

Metodología mixta de análisis de falla como práctica en la optimización de la gestión de mantenimiento para un sistema de secado de papel Tissue por campana de alto rendimiento.

Henryerth Starlein Durango Villadiego

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Gerencia de Mantenimiento

Director

PhD Heller Guillermo Sánchez Acevedo

Coordinador de Posgrados en Gerencia de Mantenimiento

Universidad Industrial de Santander UIS

Escuela de Ingeniería Mecánica

Comité de Postgrados Escuela de Ingeniería Mecánica

Maestría en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga - Santander

2024

Dedicatoria

A Dios primero que todo por su misericordia, a mis padres, mi familia que me mantuvo con la actitud positiva, a mis mejores maestros en la universidad de la vida, a la familia Unibol que sin duda hizo posible este milagro.

Tabla de Contenido

<i>Introducción</i> _____	11
<i>Capitulo I. Descripción Del Proyecto</i> _____	13
1.1. Planteamiento del problema _____	13
1.2. Objetivos _____	15
1.2.1. Objetivo general _____	15
1.2.2. Objetivos específicos _____	15
1.3. Justificación _____	16
1.4. Marco teórico _____	18
1.4.1. Metodología Mixta de Análisis de Falla _____	18
1.5. Estado Del Arte _____	33
<i>Capitulo II. Análisis Comparativo</i> _____	42
2.1. Entrevistas y manuales _____	43
2.2. Revisión del sistema mecánica, eléctrica/instrumentación y seguridades _____	44
2.3. Revisión de planos en campo. _____	45
2.4. Revisión de variables de montaje. _____	45
2.5. Resultados del analisis comparativo. _____	45
<i>Capítulo III. Metodología</i> _____	48
3.1. Fase # 1 Diagrama funcional - Plan de trabajo del equipo _____	48

	4
3.2. Diagrama funcional	49
3.3. Plan de trabajo del equipo AQQC	50
3.4. Fase # 2 diagrama o árbol de falla - Hipótesis	51
3.4.1. Fallas Primarias	51
3.4.2. Fallas secundarias	51
3.4.3. Fallas terciarias	52
3.4.4. Hipótesis	52
3.5. Fase # 3 Plan de trabajos causales	53
3.5.1. Análisis de la evaluación de las hipótesis	53
3.5.2. Guía de Diligenciamiento del Análisis AQQC	54
3.5.4. Evaluación del cierre del plan	55
3.6. Fase # 4 costos, presupuestos y seguimientos	56
<i>Capítulo IV. Aplicación de la Metodología AQQC</i>	57
4.1. Descripción de la falla	57
4.2. Aplicación del AQQC	58
4.3. Delimitación del análisis de falla	60
4.4. Análisis de falla de los equipos delimitados	61
4.5. Causa principal del problema.	64
4.6. Plan de actividades a ejecutar, solución de causas y posibles fallas futuras.	64
<i>Capítulo V. Simulación de la implementación Metodología AQQC.</i>	65

	5
5.1. Costo y presupuesto de la implementación _____	71
5. Conclusiones _____	74
6. Referencias Bibliográficas _____	76

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Comparativo de variables campana LH de alto rendimiento maquina Tissue</i>	46
Tabla 2. <i>Revisión de fallas en el sistema de campana de alto rendimiento CMMS</i>	62
Tabla 3. <i>Revisión de fallas en el sistema de campana de alto rendimiento ERP SAP MP</i>	63
Tabla 4. <i># de Fallas por años 2018 – 2023 en el sistema de campana</i>	63
Tabla 5. <i>Formato de ejecución de actividades</i>	65
Tabla 6. <i>Propiedades del material AISI409</i>	67
Tabla 7. <i>Propiedades del material AISI304L</i>	67
Tabla 8. <i>Datos de los equipos de entrada</i>	68
Tabla 9. <i>Condiciones de frontera CFD-FEM</i>	68
Tabla 10. <i>Propiedades del estudio</i>	69
Tabla 11. <i>Información de las cargas soportadas</i>	70
Tabla 12. <i>Cuadro Comparativo de los Costos Reparación, Fab. y Montaje</i>	71
Tabla 13. <i>Presupuesto montaje sistema de seguridad del equipo</i>	73

Lista de figuras

Figura 1. <i>Diagrama Causa y Efecto</i>	23
Figura 2. <i>Estructura de Árbol de fallos</i>	29
Figura 3. <i>Manual de operación y mantenimiento campana de alto rendimiento</i>	44
Figura 4. <i>Tablero de control y protecciones capota</i>	44
Figura 5. <i>Plano de montaje de fabricante</i>	45
Figura 6. <i>Sistema de dirección de un camión eléctrico EH5000</i>	50
Figura 7. <i>Implementación de análisis</i>	53
Figura 8. <i>Implosión del Ducto</i>	58
Figura 9. <i>Diagrama de Bloques Funcionales para secado de Papel Tissue por Campana de Alto Rendimiento</i>	59
Figura 10. <i>Plan de trabajo de actividades para el personal según la especialidad</i>	60
Figura 11. <i>Delimitación de análisis capota lado</i>	61
Figura 12. <i>Diagrama de Árbol de Fallos</i>	63
Figura 13. <i>Ducto quemador LH Campana de alto</i>	66
Figura 14. <i>Diagrama y temperaturas de trabajo del ducto LH</i>	67
Figura 15. <i>Trayectorias de flujo, máximo 853k (580°C) a la salida</i>	69
Figura 16. <i>Trazado de Von Mises a 580°C. Fabricación (Modo de falla)</i>	70
Figura 17. <i>Simulación de montaje de la seguridad del equipo SIL</i>	72

Glosario

Metodología Mixta: Un enfoque de investigación que combina técnicas cuantitativas y cualitativas para ofrecer una visión completa de un problema.

Datos Numéricos: Información que permite identificar patrones de fallas, frecuencia, gravedad, duración y costos asociados.

Análisis FMEA: Técnica cuantitativa para identificar y evaluar modos potenciales de falla y sus consecuencias.

Análisis de Causa Raíz: Metodología para identificar la causa fundamental de un problema y prevenir su recurrencia en la gestión de mantenimiento.

Campanas de Secado de Alto Rendimiento: Componentes específicos en sistemas de secado de papel Tissue diseñados para alcanzar altos niveles de eficiencia.

Resumen.

Título: Metodología mixta de análisis de falla como práctica en la optimización de la gestión de mantenimiento para un sistema de secado de papel Tissue por campana de alto rendimiento.

Autor: Henyerth Starlein Durango Villadiego

Palabras claves: Metodologías Mixtas, Análisis de Falla, Campana de secado

Descripción: Esta investigación aborda la optimización de la gestión de mantenimiento en sistemas de secado de papel Tissue, específicamente en campanas de secado de alto rendimiento, mediante la aplicación de una metodología mixta de análisis de falla. El estudio reconoce la complejidad y la importancia crítica de mantener la eficiencia operativa en la producción de papel Tissue, donde la fase de secado es fundamental para la calidad del producto final y la eficiencia energética del proceso.

La metodología propuesta combina técnicas cuantitativas y cualitativas para analizar fallas, incluyendo Análisis de Causa Raíz (RCA), Análisis Modal de Efectos y Fallas (FMEA), y técnicas de diagnóstico basadas en datos, como el monitoreo de condición y el análisis predictivo. El enfoque mixto permite una evaluación más integral de los fallos, identificando no solo las causas inmediatas, sino también las condiciones subyacentes y los factores sistémicos que contribuyen a las fallas.

La investigación implementó esta metodología en un estudio de caso de una planta de producción de papel Tissue, donde se analizaron varios incidentes de falla en la campana de secado. Los resultados destacaron cómo la combinación de análisis cuantitativo (a través de datos de monitoreo de máquinas y análisis estadístico) y cualitativo (mediante evaluaciones de expertos y revisión de procesos) puede ofrecer una comprensión más profunda de las fallas y facilitar el desarrollo de estrategias de mantenimiento más efectivas y preventivas.

En conclusión, la metodología mixta de análisis de falla demostró ser una herramienta valiosa en la mejora de la gestión de mantenimiento en los análisis de falla para sistemas de secado de papel Tissue. Los hallazgos sugieren que esta aproximación no solo mejora la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos, sino que también contribuye a una operación más sostenible y económicamente eficiente, resaltando la importancia de un enfoque integrado y multidisciplinario en la gestión de mantenimiento industrial.

Abstract.

Title: Mixed methodology of failure analysis as a practice in optimizing maintenance management for a high-performance hood Tissue paper drying system.

Author: Henyerth Starlein Durango Villadiego

Keywords: Mixed Methodologies, Failure Analysis, Drying Hood

Description: This research addresses the optimization of maintenance management in Tissue paper drying systems, specifically in high-performance drying hoods, through the application of a mixed methodology of failure analysis. The study recognizes the complexity and critical importance of maintaining operational efficiency in the production of Tissue paper, where the drying phase is fundamental for the quality of the final product and the energy efficiency of the process.

The proposed methodology combines quantitative and qualitative techniques for failure analysis, including Root Cause Analysis (RCA), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), and data-based diagnostic techniques, such as condition monitoring and predictive analysis. This mixed approach allows for a more comprehensive evaluation of failures, identifying not only the immediate causes but also the underlying conditions and systemic factors that contribute to the failures.

The research implemented this methodology in a case study of a Tissue paper production plant, where several failure incidents in the drying hood were analyzed. The results highlighted how the combination of quantitative analysis (through machine monitoring data and statistical analysis) and qualitative analysis (through expert evaluations and process review) can provide a deeper understanding of failures and facilitate the development of more effective and preventive maintenance strategies.

In conclusion, the mixed methodology of failure analysis proved to be a valuable tool in improving maintenance management for Tissue paper drying systems. The findings suggest that this approach not only improves the reliability and availability of the equipment but also contributes to a more sustainable and economically efficient operation, highlighting the importance of an integrated and multidisciplinary approach in industrial maintenance management.

Introducción.

La eficiencia y fiabilidad en la producción industrial son aspectos críticos que afectan directamente la calidad del producto, la seguridad operacional y la rentabilidad. En la industria del papel, y más específicamente en la producción de papel tissue, el sistema de secado desempeña un papel crucial en el proceso de producción. Dada la alta demanda de eficiencia energética y la calidad constante del producto, el mantenimiento efectivo de estos sistemas no solo es deseable sino esencial. Este estudio se centra en la optimización de la gestión de mantenimiento en sistemas de secado de papel Tissue, particularmente en campanas de secado de alto rendimiento, un área que hasta ahora no ha sido explorada exhaustivamente.

En esta investigación, abordamos la complejidad inherente a los sistemas de secado de papel Tissue por campana, reconociendo que los fallos en estos sistemas pueden tener consecuencias significativas en términos de tiempos de inactividad, costos de reparación, y la calidad del producto final. Por lo tanto, se hace imperativo un enfoque proactivo y bien informado para la gestión de mantenimiento. Para lograr esto, proponemos una metodología mixta de análisis de falla, que integra técnicas tanto cuantitativas como cualitativas, abarcando desde el Análisis de Causa Raíz (RCA) y el Análisis Modal de Efectos y Fallas (FMEA), hasta técnicas de diagnóstico avanzadas basadas en datos, como el monitoreo de condición y análisis predictivo. Esta combinación proporciona una visión más completa y detallada de los fallos, permitiendo no solo identificar las causas inmediatas, sino también comprender las condiciones y factores sistémicos subyacentes.

A través de un estudio de caso en una planta de producción de papel Tissue, aplicamos esta metodología mixta para analizar y comprender los incidentes de falla en una campana de secado

de alto rendimiento. Los resultados obtenidos no solo ilustran la efectividad de esta metodología mixta en la identificación y prevención de fallas, sino que también resaltan su potencial para mejorar la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos, contribuyendo a operaciones más sostenibles y económicamente eficientes.

La presente investigación subraya la importancia de un enfoque integrado y multidisciplinario en la gestión de mantenimiento, particularmente en entornos industriales donde la eficiencia y la confiabilidad son fundamentales. Al final del estudio, esperamos proporcionar a los profesionales y académicos en el campo de la ingeniería de mantenimiento, una metodología robusta y aplicable que pueda ser adaptada para mejorar la gestión de mantenimiento en una variedad de contextos industriales.

Capítulo I. Descripción Del Proyecto.

1.1. Planteamiento del problema.

Es notorio que dentro del ámbito industrial el mantenimiento se haya convertido en uno de los pilares clave dentro de cualquier sistema de producción, por esta razón tener los equipos disponibles y operando de manera confiable se ha convertido en uno de los mayores retos en las empresas. Cabe mencionar que el mantenimiento en sus inicios fue visto como un “problema” cuando se quiso tener una producción continua o en serie, con el tiempo fue pasando de problema a mal necesario. En la actualidad ya se habla de gestión de activo el cual coloca a mantenimiento como factor crítico de todas las unidades que conforman un proceso productivo.

Los análisis de fallas son exámenes sistemáticos de cada uno de los componentes fallidos para determinar la causa del evento, en cuanto a los interrogantes que se presenta tales como: El Qué, Cómo, Cuándo, Dónde, Por qué. Con el fin de entender lo sucedido y tomar acciones que apunten a que el evento no se vuelva a presentar. Dentro de los análisis de falla más comunes existen RCA, AMEF, ECA, FEH, APM, Árbol de Fallos, etc. La acción periódica de ejecutar los análisis de fallas permite a la industria la continuidad de su operatividad.

