos	212 (32%)	89 (11%)	21 (8%)
Sistemas de transmisión	124 (19%)	56 (7%)	41 (16%)
Sistemas de control	177 (27%)	109 (13%)	7 (3%)
Válvulas, accesorios y tuberías	61 (9%)	101 (12%)	25 (10%)
Elementos mecánicos	19 (3%)	239 (29%)	70 (27%)
Sistema estructural	31 (5%)	95 (12%)	23 (9%)
Otros	37 (5%)	128 (16%)	74 (27%)
Total	661 (100%)	817 (100%)	261 (100%)

En las figuras 7,8 y 9 se muestran las distribuciones de los modos de falla según el subsistema de los equipos, teniendo los siguientes resultados:

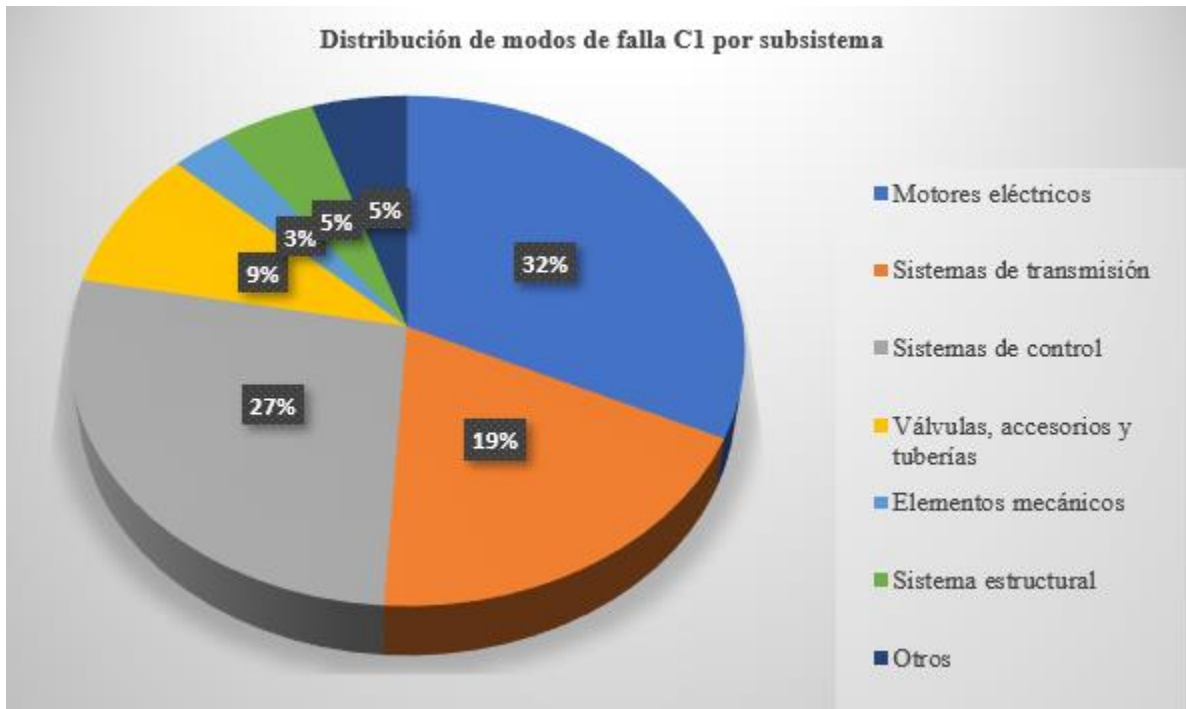


Fig. 7. Distribución de modos de falla C1 por subsistema

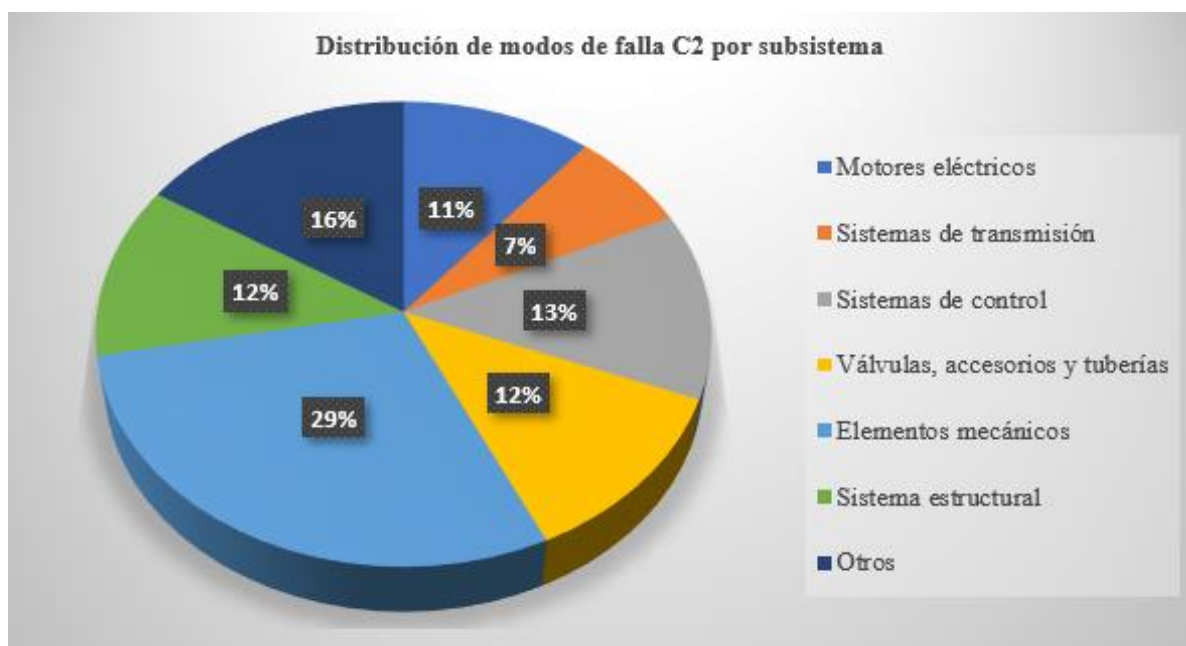


Fig. 8. Distribución de modos de falla C2 por subsistema



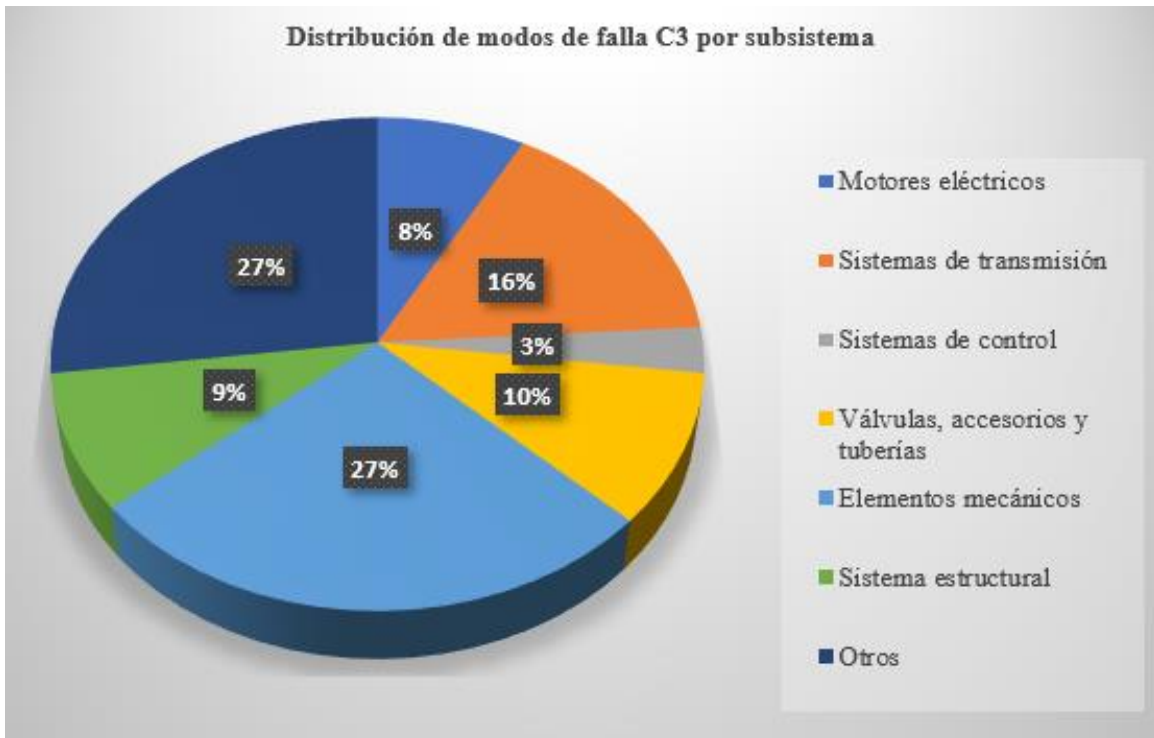


Fig. 9. Distribución de modos de falla C3 por subsistema

Gracias a estas distribuciones se encontró que se deben ajustar las periodicidades de los mantenimientos preventivos que se vienen realizando a los equipos, además, se identificó la necesidad de añadir nuevos mantenimientos preventivos que no se estaban realizando. Esta información se muestra en la tabla 8.