UNIBOL SAS, es una de las empresas más importantes del sector papelerero en Barranquilla y posicionada a nivel nacional. En su desarrollo implementa planes en la gestión de mantenimiento de forma estratégica, focaliza los equipos críticos y corre un plan estrictamente bajo preventivo y condición. Las campanas de alto rendimiento para el secado del papel hacen parte de estos equipos focos. En la línea de fabricación del papel Tissue, la empresa cuenta con dos campanas. a su vez cada campana está compuesta por 21 equipos pertenecientes al área de secado y cada línea tiene establecido una eficiencia valorada en el TVC tiempo, velocidad y calidad donde se entrelazan las

líneas entre producción y mantenimiento en el caso para la máquina en estudio es del 81%, valor por debajo del 86% establecido.

La función de las campanas de alto rendimiento también llamadas capotas, es insuflar aire caliente a alta velocidad sobre un cilindro de secado llamado Yankee, el cual se encuentra a alta temperatura para secar el papel al momento de pasar pegado sobre la superficie del cilindro (Yankee). El sistema de campana inicia con una mezcla de aire y llama que la produce un quemador utilizando gas industrial. Ésta llama es guiada por un focalizador en los ductos de conducción hacia las campanas. El trabajo es mantener en los ductos-capota aire recirculando a una temperatura de 560°C. El sistema trabaja 24 horas todos los días, a excepción de un día de 24 horas en el mes, que se toma para hacer parada de planta y realizar inspecciones internas y externas de los equipos. Debido a lo anterior, e identificando que el sistema trabaja en serie con los demás equipos, se convierte en una parte crítica en la producción de papel conforme según datos históricos. Una falla en el sistema o en algún equipo que lo conforma pueden ocasionar 2 alternativas, producir producto no conforme o parada de la línea de producción. Durante los últimos años hemos tenido 2 fallas con alto impacto en los costos de reparación en cuando a lo material y lucro cesante, con un total de 340 fallas en los últimos 5 años, disminuyendo considerablemente la disponibilidad y confiabilidad de la máquina.

Teniendo en cuenta lo anterior, surge el siguiente interrogante que dirige la presente investigación:

¿De qué forma se reducen las fallas de un activo a través de una metodología mixta de análisis de falla que evalué integralmente las condiciones actuales del sistema, para aumentar su disponibilidad y confiabilidad en la máquina?

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivo general

Proponer una metodología mixta de análisis de falla como práctica en la optimización de la gestión de mantenimiento para la disminución de fallas en un sistema de secado de papel Tissue por campana de alto rendimiento de la empresa UNIBOL SAS.

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar a través de un análisis comparativo el diseño y condición actual del proceso de secado del papel Tissue para garantizar la operación y la integridad del activo.
- Formular en 5 fases la metodología mixta de análisis (AQQC) articulando los métodos FMEA, RCA, Causa–Efecto y FTA que permita identificar fallas causales, evaluando las acciones para la toma de decisiones, en el proceso de secado del papel Tissue.
- Implementar la metodología propuesta hasta la 4ta fase (Plan de actividades) contrastada con la información de la última falla de alto impacto registrada en el historial del sistema de secado de papel.
- Simular la implementación de la 4ta fase de la metodología (Implementación de actividades y evaluación de resultado) para evaluar los costos de su implementación y visualizar los resultados en eficiencia TVC de la máquina.

1.3. Justificación.

En los últimos años la gestión del mantenimiento o el concepto de mantenimiento en general a experimentado una serie de cambios tanto tecnológicos como conceptuales, partiendo desde lo organizacional, económico, gerencial y humano. Estos cambios nacen de la globalización y la constante competitividad industrial en la búsqueda de sostenerse en el mercado cambiante (Aparicio 2013), cabe mencionar que las empresas buscan ser cada día más eficiente minorizando el número de fallas en sus procesos para producir continuamente.

Este trabajo de investigación busca la implementación un método de análisis mixtas de fallas AQQC (Análisis del Qué, Quién, Cuándo) que apunta a evitar que vuelva ocurrir un evento, aquel que signifique un paro de máquina, partiendo de su causa – efecto. Teniendo en cuenta que desde el momento que se concibe la palabra fallo, la utilizamos para designar que un componente, equipo o maquina a parado y quedado fuera se servicio. AQQC parte de la recurrencia de fallas y se enfoca en que por ningún motivo vuelva a ocurrir el evento, disminuyendo los índices de fallos a través de las acciones tomadas como resultado del análisis en el plan de actividades de mantenimiento de una campana de alto rendimiento para el secado de papel en la Empresa Unibol. SAS.

El método (AQQC) está fundamentada en una serie de actividades o pasos que conforman 5 fases, donde guía al aplicador junto a su grupo de trabajo de lo sencillo a lo complejo, encajando los resultados a la gestión lógica de mantenimiento. La aplicación de este análisis mixto de falla disminuiría progresivamente las fallas de los equipos con ocurrencia crónicas o en su defecto fallas de alto impacto en la eficiencia de máquina, a medida que la aplicación e implementación de la

técnica es utilizada, los resultados van aumentando la disponibilidad y confiabilidad de los equipos en la compañía.

Este trabajo busca hacer un aporte académico a la investigación en la gestión del mantenimiento enfocando a los equipos o maquinas como factor sustancial en la generación de rentabilidad de una compañía, le dará valor agregado al proceso de la mantenibilidad mediante recomendaciones concretas en los procedimientos que conforman el mejoramiento continuo del planear, ejecutar, verificar y controlar las actividades de mantenimiento.

1.4. Marco teórico.

1.4.1. Metodología Mixta de Análisis de Falla

Fundamentos de la Metodología Mixta:

Definición: La metodología mixta, combina técnicas de investigación cuantitativas y cualitativas. Es un enfoque emergente que busca reunir lo mejor de ambos mundos para ofrecer una visión completa y holística de un problema. Los estudios mixtos utilizan diversas fuentes de datos, técnicas y procesos en una única investigación (Tashakkori & Creswell, 2007). En la literatura se puede encontrar distintas técnicas y metodologías para los análisis de falla, todas tienen como eje principal atacar la causa raíz del problema. Estos métodos mixtos buscan no solo la causa raíz del problema, sino que también busca como robustecer el proceso desde el contexto de cada uno de los equipos que lo compone, el objetivo principal es que el evento no vuelva ocurrir por ningún motivo, visualizando que cualquiera evento que se pueda presentar en el proceso, pueda ser identificado sin causar eventos no deseados en el sistema.

Enfoques Cuantitativos vs. Cualitativos:

- Cuantitativo: Se centra en la medición numérica y el análisis estadístico de datos recolectados a través de encuestas, cuestionarios o por observación.
- Cualitativo: Se centra en describir y entender eventos, actividades, normas y valores desde una perspectiva subjetiva, usualmente a través de entrevistas, grupos focales o análisis de contenido (Denzin & Lincoln, 2005).

Aplicación en Análisis de Falla:

Dimensión Cuantitativa:

- Datos Numéricos: Estos permiten identificar con precisión patrones de fallas, frecuencia, gravedad, duración y costos asociados.
- Análisis FMEA: Es una técnica cuantitativa estructurada para identificar y evaluar los modos potenciales de falla de un producto o proceso y sus consecuencias (Stamatis, 1995).
- Fiabilidad y Mantenibilidad: Estas métricas (como MTBF y MTTR) son esenciales para evaluar la eficiencia y efectividad de las operaciones y del mantenimiento.

Dimensión Cualitativa:

- Entrevistas: Puede involucrar tanto al personal técnico como a los usuarios finales para comprender la percepción y las causas subyacentes de las fallas.
- Observaciones: El observar cómo se opera y mantiene el equipo puede revelar prácticas que no son evidentes en los datos cuantitativos.
- Análisis de Causa Raíz: Es un método cualitativo utilizado para identificar las causas subyacentes de las fallas para evitar que se repitan en el futuro (Rausand, 2011).

Focos y beneficios de la Combinación:

Cuando se mira íntegramente la implementación de técnicas y métodos de análisis de fallas en la gestión de mantenimiento, tales como AMEF, RCA, FEH, ECA, etc. Entre otros. Se pueden obtener grandes resultados, que benefician sustancialmente el funcionamiento de los activos de una empresa, los cuales apotan al desarrollo de la gestión del mantenimiento, cada técnica se aplica de forma diferente, pero todas con el objetivo de centrar la investigación en identificar la causa que genero el problema. Entre los principales beneficios que se obtienen se tiene, la solución la una causa de una falla, minimizando los eventos para aumentar la confiabilidad de los equipos. Cuando se habla de aplicar dos o más técnica al mismo tiempo, combinando el potencial de cada

una de ellas, se maximizan los beneficio, formando una metodología mixta de flexible de aplicar al momento de ejecutarse, encaminada en eliminación de fallas causales, alertar tempranas de posibles fallas que se puedan presentar, disminución de errores humanos y aumento de la disponibilidad del sistema, tomando como factor principal los enfoque tanto cualitativas como cuantitativas, estos pueden compensar las debilidades inherentes a cada técnica. Por ejemplo, mientras que los datos cuantitativos pueden indicar un aumento en las fallas, el enfoque cualitativo puede proporcionar una comprensión más profunda sobre por qué está ocurriendo esto.

AMEF (Análisis Modal de Efectos y Fallas)

El AMEF, conocido también por sus siglas en inglés FMEA (Failure Modes and Effects Analysis), es una herramienta proactiva diseñada para identificar y priorizar los posibles modos de fallo en sistemas, procesos, productos o servicios con el objetivo de mejorar la calidad y confiabilidad (Stamatis, D. H., 1995).

Etapas y aplicación en el mantenimiento.

La aplicación de AMEF en el contexto del mantenimiento tiene como objetivo identificar y analizar modos de fallo potenciales en equipos o sistemas para mejorar su confiabilidad y disponibilidad. Aquí están las etapas clave del proceso:

- Selección del sistema/equipo: Identificar y seleccionar el sistema o equipo que será analizado. Es esencial que esta selección esté basada en criterios como la criticidad del equipo y su historial de fallos (Stamatis, D. H., 1995).
- Formación del equipo: Reunir un equipo multidisciplinario compuesto por individuos con conocimientos sobre el diseño, operación y mantenimiento del sistema/equipo seleccionado (Carlson, C. S., 2012).

- Descomposición del sistema: Dividir el sistema o equipo en sus componentes más pequeños o funciones. Esto facilita la identificación detallada de posibles modos de fallo (Palady, P., 1997).
- Identificación de modos de fallo: Listar todos los posibles modos de fallo para cada componente o función (McDermott, R. E., Mikulak, R. J., & Beauregard, M. R., 2009).
- Análisis de efectos y consecuencias: Determinar los efectos potenciales de cada modo de fallo y clasificar la severidad de esos efectos (Smith, R. J., & Blundell, N., 2002).
- Determinación de causas: Identificar las posibles causas para cada modo de fallo y evaluar su ocurrencia (Bowles, J. B., & Peláez, C. E., 1995).
- Evaluación de controles actuales: Revisar los controles actuales que previenen o detectan el modo de fallo y evaluar su eficacia (Tang, L. C., Qian, C. X., & He, Z., 2007).
- Asignación del Número de Prioridad de Riesgo (NPR): Calcular el NPR para cada modo de fallo utilizando la severidad, ocurrencia y detección (Stamatis, D. H., 1995).
- Desarrollo y aplicación de acciones correctivas: Basándose en el NPR, desarrollar e implementar acciones correctivas para abordar los modos de fallo más críticos (Carlson, C. S., 2012).
- Revisión y seguimiento: Monitorear la eficacia de las acciones correctivas y revisar periódicamente el AMEF para reflejar cambios en el sistema o en su entorno operativo (Palady, P., 1997).

RCA (Root Cause Analysis o Análisis de Causa Raíz)

El Análisis de Causa Raíz (RCA) es una metodología empleada para identificar la causa fundamental de un problema o fallo, en lugar de simplemente abordar sus síntomas superficiales.

En el contexto de mantenimiento y gestión de activos, el RCA es vital para prevenir la recurrencia de fallos y mejorar la confiabilidad del equipo (Mobley, 2002).

Concepto y Propósito:

El RCA se basa en la premisa de que los problemas se resuelven mejor al intentar corregir sus causas raíz en lugar de simplemente abordar los síntomas evidentes. Al identificar y corregir la causa raíz, se evita que el problema vuelva a ocurrir (Latino & Latino, 2006).

Proceso de RCA:

- Definición del problema: Es esencial comenzar con una clara definición del incidente o fallo que se está investigando (Paradies & Unger, 2000).
- Recopilación de datos: Se recolecta información sobre el problema, incluyendo la secuencia de eventos, condiciones previas, y cualquier dato relevante que pueda arrojar luz sobre las posibles causas (Rooney & Vanden Heuvel, 2004).
- Identificación de causas: Utilizando herramientas como el diagrama de Ishikawa (espina de pescado) o el método de los 5 porqués, se identifican todas las posibles causas que podrían haber contribuido al problema (Ishikawa, 1986).
- Determinación de la causa raíz: De todas las causas identificadas, se determina cuál o cuáles son las causas fundamentales que, si se abordan, prevendrán la recurrencia del problema (Latino & Latino, 2006).
- Recomendaciones e implementación: Basado en la causa raíz identificada, se proponen y ponen en práctica soluciones para prevenir la recurrencia del problema (Paradies & Unger, 2000).

- Revisión: Una vez implementadas las soluciones, se revisa periódicamente su efectividad para garantizar que el problema ha sido resuelto a largo plazo (Rooney & Vanden Heuvel, 2004).

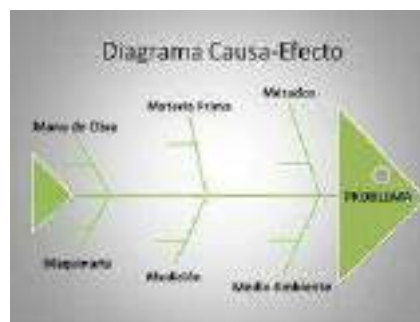
Aplicaciones en Mantenimiento:

El RCA es ampliamente utilizado en la gestión de mantenimiento para investigar fallos de equipos, incidentes de seguridad, y cualquier otro problema que pueda tener impactos negativos en la operación y confiabilidad de un sistema (Mobley, 2002).

ECA (Análisis Causa-Efecto - Ishikawa)

El Análisis Causa-Efecto, también conocido como diagrama de Ishikawa o diagrama de espina de pescado, denominado así porque al momento de la ejecución se asemeja a la conformación ósea a los largo de una pez, es una herramienta visual que ayuda a identificar, explorar y visualizar las posibles causas de un problema específico o efecto (Ishikawa, 1986), como se muestra en la figura # [1], se enfoca en focalizar 6 factores esenciales llamado las 6M, el Método, Materia prima, Mano de obra, Maquinaria, Mediciones y Medio ambiente. Es ampliamente utilizado en campos como la calidad, el mantenimiento para analizar fallas y mejorar procesos.

Figura 1. Diagrama Causa y Efecto



Fuente: <https://www.ingenieriaonline.com/diagrama-de-ishikawa/> (Ishikawa, 1986)

Concepto y Propósito:

El objetivo del Análisis Causa-Efecto es identificar todas las posibles causas raíz de un problema, de modo que las soluciones puedan ser dirigidas efectivamente hacia estas causas fundamentales y no solo hacia los síntomas (Juran, 1990).

Método de las 6M (Pyzdek & Keller, 2009):

- **Mano de obra:** Hace referencia al factor humano necesario en los procedimientos. Esta categoría engloba desde trabajadores operativos hasta personal de gestión. La eficacia de la mano de obra puede verse influenciada por aspectos como su formación, experiencia, aptitud y fatiga.
- **Maquinaria:** Abarca todas las herramientas, máquinas y tecnologías requeridas.
- **Materiales:** Involucra elementos como materias primas o información indispensable en los procedimientos.
- **Método:** Se relaciona con el modo en que se ejecuta un proceso, incluyendo políticas y reglamentaciones.
- **Medio ambiente:** Analiza las condiciones ambientales que pueden impactar el proceso.
- **Medición:** Aborda la regulación y verificación del proceso.

Es esencial enfatizar que, aunque el método sugiere 6 categorías, no todos los problemas o procedimientos hacen uso de todos estos elementos. Es probable que solo se consideren cuatro o, en ocasiones, hasta siete (Dale, 2003).

Aplicaciones

El Diagrama de Ishikawa, ampliamente conocido por su capacidad de identificación y análisis de causas, tiene múltiples aplicaciones:

Optimización de Procesos: Ayuda en la detección de elementos que pueden estar obstaculizando la eficacia o la calidad dentro de un proceso (Juran, 1990).

Aseguramiento de Calidad: Funciona como un mecanismo para descubrir y estudiar las causas probables de defectos en productos y servicios, facilitando así mejoras en calidad y la reducción de costos (Pyzdek & Keller, 2009).

Administración de Proyectos: Ofrece una visión para identificar y examinar dificultades que pueden presentarse en la ejecución de un proyecto, contribuyendo a prevenir demoras y otros inconvenientes (Kerzner, 2017).

Administración de Recursos Humanos: Puede ser utilizado para descifrar las causas potenciales de problemas asociados a los recursos humanos, tales como la ausencia laboral, el cambio frecuente de empleados o la disminución en la productividad (Armstrong, 2014).

Análisis Empresarial: Sirve para detectar y evaluar las causas de desafíos que inciden en la salud financiera de una entidad, como pueden ser la productividad insuficiente, elevados gastos, o una rentabilidad reducida (Porter, 1980).

Para concluir, el Diagrama de Ishikawa es un instrumento polifacético que puede ser aplicado en diversos ámbitos y contextos con el propósito de descifrar y estudiar causas de problemas y, consecuentemente, idear soluciones más acertadas (Juran, 1990; Imai, 1986).

Proceso de ECA:

- Definición del Problema: Se escribe el efecto o problema en la cabeza del diagrama (Ishikawa, 1986).

- Identificación de Categorías Principales: Se establecen las categorías principales que pueden contribuir al problema. Por ejemplo, los 6M mencionados anteriormente (Juran, 1990).
- Brainstorming de Causas: Para cada categoría principal, se realizan sesiones de brainstorming para identificar posibles causas que puedan contribuir al problema (Ishikawa, 1986).
- Organización y Análisis: Se organizan las causas identificadas en sub-causas y se analizan para identificar las más probables o críticas (Juran, 1990).
- Desarrollo de Soluciones: Una vez identificadas las causas fundamentales, se desarrollan soluciones para abordarlas y prevenir la recurrencia del problema (Ishikawa, 1986).

Relación con el RCA.

El Análisis Causa-Efecto (ECA) y el Análisis de Causa Raíz (RCA) son dos herramientas ampliamente utilizadas en la gestión de calidad, la mejora de procesos y el mantenimiento para identificar y abordar las causas subyacentes de los problemas. Aunque ambas herramientas se centran en el análisis de causas, existen diferencias clave en su enfoque y aplicación. Sin embargo, a menudo se utilizan juntas o en secuencia para proporcionar una comprensión exhaustiva de los problemas y sus causas raíz.

Relación entre ECA y RCA:

- Secuencia: El ECA a menudo se realiza antes del RCA. Una vez que se han identificado las posibles causas con el ECA, el RCA puede ser utilizado para profundizar en estas causas y determinar la causa raíz.

- Complementariedad: Mientras que el ECA proporciona una vista panorámica de todas las posibles causas, el RCA se adentra en las causas identificadas para descubrir cuál o cuáles son las principales causantes del problema.
- Uso conjunto: En muchos escenarios de resolución de problemas, especialmente en el contexto del mantenimiento, estas herramientas se utilizan juntas para proporcionar una visión completa desde la identificación inicial de posibles causas hasta la determinación de la causa raíz (Möller & Hansson, 2009).

FEH (Análisis de Historia de Falla)

El Análisis de Historia de Falla (FEH) es una metodología que permite a las organizaciones examinar retrospectivamente las fallas de sus sistemas y equipos para identificar tendencias, patrones y causas subyacentes. A través de un entendimiento profundo de estas fallas pasadas, las organizaciones pueden tomar decisiones más informadas sobre acciones futuras, optimizando así su rendimiento y confiabilidad.

Fundamentos del FEH:

Recopilación de Datos: En el núcleo del FEH se encuentra la recopilación de datos detallados sobre eventos de fallas anteriores. Estos datos pueden incluir fechas, condiciones operativas, consecuencias, acciones tomadas y otros detalles relevantes. La precisión y el detalle en esta fase son cruciales para el éxito del análisis posterior (Duffuaa, S.O., Raouf, A., & Dixon, J., 2017).

Importancia del FEH:

Identificación de Tendencias: Uno de los principales objetivos del FEH es descubrir tendencias en las fallas. Estas tendencias pueden indicar problemas subyacentes que no se habrían identificado mediante un enfoque reactivo (Kelly, A., 2019).

Prevención Proactiva: Al comprender las causas raíz y las condiciones que contribuyen a las fallas, las organizaciones pueden adoptar medidas proactivas para prevenir la recurrencia de dichas fallas (Parida, A. & Kumar, U., 2007).

Aplicaciones Prácticas del FEH:

Optimización de la Estrategia de Mantenimiento: Con una comprensión clara de las tendencias de fallas, las organizaciones pueden modificar sus estrategias de mantenimiento, ya sea incrementando o disminuyendo la frecuencia de ciertas actividades, o adoptando diferentes técnicas de mantenimiento (Moblely, R.K., 2002).

Gestión de Riesgos: El FEH puede revelar áreas de alto riesgo dentro de una operación, permitiendo a las organizaciones priorizar intervenciones y asignar recursos de manera más eficaz (Jardine, A.K.S. & Tsang, A.H.C., 2013).

Evaluación de Cambios Operativos: Si una organización introduce cambios en sus operaciones o equipos, el FEH puede ser utilizado para evaluar el impacto de estos cambios en la frecuencia y severidad de las fallas (Smith, R., 2004).

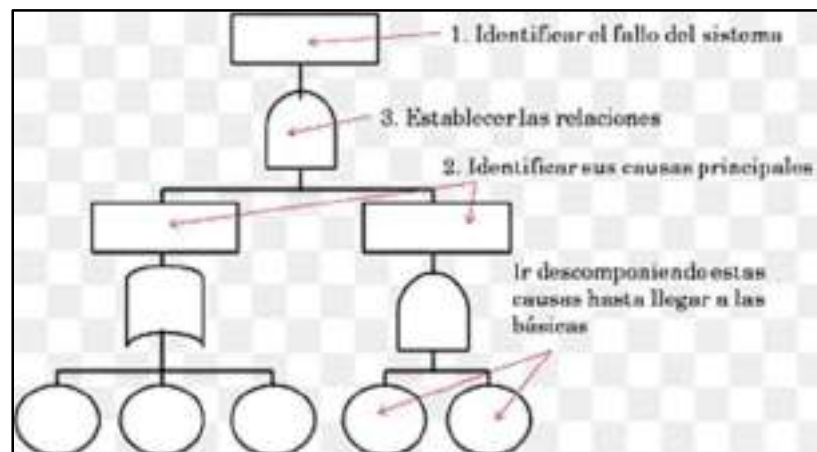
Mejora Continua: A través de la revisión y análisis regular de los datos de falla, las organizaciones pueden identificar oportunidades para mejoras continuas, conduciendo a operaciones más eficientes y confiables.

Árbol de Fallos (Fault Tree Analysis - FTA)

El Árbol de Fallos, también conocido como Fault Tree Analysis (FTA), es una técnica de análisis deductivo que se utiliza para determinar las causas raíz de un evento específico,

generalmente un fallo o accidente. Es representado gráficamente, donde el evento no deseado se sitúa en la parte superior del árbol, y las causas posibles y sus interacciones se ramifican hacia abajo, en forma de árbol, como se puede observar en la figura # [2] (Vesely, W. E., Goldberg, F. F., Roberts, N. H., & Haasl, D. F., 1981).

Figura 2. Estructura de Árbol de fallos



Fuente: (Vesely, W. E., Goldberg, F. F., Roberts, N. H., & Haasl, D. F., 1981)

Características y Componentes del FTA:

- Enfoque top-down: El FTA se desarrolla desde arriba hacia abajo. Comienza con un evento no deseado (a menudo denominado "evento principal" o "evento de fallo") y luego se descompone en posibles causas y sub-causas que podrían llevar a dicho evento (Vesely et al., 2002).
- Estructura Jerárquica: Representa fallos y subfallos en una estructura de árbol. Cada nivel del árbol detalla las causas que contribuyen al fallo del nivel superior (Ericson, 2011).
- Uso de compuertas lógicas: Se emplean principalmente dos tipos de compuertas lógicas: AND y OR. La compuerta AND indica que todos los eventos asociados deben ocurrir

simultáneamente para que se produzca el fallo, mientras que la compuerta OR sugiere que cualquier evento conectado puede causar el fallo (Modarres et al., 2009).

- Símbolos estandarizados: El FTA utiliza símbolos específicos para representar eventos, compuertas lógicas y conexiones, lo que facilita la interpretación visual y el análisis del árbol.
- Análisis cualitativo y cuantitativo: Aparte de identificar las causas de un fallo, el FTA permite un análisis cuantitativo, asignando probabilidades a cada evento básico y, a través de cálculos, determinando la probabilidad del evento no deseado (Vesely et al., 2002).
- Identificación de fallos comunes: Esta herramienta es capaz de identificar fallos que afectan a más de un componente o sistema, permitiendo así la implementación de medidas correctivas eficientes (Ericson, 2011).
- Facilita la toma de decisiones: Ayuda a los responsables a tomar decisiones basadas en datos para prevenir fallos, mejorar la seguridad y optimizar la fiabilidad del sistema o componente.
- Documentación gráfica: Al ser un análisis visual, facilita la comprensión, comunicación y presentación de los fallos y sus causas a diferentes niveles de una organización.

Aplicación del FTA:

El proceso de construcción de un Árbol de Fallos implica varios pasos:

- Definición del evento principal: El primer paso en el FTA es identificar y definir claramente el evento no deseado o el fallo del sistema que se desea analizar (Vesely et al., 2002).
- Descomposición del evento: A partir del evento principal, se descomponen sus causas directas y contribuyentes en eventos secundarios o sub-eventos. Esta

descomposición sigue un enfoque de arriba hacia abajo y se lleva a cabo hasta que se llega a los eventos básicos, que no necesitan descomponerse más (Ericson, 2011).