TABLA 8  
CAMBIOS EFECTUADOS EN EL PLAN DE MANTENIMIENTO

Mantenimiento preventivo	Periodicidad actual	Nueva periodicidad
Análisis de vibraciones en motores	6 meses	3 meses
Alineación y balanceo de motores y ejes	1 año	6 meses
Termografías en sistemas eléctricos y de control	6 meses	3 meses
Ensayos no destructivos en uniones soldadas	-	6 meses
Análisis con ultrasonido para medición de espesores	1 año	6 meses
Pruebas de drenaje de la red contra incendios	6 meses	3 meses

Inspección general de la red contra incendios	3 meses	1 mes
Pruebas de disparo y calibración de válvulas de alivio de calentador de aceite térmico	-	6 meses
Análisis fisicoquímico de agua del generador de vapor	3 meses	1 mes
Descarbonización de cabezotes de filtros de extrusora y aplicador Nordson	2 meses	1 mes
Revisión y certificación de las líneas de vida	5 años	3 años
Mantenimiento general en el motor Diesel de la bomba RCI	-	1 año

Aparte de estos cambios, se identificaron repuestos críticos que incluyen repuestos como: Empaquetaduras, cordones teflonados, válvulas actuadas, rodamientos de bolas y agujas, filtros, tornillería milimétrica en acero inoxidable, uniones flexibles, rodillos de nylon, entre otros.

## VI. CONCLUSIONES

Gracias a una extensa recopilación de información fue posible identificar y registrar una gran cantidad de modos de falla (1739 en total), la mayoría siendo redundantes en varios equipos de criticidad 1, por lo que se facilitó ajustar el plan de mantenimiento, de modo que este atiende con una única actividad de mantenimiento preventivo diversos modos de falla que son similares entre sí. Esto hace posible que efectuar las acciones recomendadas y las mejoras en los planes de mantenimiento sean más sencillos de implementar, dado que se reduce la necesidad de capacitar al personal de mantenimiento en un número muy amplio de actividades y, por ende, disminuyendo también los tiempos de intervención de los equipos.

La correcta jerarquización de los modos de falla a través de la buena definición de los criterios de severidad, ocurrencia y detectabilidad, se convierte en una herramienta muy poderosa para la buena implementación de las acciones recomendadas que, a su vez, repercuten en la disminución de la calificación de la ocurrencia y detectabilidad, impactando así al indicador del RPN y mejorando la eficacia y desempeño de los equipos.

Por medio de la actualización del plan de mantenimiento y las acciones recomendadas presentes en el FMEA, se logró la disminución de la frecuencia de mantenimientos correctivos, esto se puede medir por medio del cálculo de los tiempos muertos por paro de equipos críticos. En el mes de enero la totalidad de tiempos muertos fue de 42 horas, en el mes de febrero este indicador disminuyó hasta 39 horas de tiempos muertos y en el mes de marzo disminuyó hasta 31 horas de tiempos muertos.

Es completamente necesario someter estos FMEA a la constante revisión y actualización (por lo menos 1 vez cada 2 años), debido a que los cambios en el contexto operacional de los equipos pueden generar nuevos modos de falla y que las acciones recomendadas y planes de mantenimiento pierdan efectividad. Además, esta revisión constante permitirá que los FMEA sean objeto de la mejora continua y se vayan obteniendo cada vez más mejores resultados.

El FMEA es la antesala del siguiente paso de la implementación del RCM, el cual es el análisis de causa raíz (RCA por sus siglas en inglés) por lo que las buenas prácticas de recopilación de información y de análisis en los pasos previos son la clave del éxito en la ejecución de un RCM efectivo, también es importante involucrar a todo el personal de mantenimiento en el proceso, dado que aparte de los conocimientos que puede aportar cada persona, estas también reciben capacitación el entender de manera profunda el funcionamiento de los equipos.

La identificación de repuestos críticos y tener un inventario de ellos en stock es fundamental para poder responder de forma inmediata y efectiva una novedad en algún equipo, evitando así que la producción de vea afectada por largos intervalos de tiempos muertos, o incluso, eliminando el riesgo de que una falla pueda afectar la seguridad los empleados. Por ello, se hace indispensable conocer muy bien que repuestos son importados o tienen largos tiempos de entrega.

## VII. REFERENCIAS

- [1] J.P. Castellanos Cadena, “Análisis de criticidad de activos para la empresa HB Fuller Colombia S.A.S”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2021.
- [2] R. Keith Mobley, MBB, CMRP. “Maintenance Engineering Handbook”, Eighth Edition, McGraw-Hill Education, New York, 2014.
- [3] D.H. Stamatis, “Failure Mode and Effect Analysis FMEA from Theory to Execution”, Second Edition, ASQ, Milwaukee, 2003