- Identificación de compuertas lógicas: Las compuertas lógicas (principalmente AND y OR) se utilizan para conectar diferentes eventos y describir las relaciones lógicas entre ellos. Por ejemplo, una compuerta AND indica que todos los eventos conectados a ella deben ocurrir para que se produzca el evento superior (Modarres et al., 2009).
- Desarrollo del árbol de fallos: Utilizando la descomposición lógica y las compuertas, se desarrolla el árbol de fallos desde el evento principal hasta los eventos básicos en la parte inferior del árbol.
- Análisis cualitativo: Una vez que se ha construido el árbol, se realiza un análisis para identificar caminos de fallo, combinaciones de eventos que podrían llevar al evento principal, y para identificar puntos débiles en el sistema que podrían beneficiarse de mejoras (Vesely et al., 2002).
- Análisis cuantitativo (si se dispone de datos): Si se dispone de datos de probabilidad para los eventos básicos, se pueden realizar cálculos para determinar la probabilidad del evento principal. Este análisis puede ser útil para priorizar acciones correctivas y para realizar análisis de riesgo (Ericson, 2011).
- Identificación de medidas correctivas: A partir del árbol de fallos, se pueden identificar posibles intervenciones para reducir la probabilidad del evento principal, mejorar la fiabilidad del sistema o aumentar la seguridad (Modarres et al., 2009).

- Documentación y comunicación: Es esencial documentar todo el proceso y comunicar los resultados a las partes interesadas, para que puedan tomar decisiones informadas basadas en el análisis.

Método de los 5 porqués

El método de "los cinco porqués" es una herramienta simple pero poderosa en el análisis de causa raíz, que se centra en identificar la causa subyacente de un problema específico. Originado por Sakichi Toyoda, fundador de Toyota Industries, el método ha sido adoptado y utilizado ampliamente en el mundo de la mejora continua y la gestión del mantenimiento (Liker, J.K., 2004).

Problema:

El papel Tissue no se seca adecuadamente en la campana de alto rendimiento.

1er Porqué:

¿Por qué el papel Tissue no se está secando adecuadamente?

Respuesta: Porque la campana de aire no está distribuyendo el calor de manera uniforme. (Ohno, T. (1988). Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. Productivity Press.)

2do Porqué:

¿Por qué la campana de aire no está distribuyendo el calor de manera uniforme?

Respuesta: Porque algunos de los inyectores de aire están obstruidos. (Sobek II, D.K., & Smalley, A. (2008). Understanding A3 Thinking: A Critical Component of Toyota's PDCA Management System. Productivity Press.)

3er Porqué:

¿Por qué algunos de los inyectores de aire están obstruidos?

Respuesta: Porque no se ha llevado a cabo un mantenimiento preventivo en varios meses.

(Suzuki, T. (1992). *New Manufacturing Challenges: The Triumph of the Japanese Production System*. Free Press.)

4to Porqué:

¿Por qué no se ha realizado un mantenimiento preventivo en varios meses?

Respuesta: Porque no se estableció un calendario de mantenimiento regular para la máquina. (Shingo, S., & Dillon, A.P. (1989). *A Study of the Toyota Production System from an Industrial Engineering Viewpoint*. Productivity Press.)

5to Porqué:

¿Por qué no se estableció un calendario de mantenimiento regular para la máquina?

Respuesta: Porque no se reconoció la importancia de mantener la máquina en condiciones óptimas y no hubo una adecuada capacitación o protocolos de mantenimiento. (Womack, J.P., Jones, D.T., & Roos, D. (1990). *The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production*. Harper Collins.)

Causa raíz:

A través del método de "los cinco porqués", se puede trazar un camino lógico desde el síntoma inicial hasta la causa raíz. No obstante, es crucial ser detallado y específico en las respuestas para obtener un análisis efectivo (Rother, M. (2010). *Toyota Kata: Managing People for Improvement, Adaptiveness, and Superior Results*. McGraw-Hill Education).

1.5. Estado Del Arte.

La metodología mixta ha tomado relevancia en diversos sectores industriales debido a la combinación de enfoques cuantitativos y cualitativos, vistos de distintos puntos de análisis para

llegar a la solución de un problema determinado. En particular, en la gestión de mantenimiento de sistemas de secado de papel Tissue por campana de alto rendimiento, se ha observado una tendencia creciente hacia la aplicación de esta metodología. A continuación, se examinan los avances y las contribuciones más relevantes en este ámbito.

La necesidad de optimizar los procesos de mantenimiento en sistemas industriales ha llevado a la búsqueda de técnicas más integradoras. En este contexto, (Martinez & Fernandez, 2015) propusieron por primera vez una metodología mixta para abordar los problemas de mantenimiento en la industria, argumentando que un enfoque combinado ofrecía perspectivas más completas.

Un estudio llevado a cabo por (Silva et al., 2017) en una fábrica de papel tissue en Brasil, implementó la metodología mixta para diagnosticar fallos recurrentes en su sistema de secado. Los resultados mostraron una reducción del 25% en el tiempo de inactividad y una mejora del 15% en la eficiencia operativa.

Se han realizado análisis detallados sobre los avances tecnológicos en sistemas de secado por campana, y cómo estos han influido en las estrategias de mantenimiento. En esas investigaciones, se destaca la importancia de combinar datos cuantitativos (como registros de operación) con opiniones cualitativas de los operadores para desarrollar estrategias de mantenimiento más efectivas. Esto hace que sea muy importante realizar un análisis exhaustivo sobre los estudios realizados similares.

En su estudio *Echavez (2012)* se centró en analizar las fallas recurrentes que afectaban a los equipos críticos de *DANA TRANSEJES COLOMBIA*. Para llevar a cabo esta tarea, utilizó metodologías proporcionadas por el Mantenimiento Productivo Total (TPM). En particular, aplicó dos enfoques clave del TPM: el análisis de Mantenimiento Preventivo (PM) y el Análisis de Modos

y Efectos de Falla (AMEF). Su objetivo principal era mitigar las fallas identificadas y, al mismo tiempo, mejorar la confiabilidad y la disponibilidad de los equipos en cuestión.

El análisis de Mantenimiento Preventivo (PM) se enfoca en la evaluación de las causas físicas y operativas detrás de las fallas de los equipos. Esto implica examinar en detalle cómo funcionan los equipos, las condiciones en las que operan y las razones subyacentes que pueden llevar a su deterioro o avería. Al realizar un análisis PM, Echavez buscaba identificar las debilidades y los puntos críticos que requerían atención y mantenimiento preventivo para evitar futuras fallas.

El Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) es otra herramienta fundamental dentro de la metodología del TPM. Este enfoque se utiliza para prever y evaluar los posibles modos de falla de los equipos, así como sus efectos potenciales. Al aplicar el AMEF, Echavez tenía como objetivo identificar de manera proactiva las situaciones en las que los equipos podrían experimentar problemas y evaluar las consecuencias de esas fallas. Esto le permitía tomar medidas preventivas específicas y diseñar estrategias para evitar que las fallas ocurrieran o reducir su impacto en caso de que sucedieran.

El propósito general de estas combinaciones de métodos dentro del marco del TPM era aumentar la confiabilidad de los equipos, lo que significa que estos funcionaran de manera más consistente y con menos interrupciones no planificadas.

En conclusión, el estudio de Echavez se enfocó en analizar y abordar las fallas recurrentes de los equipos críticos de Dana Transejes Colombia. Utilizó las metodologías de análisis de falla PM y el AMEF, con el propósito de prevenir ocurrencias de fallas en los sistemas, Esto subraya la importancia de las combinaciones de técnicas y metodología en la gestión efectiva del mantenimiento industrial.

En el estudio llevado a cabo por *Moreno (2013)*, se enfocó en la creación de un modelo destinado a optimizar los procesos de mantenimiento en equipos críticos utilizados en campos petroleros en tierra firme. Su enfoque se basó en la combinación de dos metodologías ampliamente reconocidas en la gestión de mantenimiento industrial: el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) y el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF).

El propósito fundamental de este modelo era establecer una política que facilitara la implementación efectiva del RCM en la gestión de mantenimiento de equipos críticos. El RCM es una metodología que se centra en identificar las tareas de mantenimiento más adecuadas para maximizar la confiabilidad y el rendimiento de los equipos. El AMEF, por otro lado, se utiliza para evaluar los posibles modos de falla y sus efectos, lo que ayuda a tomar decisiones informadas sobre cómo abordar las fallas potenciales.

Al combinar el RCM y el AMEF, Moreno buscaba crear un enfoque integral que permitiera a las organizaciones en campos petroleros desarrollar políticas de mantenimiento sólidas y efectivas. Además, su objetivo era que este modelo fuera lo suficientemente versátil como para ser aplicado en diversas organizaciones más allá de los campos petroleros, lo que lo convertiría en una herramienta genérica y adaptable.

En conclusión, trabajo de Moreno en 2013 se centró en desarrollar un modelo que combinara el RCM y el AMEF para mejorar los procesos de mantenimiento en equipos críticos en campos petroleros en tierra firme. Este modelo tenía como objetivo establecer políticas de mantenimiento efectivas y, al mismo tiempo, ser aplicable de manera más amplia en diferentes tipos de organizaciones. Su investigación contribuyó significativamente a la gestión eficiente del mantenimiento industrial en un entorno desafiante como el de la industria petrolera.

En el estudio realizado por **Castro & Cendales** (2019), titulado "Casos aplicados del análisis de causa raíz: revisión", se aborda una cuestión esencial en la ingeniería y la gestión de calidad en diversas industrias. Este artículo presenta una revisión exhaustiva de cómo se aplica el análisis de causa raíz (RCA) en el contexto de problemas relacionados con elementos mecánicos y sistemas en una variedad de sectores de la industria. El análisis de causa raíz es una metodología fundamental que se utiliza para identificar y comprender las causas profundas de los problemas y los fallos en sistemas complejos. Es particularmente valioso porque no se limita a abordar los síntomas evidentes de los problemas, sino que se adentra en las raíces de los mismos.

El artículo comienza proporcionando una sólida base teórica para el RCA, destacando su relevancia y aplicabilidad en situaciones de ingeniería. Se detallan los pasos esenciales que deben seguirse al llevar a cabo un análisis de causa raíz en contextos de ingeniería y producción. Estos pasos incluyen la descripción y documentación minuciosa de la naturaleza del fallo, seguida de una caracterización fisicoquímica exhaustiva del material involucrado, utilizando técnicas avanzadas como la espectroscopia, la microscopía y el análisis fractográfico.

Además, los casos de estudio presentados en el artículo son ejemplos concretos de cómo se aplica la metodología RCA para identificar y abordar las causas subyacentes de fallos en piezas críticas de varios equipos.

Uno de los aspectos más destacados del artículo es la aplicación de la metodología RCA y la contribución significativa de la reducción de costos y a la mejora de procesos en obras, plantas industriales y otros contextos que requieran una investigación de esta índole. Al identificar y abordar las causas profundas de los problemas, las organizaciones pueden implementar medidas correctivas y preventivas efectivas, lo que se traduce en una mayor eficiencia operativa y una reducción de los costos asociados a fallos y reparaciones.

Berroteran, García, Montero, & Rodríguez (2021): La investigación realizada por Berroteran, García, Montero y Rodríguez en 2021 se centra en la aplicación de métodos como análisis de causa raíz (RCA) y técnicas en la gestión de riesgos aplicados a una línea de envasado de cerveza en la Planta Los Cortijos de Cervecería Polar C.A. El estudio aplica varias técnicas, con cada técnica va extrayendo lo que necesita, comienza con un análisis de criticidad de los equipos que componen las líneas de envasado, utilizando la técnica cuantitativa del Riesgo Total Anualizado (RTA) y la técnica cualitativa de la matriz FODA.

Uno de los logros clave de este estudio es la identificación del equipo más crítico de envasado y la identificación de los problemas específicos que presenta. Para abordar estos problemas, se aplicó la metodología de RCA para identificar las causas raíz de las fallas recurrentes y los defectos en el producto final. Esto incluyó el análisis de las variables de proceso y la identificación de factores humanos que podrían estar contribuyendo a los problemas.

La investigación también destaca la importancia de la combinación de metodologías de análisis de falla, estas proporcionan la identificación y mitigación las ocurrencias de fallas, las cuales, pueden tener un impacto positivo en la calidad del producto y la eficiencia operativa. El estudio presenta recomendaciones específicas para abordar las causas raíz identificadas y mejorar el rendimiento de la línea de envasado.

Becker, S. (2017). "Integración de RCA y AMEF para la Optimización de Procesos en la Industria Automotriz Alemana"

Esta tesis aborda la implementación combinada del Análisis de Causa Raíz (RCA) y el Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF) en la industria automotriz alemana. Se centra en cómo estas técnicas mejoran la calidad y la seguridad en la fabricación de automóviles, con un estudio

detallado sobre la reducción de defectos y la optimización de procesos en líneas de montaje. La investigación destaca el uso de RCA para identificar causas fundamentales de fallas recurrentes y la aplicación del AMEF para evaluar los efectos potenciales de estas fallas en la producción. Se proporcionan ejemplos prácticos de cómo la integración de estas metodologías ha llevado a mejoras significativas en la eficiencia de producción y en la reducción de costos.

Larsen, K. (2018). Tesis: "Evaluación de Riesgos en Plataformas Petroleras Noruegas Mediante Árbol de Falla y ECA"

Esta investigación examina la aplicación del Árbol de Falla combinado con la Evaluación de Consecuencias de Accidentes (ECA) en la gestión de riesgos de las plataformas petroleras offshore en Noruega. El estudio se enfoca en cómo estas técnicas ayudan a identificar y mitigar riesgos potenciales, especialmente en el contexto de condiciones ambientales extremas y procesos de operación complejos. Se analizan varios casos de estudio donde el Árbol de Falla proporciona un mapeo detallado de posibles escenarios de fallas, mientras que el ECA evalúa las consecuencias potenciales de estos escenarios en términos de seguridad operacional, impacto ambiental y costos económicos. La tesis destaca la importancia de estas metodologías en la mejora continua de las prácticas de seguridad y en la formulación de estrategias de respuesta ante emergencias.

Müller, Anna K. (2018). Artículo: "Análisis Integrado de RCA y AMEF en la Industria Farmacéutica Suiza"

El artículo de Müller investiga la implementación de un enfoque integrado de Análisis de Causa Raíz (RCA) y Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF) en la industria farmacéutica suiza. En la primera fase, se utilizó RCA para identificar las causas fundamentales de fallas críticas

en la producción de medicamentos, abordando problemas recurrentes en las líneas de ensamblaje y control de calidad. Posteriormente, el AMEF se aplicó para evaluar los posibles efectos de estas fallas, centrándose en la seguridad del producto y la conformidad regulatoria. La metodología resultante permitió una identificación más precisa de riesgos y una gestión más efectiva de las medidas correctivas. Los resultados mostraron una notable mejora en la consistencia de la calidad del producto y una reducción en la tasa de incidentes de seguridad, estableciendo un nuevo estándar en las prácticas de fabricación farmacéutica.

Rossi, Marco L. (2019). Artículo: "Árbol de Falla y ECA para la Gestión de Riesgos en la Industria Energética Italiana"

En su artículo Rossi propone una metodología avanzada combinando Árbol de Falla y Evaluación de Consecuencias de Accidentes (ECA) para la gestión de riesgos en la industria energética italiana. La metodología comienza con el desarrollo de un Árbol de Falla detallado, identificando posibles rutas de fallo en los sistemas de generación y distribución de energía. Cada ruta de fallo se analiza luego a través de ECA para evaluar los impactos potenciales en términos de seguridad operacional, daños ambientales y consecuencias económicas. Esta integración proporcionó una comprensión más profunda de los riesgos y facilitó el desarrollo de estrategias de mitigación más efectivas. Como resultado, se observó una reducción significativa en la frecuencia de incidentes y un mejor manejo de las emergencias, contribuyendo a una operación más segura y confiable en todo el sector.

Gómez, P. (2015). Tesis: "Metodología para la Gestión de Mantenimiento en la Industria Petrolera Colombiana: Un Enfoque RCA/AMEF"

En esta tesis, Gómez desarrolla una metodología innovadora que combina el Análisis de Causa Raíz (RCA) y el Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF) para la gestión de mantenimiento en la industria petrolera colombiana. La investigación se enfoca en cómo la integración de estas técnicas puede mejorar la eficiencia operativa y la seguridad en las instalaciones petroleras. Se lleva a cabo un estudio de caso en varios campos petroleros en Colombia, donde se aplican RCA y AMEF para identificar y analizar las causas de fallas críticas en equipos de perforación y bombeo. La metodología propuesta utiliza datos históricos de fallas, evaluaciones de riesgo y la implementación de sistemas de monitoreo de condición para optimizar los planes de mantenimiento. Los resultados muestran una reducción significativa en la frecuencia y severidad de las fallas, así como una mejora en la confiabilidad de los equipos.

López, J. (2016) Artículo: "Implementación del Árbol de Falla y ECA en la Gestión de Riesgos de Centrales Hidroeléctricas en Colombia"

López explora la aplicación del Árbol de Falla combinado con la Evaluación de Consecuencias de Accidentes (ECA) en las centrales hidroeléctricas colombianas. La tesis se centra en cómo estas metodologías pueden ayudar a prevenir accidentes y mejorar la seguridad operativa. Se realiza un análisis detallado de varios incidentes en centrales hidroeléctricas, utilizando el Árbol de Falla para mapear las causas y consecuencias de los eventos, y el ECA para evaluar los impactos potenciales. La metodología propuesta también incluye recomendaciones para mejorar los sistemas de alerta temprana y los protocolos de emergencia. Los resultados indican una mejora significativa en la capacidad de las centrales para anticipar y gestionar riesgos, lo que lleva a una operación más segura y eficiente.

Capítulo II. Análisis Comparativo.

Un análisis comparativo es un proceso mediante el cual, las características de su enfoque implican la evaluación y comparación de dos o más elementos para identificar similitudes y diferencias entre ellos. Puede aplicarse a una variedad de contextos, desde comparar productos o servicios, evaluar alternativas, analizar datos, realizar investigaciones, estudios, proyecciones etc., El objetivo principal de un análisis comparativo es tomar decisiones a través de los resultados obtenidos, identificar ventajas o desventajas y comprender mejor las relaciones entre los elementos comparados.

En el ámbito industrial, Este tipo de análisis comparativo es común, en este caso se encamina hacia el análisis de equipos como proyección de futuras fallas que puedan emerger, también se tiene estudios en áreas como la manufactura, la ingeniería, la aviación y la energía, donde la prevención de fallas es crucial para la seguridad y el rendimiento de los productos y sistemas. Ayuda a aprender de las experiencias y situaciones pasadas para tomar medidas correctivas y preventivas en futuros problemas similares.

En el contexto de desarrollar un análisis comparativo podemos identificar una serie de acciones a ejecutar con el fin de visualizar anomalías que puedan inducir a una falla, en este caso se habla de un equipo y su integridad, se busca la información desde en montaje hasta la actualidad, lo primero que se debe tener en cuenta es entender el equipo o sistema que ha fallado, desde lo macro hasta llegar a la causa del evento.

Se prepara un análisis de funcionamiento del equipo, se solicita documentación de fichas técnicas, planos y manuales, una vez se tenga esta información a la mano se solicita entrevista con un técnico experimentado de manteniendo junto con su jefe inmediato. Se hace la entrevista en el lugar del evento y se procede a revisar todo los equipos que conforman el sistema, en este

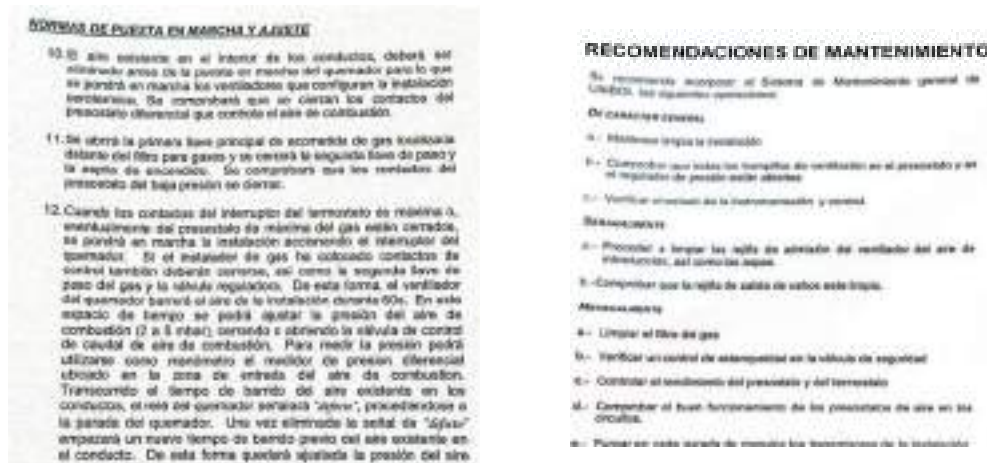
momento se procede extraer la información del que hacen, como lo hacen y cuando lo hacen (ejecución de actividades) desde mantenimiento para sostener en línea la operatividad de forma confiable del equipo, con la información clara, se solicita una entrevista con un operario de maquina experimentado junto a su jefe inmediato y se revisa el sistema pero esta vez desde la parte operativa, funcionamiento, número de horas en línea, numero de ciclos, operación de equipos desde sus parámetros tales como velocidad, temperatura, presiones, dilatación, vacío etc. Estando en maquina se revisa tendencia, gráficos, PLC, HMI, y toman todas las variables del sistema estando en operación la máquina.

Teniendo en cuenta que al momento de montar el sistema junto con los equipos que lo conforma, el fabricante lo deja operando, bajo especificaciones de fabricación y se establecen las líneas límites para sostener en el tiempo la operación del activo. Con toda esta información se procede hacer el comparativo, lo instalado VS lo actual e inicialmente damos un diagnóstico inicial el cual nos va servir para anclar las actividades finales del análisis de falla AQQC.

2.1. Entrevistas y manuales

Durante las entrevistas se logra identificar los protocolos de operación en los manuales, los cuales no se encuentran en el panel de operación de la planta o lugar de trabajo, el conocimiento es transferido por experiencia a los operarios nuevos, en cuanto a mantenimiento no se identificó frecuencia de inspecciones en las presiones diferenciales que son las variables más importantes para saber si el equipo está trabajando en su normalidad, la figura (muestra la existencia de documentos en la operación y mantenimiento desde el montaje que en la actualidad no se tienen en cuenta.

Figura 3. Manual de operación y mantenimiento campana de alto rendimiento



Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento campana de alto rendimiento. Cod. 4500926212

2.2. Revisión del sistema mecánica, eléctrica, instrumentación y seguridades

Después de la revisión de fallas en las diferentes áreas de mantenimiento, se identifica que el Pareto de falla se encuentra en el área de instrumentación. inicialmente se montaron los equipos con todos los SIF para cada PFD es decir, seguridades y protecciones de los equipos, al momento de revisar fallas en el equipo se encuentra con omisiones de señales redundantes de seguridad como se muestra en la figura # [4] estas no fueron registradas en los documentos de gestión del cambio, termocuplas que eran doble para colocar redundancia, se encuentran en la actualidad termocuplas simples.

Figura 4. tablero de control y protecciones capota



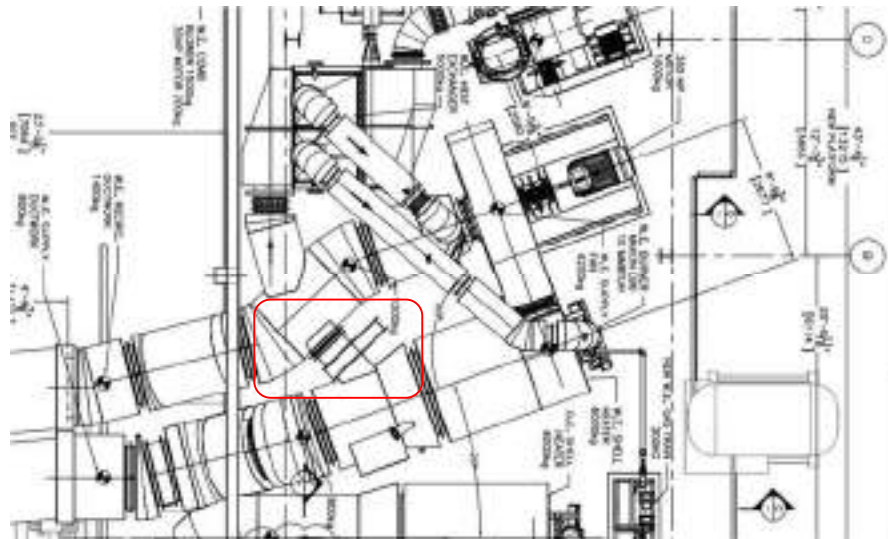
Fuente: Autor

2.3. Revisión de planos en campo.

La campana de alto rendimiento fue montada por la empresa ANDRIZ en el año 2004, dejando en operación la máquina de Tissue y corriendo a una velocidad de 900mpm, esta campana se montó con la visión de aumentar velocidad a futuro, la temperatura máxima especificada en manuales es de 560°C, la operación en el ducto guía principal quedo al momento del arranque en 430°C, cabe mencionar que uno de los puntos más importante en la fabricación de papel tissue es el secado del papel ya sea por campana con insuflado de aire o por serie de cilindros de secado.

En la revisión de plano identificamos una modificación, Se anula el Dámper de recirculación de aire caliente de bajo fuego, se puede identificar en la figura # [5], su función es recircular el aire caliente desde la cámara de combustión hacia el ducto de admisión de recirculación cuando el quemador se apaga. En la actualidad no lo tiene, se encuentra el plano desactualizado.

Figura 5. Plano de montaje de fabricante



Fuente: Plano # 817123 Air system layout and details Andritz Paper Machinery Ltd.

gases se hará más lentamente porque este dámper ayudaba a la evacuación de los gases al momento de inicial el proceso de encendido del quemador

- Las temperaturas internas del sistema están fuera de parámetro trabajando la maquina en 900mpm lo mismo que cuando se montó el sistema, y produciendo papeles gruesos de 19, 21.5, 22.5 gramos, la temperatura máximas de en el sistema donde está puesto el set-point en 580°C donde los manuales muestran 560°C, la temperatura, en la cámara de combustión tiene 40°C más de lo normal, esto podría incurrir en el deterioro progresivo respecto al tiempo del material de construcción, dilataciones de los materiales inadecuado por calentamientos.
- La seguridad de los equipo que conforman es sistema de secado por campana de alto rendimiento se encuentra comprometida, los SIL se encuentran con muchas anormalidades, los sistemas redundantes de termocuplas que controla las protecciones algunas no funcionan, los protocolos de revisión de los parámetros de funcionamiento no se encontraron con unas frecuencia lo que nos lleva a concluir que falta fortalecer el sistema de control y protecciones del equipo, evaluar SIL, que puedan actuar ante cualquier eventos.

Capítulo III. Metodología.

La propuesta es una metodología para implementar dentro de la gestión del mantenimiento basada en los análisis de las fallas que pueden ocurrir en una máquina, sistema, equipo o componente. La metodología consta de Cuatro fases que conformaran las estructuras de un análisis de falla, este puede ser aplicado en cualquier evento de falla ocurrido sobre los activos de una compañía. La **primera** fase conforma la primera letra (**A**) En esta etapa se revisará el evento ocurrido sobre el activo, a través de un equipo interdisciplinario que inicia con los diagramas de bloques funcionales y termina con el plan de actividades de cada uno de los integrantes del equipo priorizando la investigación del evento ocurrido. En la **Segunda** fase la cual está conformada por la primera (**Q**), se formulan las hipótesis de las posibles causas y cada integrante del equipo realiza la investigación a fondo de la anulación de hipótesis según su especialidad, el siguiente paso es la **tercera** fase dirigida por la segunda (**Q**) establece el cómo se desarrollaran las actividades que ataque la causa raíz del problema para que no se vuelva a presentar y por último la **Cuarta** fase que es la última letra (**C**), formula en qué momento según presupuesto y ventanas de tiempos de paradas de planta se ejecutan las actividades y se define el seguimiento del cumplimiento de la ejecución. A continuación, se describen los pasos para desarrollar la metodología.

3.1. Fase # 1 Diagrama funcional - Plan de trabajo del equipo

En esta fase se establece el análisis inicial, se reúne a un equipo de trabajo de varias especialidades (Mecánico, Eléctrico, Instrumentación, producción, Civil, confiabilidad, Etc), dependiendo de la falla que se haya presentado, siempre debe haber un vocero, en este caso debe

dirigir el análisis AQQC, la persona a cargo del área en el cual se presentó la falla, es la persona encargada de dirigir estas actividades (AQQC). todos los integrantes dirigentes del equipo de planta, debe tener claro la metodología, el objetivo es que la creación de análisis (AQQC) no esté en manos de una sola persona, luego de integrar el equipo, el vocero inicia con el diagrama funcional, se debe despejar toda duda del funcionamiento e importancia del sistema o equipo en falla, para luego armar el plan de actividades de los integrantes.

3.2. Diagrama funcional.

El objetivo de hacer un diagrama funcional es para mostrar de manera general la funcionalidad de activo que fallo. Se hace con el fin de identificar los equipos y componentes que conforman un sistema, su función dentro de éste y su relación entre sí. Para esto se toma la ficha técnica, planos de montaje, manuales de funcionamiento, operación y experiencia del personal. Una vez se tuvo esta información se desarrolla el diagrama funcional de cuadros que muestra el flujo desde la alimentación eléctrica hasta estar en línea cada uno de los equipos, Cada cuadro representa un equipo en el proceso, las flechas (según el color) establecen las relaciones mecánicas, eléctricas, de control y de flujo. En el centro se coloca el cuadro principal que es el equipo fallado junto con la falla. Los cuadros blancos no hacen parte del sistema, pero están relacionados con él. A continuación, en la figura # [6], se muestra ejemplo de un diagrama funcional de la falla de un cuerpo de válvula RCB en un sistema de dirección de un camión eléctrico EH5000. (Durango, H. & Aparicio, L., 2013).

protecciones, anomalías de arranque, ubicación física de la parte fallada, gráficos de instrumentación, toda la información que sea necesario para el levantamiento de las hipótesis. Se trabaja el factor cualitativo, a través de las entrevistas del personal que opera, mantiene y que estuvo involucrado al momento del evento del equipo,

3.4. Fase # 2 diagrama o árbol de falla - Hipótesis

Se programa la segunda reunión con el equipo de análisis AQQC, ya con la información recopilada y analizada, se inicia con el bloque funcional, de aquí se delimita el tamaño del análisis, se establece los límites físicos, que partes del sistema y que equipos se incluyen en el análisis y cuales no son necesarios incluir. Para elaborar la representación gráfica se debe tener en cuenta que los eventos que se va a establecer en diagrama o árbol de falla siguen una secuencia de falla que se divide en 3 partes

3.4.1. Fallas Primarias

Todas aquellas fallas que se presenta cuando se incurre en características propias del componente o equipo, tales como el cumplimiento del ciclo de vida del activo, errores humanos o defectos de diseños.

3.4.2. Fallas secundarias

Estas fallas se presentan cuando el equipo lo ponen a trabajar fuera de los límites de operación para la cual fue fabricación, casi siempre estas fallas secundarias provienen de una falla primaria.

3.4.3. Fallas terciarias

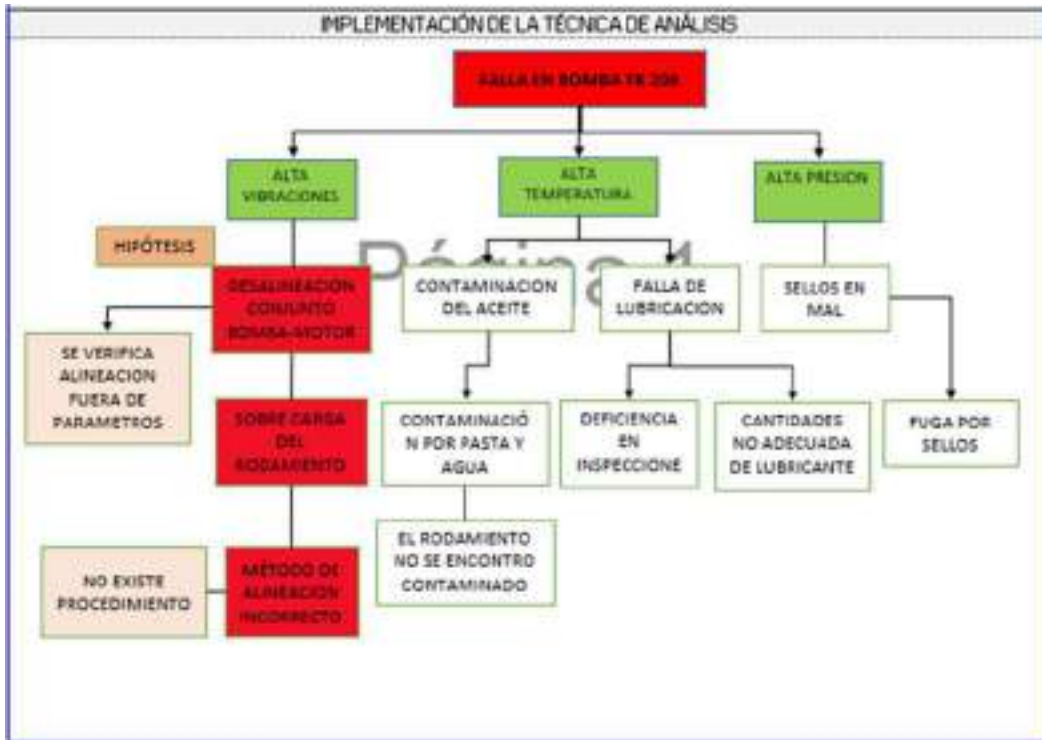
Esta ocurre cuando se presenta la falla en el control del sistema o cuando se presenta una perturbación interna o externa del mismo, esta perturbación deja operar el equipo, pero en falla, fuera de parámetros.

Al momento de iniciar el diagrama o árbol de falla se comienza armando un cuadro en la parte superior o cumbre, aquí se coloca el evento ocurrido como punto principal del análisis, en su desarrollo se sigue con las ramas posibles fallas o modos de falla en equipos que conllevaron al evento principal, y por último tenemos, las hojas que son las posibles fallas de componentes que aportan a la falla mayor pero no ocasionarían la falla principal

3.4.4. Hipótesis

Anotando que ya se tiene el diagrama o árbol de falla, se toma cada una de las posibles fallas y se genera una hipótesis, el enfoque es identificar cada posible causa del evento sucedido, con el fin de encontrar la causa raíz del problema, cada hipótesis es evaluada en sus escenarios posibles, al encontrar hallazgos que conlleven a futuras fallas de inmediato se busca una solución definitiva para que el evento por ningún motivo se vuelva a presentar, ver figura # [7]

Figura 7. Implementación de análisis



Fuente: Autor

3.5. Fase # 3 Plan de trabajos causales

3.5.1. Análisis de la evaluación de las hipótesis

En algunos casos, la revelación de pequeñas causas escondidas hace posible implementar acciones que permiten resolver el problema simplemente eliminando pequeñas causas. Sin embargo, en el planteamiento de las hipótesis hay que tener en cuenta que la misma causa podría tener varios efectos, por lo que todas las hipótesis deben ser analizadas y evaluadas, cada análisis debe conllevar a una actividad la cual se convierte en un plan de actividades enfocado en la solución de todas las posibles probabilidades de que la falla se vuelva a presentar, este plan de actividades son estandarizadas en un formato, el cual los puntos principales asignan un responsable a cada actividad dependiendo de su especialidad, el formato consta de:

3.5.2. Guía de Diligenciamiento del Análisis AQQC

- **Consecutivo:** Se debe especificar el consecutivo asignado al plan según la Matriz consolidada del AQQC.
- **Proceso Responsable:** Seleccionar de la lista desplegable el proceso o subproceso respectivo. Nombre del proceso que lidera la acción.
- **Problema o mejora a analizar:** Se debe detallar claramente el problema o la situación a analizar. Explicación clara de lo sucedido. Durante el análisis se debe tener en cuenta si existe problemas similares o que potencialmente pueden seguir ocurriendo.
- **Líder del plan:** Relacionar el nombre de la persona que liderara el plan y el análisis. Nombre de la persona encargada debe velar por la realización de las actividades de la acción.
- **Fecha de análisis:** Fecha inicial de realización del Análisis.
- **Técnica de análisis:** Se debe tener en cuenta que para los analisis se desarrolla la técnica anteriormente mencionada Bloque funcional y como derivado diagrama o árbol de falla.
- **Participantes en el análisis:** Relacionar el listado de personas que participaran en el análisis. Grupo de personas de diferentes áreas y con conocimientos encargadas de analizarla, de identificar su causa raíz y de establecer el plan de acción AQQC.
- **Implementación de la Técnica de Análisis:** Anexar foto o relacionar el resultado de la técnica de análisis implementada (Diagrama de falla).
- **Criterio de Evaluación de Eficacia:** Variable que nos indica el estado del problema al momento de la apertura y del cierre de la acción, con el fin de evaluar su eficacia.
- **% Avance global:** Hace referencia al cálculo del avance del promedio de todas las actividades ejecutada según se vayan desarrollando.

- **Actividad:** Relacionar la acción que se va a desarrollar. Cuando se esté determinado el plan de acción se debe considerar si es necesario, actualizar los riesgos y oportunidades cambio en SGI.
- **Tipo:** Seleccionar de la lista desplegable el tipo de acción. Ya sea de documentación, verificación, seguimiento, control, implementación, desarrollo Etc.-.
- **Responsable:** Indicar el nombre y cargo de la persona responsable de ejecutar la acción asignada del plan de actividades.
- **Fecha Inicio:** Fecha estimada de inicio de la actividad que se asignó del plan.
- **Fecha fin programada:** Fecha estimada de finalización de la actividad
- **% Avance:** Relacionar el % de avance la actividad que se planifico desarrollar.
- **Fecha fin real:** Fecha real en la que se ejecutó la actividad asignada del plan.
- **Estado:** Seleccionar de la lista desplegable en qué estado se encuentra la actividad, ya sea en implementación, cerrada, cancelada o abierta
- **Observaciones:** Relacionar comentarios o aclaraciones sobre la tarea o su ejecución. Para el caso de las tareas canceladas se debe indicar el motivo de su cancelación además se debe evaluar si esta actividad no representa una probabilidad de falla.
- **Cumplimiento:** Se indica si se cumplió o no con la actividad en la fecha planificada.

3.5.4. Evaluación del cierre del plan

Responsable del cierre del Plan: Indicar el responsable de validar el cumplimiento de las actividades del plan de acción y del logro o cumplimiento del criterio de evaluación de la eficacia, el plan de actividad incluido en el formato anteriormente mencionado es diligenciado y entregado al departamento de auditoría que es el encargado del seguimiento de la ejecución de las actividades.

3.6. Fase # 4 Costos, presupuestos y seguimientos

Una importante premisa, en cualquier análisis de falla que se quiera realizar es la de no confiar en las soluciones sin antes contrastar que todas las hipótesis fueron revisadas y evaluada en toda la integridad del activo. Partiendo de esta premisa cada tarea que tenga como visión atacar la causa de falla o posible falla proyectada, se le asigna un responsable según su especialidad, esta debe ser ejecutada en un periodo de tiempo determinado y cuadrado con el responsable, las tareas que no requiere presupuesto, son programadas y ejecutadas para el siguiente paro del equipo, o en su defecto hay tareas que se ejecutaran con maquina rodando. Las tareas que requiere presupuestos y revisión de los costó de implementación, son evaluado por la gerencia y proyectada para ejecución en paradas programadas, el plan de ejecución de actividades es enviado estandarizado en su formato al departamento de mejora continua, quien, en compañía del departamento de auditorías, evalúan el cumplimiento de los avances de ejecución cada 15 días, hasta llegar al cierre del AQQC.

Capítulo IV. Aplicación de la Metodología AQQC

4.1. Descripción de la falla.

Durante una parada de planta de 36 horas de trabajo normales (Mtto Preventivos, correctivos programados, predictivos etc.) y después de culminar los trabajos de mantenimiento, se entrega la maquina a producción para dar inicio de arranque de planta, el proceso de la formación del papel desde la entrada de las pacas de material reciclado hasta la salida de papel listo y bobinado se explicó en el Capítulo #1, por lo que se inicia solo con el paso de hoja, este proceso se hace formando la hoja en la mesa de formación y luego esta pasta con forma de hoja, pasa por la malla y el fieltro, preparándose para el proceso de secado, en este caso el papel pasa por el rodillo prensa que este a su vez, coloca la hoja en el rodillo secador llamado Yankee, a una temperatura superficial de 100°C y estando el papel en este punto, las campanas de alto rendimiento (Capotas), insuflan aire caliente para terminar el proceso de secado, justo en ese momento y estando la maquina en arranque, el papel empieza a salir húmedo, los quemadores se ven prendido en la pantalla pero el papel sigue húmedo, sin embargo se ve en pantalla de la HMI que el quemado está pasando de bajo fuego a alto fuego, pero la temperatura se mantiene baja, cabe mencionar que para el arranque de planta, solo se encuentra mantenimiento y producción cerca de la maquina y se empieza a revisar porque no hay temperatura en el ducto guía de aire caliente, estando en la revisión se ve el ducto con una temperatura fuera de limite los sistemas de seguridad no actuaron y el ducto implosionó en menos de 10min, el material se derritió, saliendo fuego que fue controlado por el personal brigadista de la planta. Como se puede evidenciar las siguientes Figura # [8].

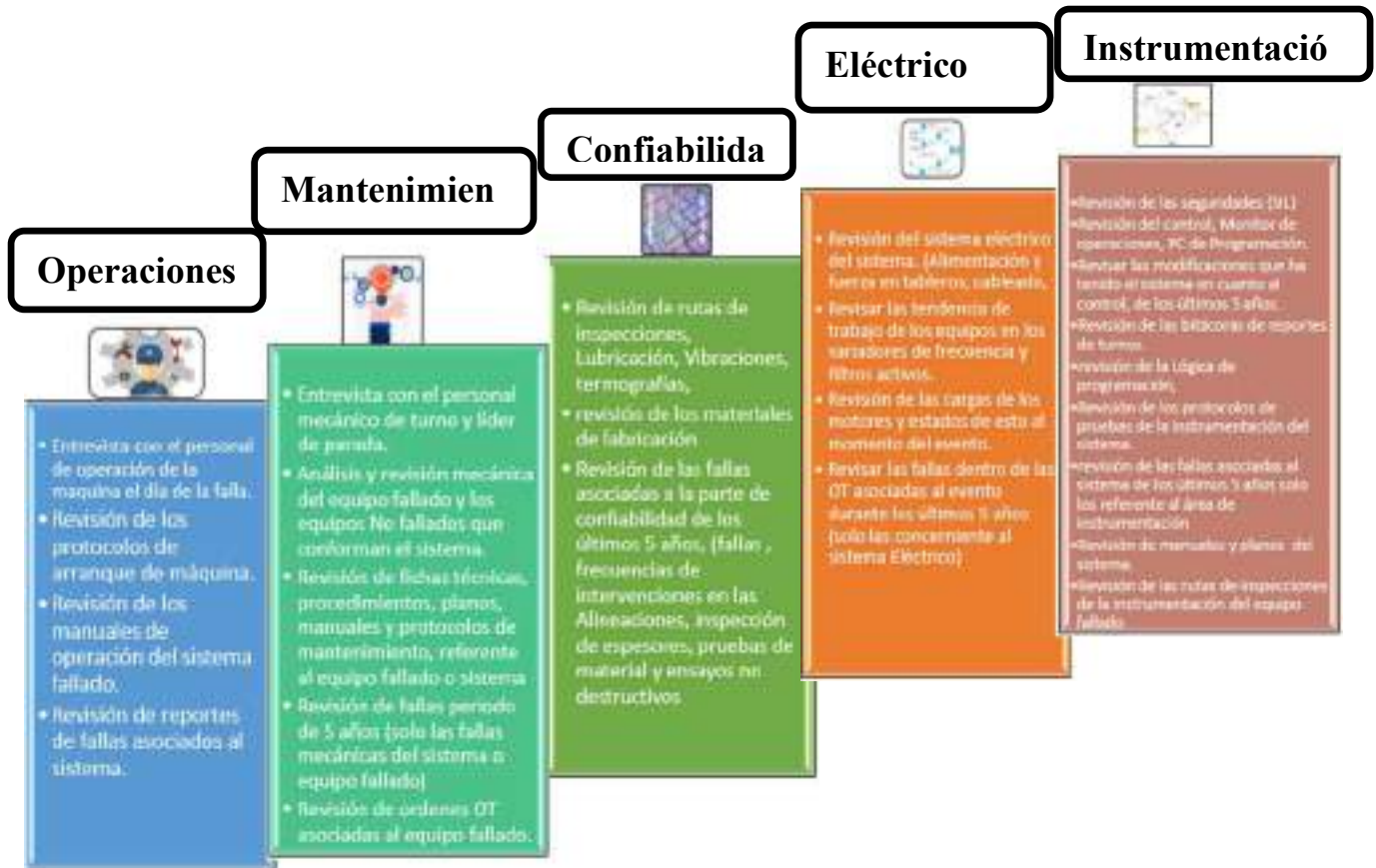
Figura 8. Implosión del Ducto

Fuente: Autor

4.2. Aplicación del AQQC.

La aplicación de la metodología AQQC, Se inicia con la conformación del equipo de trabajo, este debe ser heterogéneo de tal manera que estén representadas distintas visiones del problema, estará a cargo de la investigación en la falla anteriormente mencionada el personal de Instrumentación (Vocero), en esta reunión se define el diagrama funcional, esto con fin de que todos los involucrados conozcan cómo funciona el sistema y por consiguiente los equipos que lo componen, Ver Figura # [9], con el propósito de aterrizar el plan de actividades que se va a ejecutar para cada uno de los integrantes del equipo.

Figura 10. Plan de trabajo de actividades para el personal según la especialidad



Fuente: Autor

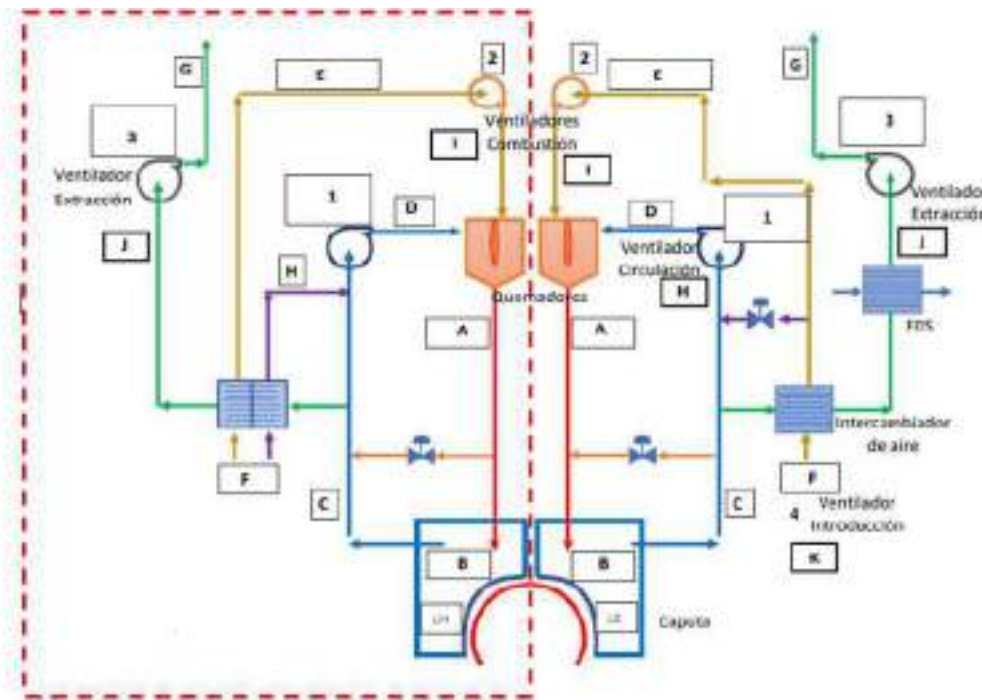
Cabe mencionar las áreas de compra y finanzas son invitadas a la reunión, pero no se le asigna tareas, hasta encontrar las causas que provocaron la falla en el sistema de secado de papel Tissue por campana de alto rendimiento.

4.3. Delimitación del análisis de falla

Luego de tener las actividades delimitamos el conjunto de equipos que vamos a investigar, con el propósito de no hacer trabajos innecesarios, se toma inicialmente, diagrama de bloques funcionales, se identifican los equipos para la intervención y de establecer un diagrama

esquemático, solo los equipos que están dentro del cuadro punteado de color rojo entran en el análisis como se puede observar en la figura # [11]

Figura 11. Delimitación de análisis capota lado



Fuente: Autor

4.4. Análisis de falla de los equipos delimitados.

En la búsqueda de la información se ejecuta el análisis de las bases de datos de los equipos que fueron delimitados, en esta investigación se toman, las bases de datos de los últimos 64 meses año 01/01/2018 hasta 01/04/2023, tomando registros seccionados de las 2 fuentes de información 1002 registros del CMMS MP2 y 951 pertenecientes al ERP SAP modulo PM, estos registros pertenecen solo al sistema de campana de alto rendimiento, una vez se ejecuta la depuración Ver tabla # [2] y tabla # [3], se identifican los mantenimientos preventivos, las rutas de inspecciones, los mantenimientos predictivo y se sacan de la base de dato, dejando todo lo referente al

mantenimiento correctivo y correctivo programado, esta base se depura y se divide en grupos de especialidades (Meca, Elec, Inst, Conf) y se identifica cuál de los correctivos pararon planta Ver tabla # [4], con esta información se determina desde que momento inicia la falla, el aumento o disminución de fallas en el sistema, los equipos con fallas crónicas y se visualiza aparte de la falla que otros equipos están en riesgo de falla de paro.

Tabla # 2 Revisión de fallas en el sistema de campana de alto rendimiento CMMS

REVISIÓN DE FALLAS EN EL SISTEMA DE CAMPANA DE ALTO RENDIMIENTO CMMS MP2						
Sede	Nº de OT	Fecha de inicio	Fecha de terminación	Descripción de la actividad	Especialidad	Sublocalización 1
F-FABRICACION	F006915	15/02/2018	16/02/2018	PM1-CAPOTA LADO NUBEDO CAMBIAR ELECTROVALVULA APERTURA	INST-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F006916	15/01/2018	13/01/2018	PM1-CAPOTA LH INSTALAR UNIDAD DE MITTO EN MANIFOLD ELECTROVALVULA	INST-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F007367	15/01/2018	15/01/2018	PM1-CAPOTA LH (HUKLSECO) 8-INT TENDIDO CABLE DE CONTROL	INST-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F007367	15/01/2018	15/01/2018	PM1-CAPOTA FALLA CABLEADO DE CONTROL	INST-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F007331	26/01/2018	28/01/2018	PM1-01-CAPOTA 5-EXT REVISOR DE ALINEACION DUCTO AL VIBRACION	INST-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F007335	26/01/2018	28/01/2018	PM1-01-CAPOTA 5-EXT MONTAJE Y DESMONTAJE ABLAMEN TO DUCTO	MECA-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F007736	12/01/2018	12/01/2018	PM2-CAPOTA 5-INT TABLERO NEUMATICO	INST-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F007833	26/01/2018	28/01/2018	PM1-01 POSICIONAMIENTO DE LA CAPOTA REPARACION DE FUELLE INGENARI	MECA-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F008227	21/02/2018	21/02/2018	PM1-02-REVISAR ROCE CILINDR CAPOTA CON RESPECTO A LOS TORNELL	MECA-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F008394	15/06/2018	15/06/2018	PM1-05 VENTILADORES CAPOTA FALLA DE FLUJO DE AIRE COMBUSTION	MECA-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F008394	15/06/2018	15/06/2018	PM1-05 VENTILADORES CAPOTA RUT MEC LIMPIEZA DE TODOS LOS VENTILAD	MECA-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F008395	15/06/2018	16/06/2018	PM1-CAPOTA LH REALIZAR RECUBRIMIENTO TERMICO DE FUELLE	MECA-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F008278	25/06/2018	28/06/2018	PM1-05 CAPOTA REVISOR QUINDROS CAPOTA LH Y LS	INST-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F008278	25/06/2018	28/06/2018	CAPOTA REVISOR TERMOCUPLA NO MARCA	INST-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F008478	15/06/2018	15/06/2018	PM1-05 CAPOTA LH CAMBIO DE FUELLE	MECA-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F008936	4/06/2018	10/07/2018	PM1 QUEMADORES CAPOTA ME REPARAR GREITAS DUCTOS QUEMADORES	MECA-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F010851	22/08/2018	15/08/2018	PM1-08 VENTILADOR CAPOTA RUT MEC REVISOR GENERAL POLEAS Y CORRE	MECA-PP	P0101-MADURINA 1
F-FABRICACION	F011897	13/12/2018	18/12/2018	PM1-12 MOTOR VENT INTRLS MOTOR VENT INTR CAPOTALS	ELEC-PP	P0101-MADURINA 1

Fuente: Autor

Tabla # 3 Revisión de fallas en el sistema de campana de alto rendimiento ERP SAP MP

REVISIÓN DE FALLAS EN EL SISTEMA DE CAMPANA DE ALTO RENDIMIENTO ERP SAP MP							
Clase de orden	Orden de Trabajo	Programación	Ejecución real	Descripción de la Actividad	Especialidad	Ubicac técnica	Status sistema
PM02	140003831	26/07/2022	26/07/2022	MPFR QUEMADOR LH MOLINO 1	INS	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	CTEC-08F-K0MF-NLQ-PRE
PM01	140003828	01/08/2022	02/08/2022	ASISTEC CALIBR TERMOC L QUINCA ARRANQUE	INS	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	UB-K1MP-MOVM-NLQ-PRE
PM01	140003830	29/06/2022	29/06/2022	INST Y PROGR CONTROLAD TERMICR REVES LH	INS	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	UB-TRMT-MOVM-NLQ-PRE
PM01	140003838	29/06/2022	29/06/2022	INST Y PROGR CONTROLAD TERMICR HDGAR LH	INS	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	UB-NAO0-MOVM-NLQ-PRE
PM01	140003838	31/05/2022	31/05/2022	CALIBR Y SEGURIDADES P TITULAS QUIM LH	INS	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	UB-K1MP-NLQ-PRE
PM01	140003838	09/06/2022	09/06/2022	VALID TERMOCUPLAS Y SEGURIDADES QUIM LH	INS	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	UB-8HFR-MACO-MOVM-NLQ-PRE
PM01	140003838	24/05/2022	03/06/2022	SERVICIO DE MAUYO SERVICIO CALIBR QUIM LH	INS	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	UB-NAC0-MOVM-NLQ-PRE
PM01	140003835	26/10/2021	26/10/2021	REVISOR RESTRUCTURA P QUEMADOR (H)GENERA	INS	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	CTEC-08TF-08F-K0MF-NLQ-PRE
PM01	140003838	20/10/2021	20/10/2021	MITTO QUEMADOR LH ANCAJE MECROS MOLINO 1	INS	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	CTEC-08TF-08F-K0MF-NLQ-PRE
PM01	140003840	30/05/2022	05/06/2022	REV DE CALIBR TERMOCUPLAS QUEMADOR LH	INS	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	UB-8HFR-MACO-MOVM-NLQ-PRE
PM01	140003836	09/06/2022	11/06/2022	REVISOR INSTRUMENTO CONTROL QUEMADOR LH	INS	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	UB-08ET-PMAT-8HFR-MOVM-NLQ-PRE
PM02	140003838	29/06/2022	06/05/2022	MPFR-05 REVISOR Y AJUSTE 05 CONTROL LH	EJE	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	CTEC-08F-K0MF-NLQ-PRE
PM01	140001474	20/07/2021	21/07/2021	CAMBIAR ROCAMBIEN TO MOTOR CROCUAO LH	EJE	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-VEG0H	CTEC-08F-MACO-MOVM-NLQ-PRE
PM01	140003838	26/06/2022	30/06/2022	REVISOR TABLERO DE CONTROL QUP	EJE	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	CTEC-08TF-08F-K0MF-MOVM-NLQ-PRE
PM01	140006828	01/07/2022	07/07/2022	CAPOTA ME MEDIDAR ILLUMINACION EN LADO NE	EJE	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-NECALH	CTEC-MPR-08F-K0MF-MOVM-NLQ-PRE
PM01	140003837	29/06/2022	21/06/2022	MEJORAR ILLUMINACION ZONA QUEMADORES LH	EJE	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-QUEMAD	LTCE-08TF-08F-MACO-MOVM-NLQ-PRE
PM01	140003838	26/10/2021	26/10/2021	CAMBIAR MOTOR VENT EXTRACCION LH	EJE	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-VEG0H	CTEC-08F-K0MF-MOVM-NLQ-PRE
PM01	140003837	25/06/2022	25/06/2022	MANTEENIMIENTO MOT VENT EXTRACT CAP LH ME	EJE	UNB-PP-PP-MOLINO-CAPOTA-VEG0H	CTEC-08F-K0MF-MOVM-NLQ-PRE

Fuente: Autor

4.5. Causa principal del problema.

Durante la revisión en campo se identificó la causa raíz del problema, en la ejecución de una de las rutinas de mantenimiento se identifica varias termocuplas en fallas, trabajando intermitentemente, como mantenimiento correctivo se revisa el control, señas, alarmas, etc. Junto con la programación de la calibración de las termocuplas, al momento de quitar las termocuplas, calibrarlas e instalarlas una de las termocuplas quedo por fuera, en ese momento se presenta el cambio de turno de los técnicos y queda inconclusa la entrega de las actividades, el líder a cargo recibió el trabajo sin supervisión en sitio y al momento de arrancar en sistema en bajo fuego debe estas en 50°C y la termocupla que estaba afuera media la temperatura ambiente 32°C, por consiguiente el quemador se da cuenta que esta no es la temperatura y abre el sistema inyectando temperatura buscar el Set-Point, esta falla demora 10 minutos tiempo en el cual, la temperatura interna del ducto estuvo alrededor de los 1000°C alcanzando a implosionar el ducto guía y los equipos alrededor, cabe mencionar que el sistema debió dispar y apagar el quemado pero se identifican algunos omisiones de señas las cuales no actuaron con debería actual cuando de instalo el sistema por primera vez.

4.6. Plan de actividades a ejecutar, solución de causas y posibles fallas futuras.

Después de tener identificada la causa principal, a través de las hipótesis planteadas se establecen las tareas a ejecutar para las posibles fallas futuras y seguridades del sistema, teniendo como foco la causa principal o causa raíz del problema, estas tareas son organizadas en el formato. Ver Tabla # [5]. Teniendo en cuenta que una vez se tengan los responsables de cada tarea se establece la reunión con gerencia, compra y finanza, donde se presenta el AQQC, con el fin de

presupuestar las tareas y luego envía el correo dirigido a Auditoria/Mejora continua con copia a todos los interesados, para el seguimiento de la ejecución de las tareas asignadas.

Tabla 5. Formato de ejecución de actividades

ANALISIS DEL AQQC										Codigo: FDSI0000 Version: 3	
Consecutivo N°:	#1	Problema o mejora a analizar:			Daño ducto Gula Quemador Lado Húmedo (Implosión) Máquina Tissue						
Criterio:	Ducto Gula Flujo de Aire Quemador Cofreado Objetivo: Trabajar sin quemador hasta la reparación			Avance anterior:	0%	a la fecha:	20/10/2023	Avance global:	7%		
N°	ACTIVIDAD	TIPO	RESPONSABLE	FECHA INICIO	FECHA FIN PROGRAM	% AVAN	FECHA FIN REAL	ESTADO	OBSERVACIONES	COMPLIMIENTO	
1	Revisión y actualización de rutinas operativas del quemador.	Preventiva	H.Kappel	27/10/23	27/10/23	100%		Cerrada	Se montara en parada MI 18 Oct 2023		
2	Mantenimiento trimestral de los filtros de ventilación e intercambiadores.	Preventiva	H.Kappel	27/10/23	27/10/23	0%					
3	Realizar termografías y mediciones de los sitios de control de dilatación mientras se aumenta temperatura de operación hasta estabilizar en (550)°C, después del cambio del ducto	Preventiva	J.Panglora	02/11/23	02/11/23	0%					
4	Crear rutina trimestral del quemador en SAP para pruebas de control y seguridad de los quemadores	Preventiva	H.Kappel	27/10/23	27/10/23	0%					
5	Cambio de fuelle ducto lado húmedo se encuentra deformado	Corrección	H.Durango	22/11/23	23/11/23	0%					
	Cambiar ducto y cámaras de combustión para quemador										

Fuente: Autor Formato AQQC Falla Campana de alto rendimiento

Capítulo V. Simulación de la implementación Metodología AQQC.

Toda metodología en el ámbito conceptual debe ser implementada, probada y evaluada con el propósito de garantizar los resultados esperando buscando un único objetivo. Es la aplicación de una serie de pasos o en su defecto el procedimiento guía para alcanzar un logro, se puede afirmar que no existe una única o perfecta metodología, siempre hay formas para mejorar desarrollar combinaciones de estas para alcanzar metas propuestas.

En la anterior aplicación de la metodología AQQC se octavo como resultado un formato con 14 actividades a desarrollar, para que la falla ocurrida en el equipo no se vuelva a presentar por ningún motivo. Dentro de las 14 tareas se definen 2 tareas con impacto considerable en el costo

Luego de tener claro el objetivo, se procede con el análisis FEM, para desarrollar este análisis, se necesita la información de las propiedades de los materiales, ver Tabla # [6] y # [7], información de los ventiladores que inyectan aire al sistema, ver tabla 8, y los historiales de temperaturas de trabajo en ciertas fechas antes de la falla ver figura [14].

Tabla # 6 Propiedades del material AISI409

Modulo elástico	205	GPa
Poisson's ratio	0.285	Adimensional
Modulo cortante	81	GPa
Densidad	7820	Kg/m3
Esfuerzo ultimo de tensión	495	MPa
Esfuerzo de compresión	205	MPa
Limite elástico	205	MPa
Coefficiente de expansión térmica	1.8x10 ⁻⁵	/K
Conductividad térmica	16.3	W/(m*K)
Calor específico	500	J/(kg*K)

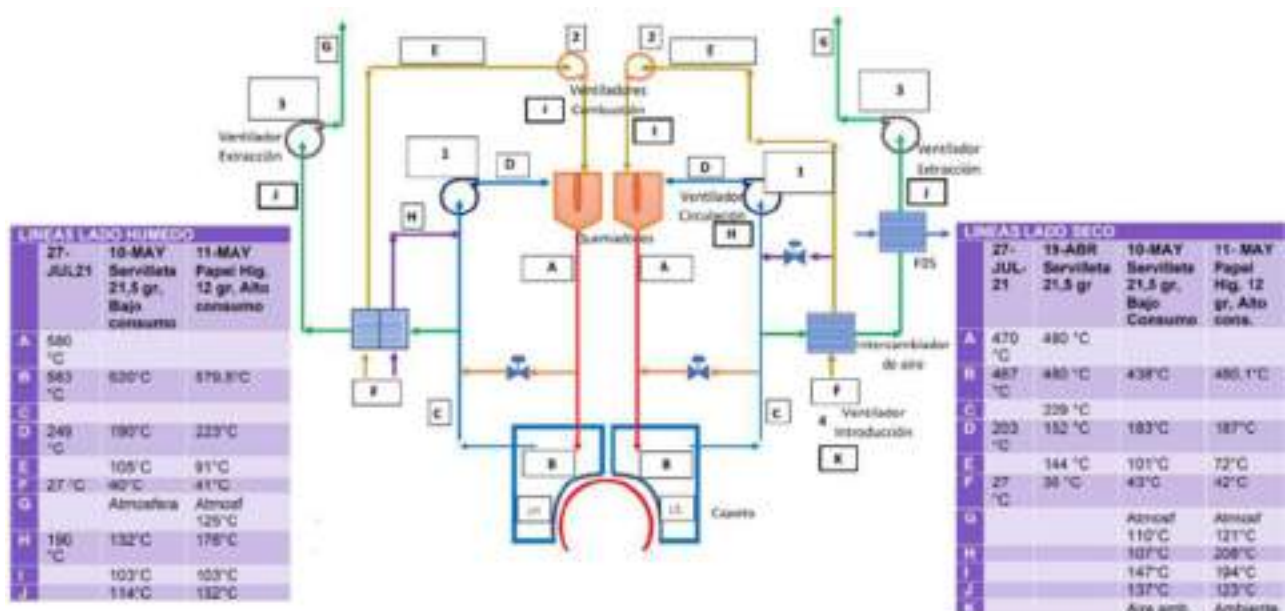
Fuente:<https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=7f38db56864e46659a38760e6de4a>

Tabla # 7 Propiedades del material AISI304L

Modulo elástico	32x10 ⁶	PSI
Poisson's ratio	0.285	Adimensional
Modulo cortante		
Densidad	0.279	Lb/in ³
Esfuerzo ultimo de tensión	55	ksi
Esfuerzo de compresión	14.5	ksi
Limite elástico	25	ksi
Coefficiente de expansión térmica	6.5x10 ⁻⁶	/°F
Conductividad térmica	0.0003055	BTU/(in ² sec ² F)
Calor específico	0.11	BTU/(Lb ² F)

Fuente:<https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e2147b8f727343b0b0d51efe>

Figura # 14 Diagrama y temperaturas de trabajo del ducto LH



Fuente: Autor

Tabla # 8 Datos de los equipos de entrada.

Equipo	Flujo volumétrico (m3/h)	Flujo volumétrico (m3/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de entrada (K)	Presión (Pa)	Marca
Ventilador lado combustión	23100	6.4166	103	376.15	4324	2I
Ventilador lado circulación	65000	18.0556	249	522.15	21194	1D

Fuente: Manual de Operación y Mantenimiento campana de alto rendimiento. Cod. 4500926212

Para llegar al análisis FEM se requiere saber los efectos del fluido, la transferencia de calor y la fuerza generada que incide directamente en la geometría del sólido o ducto por medio de una CFD, en este caso se utiliza la información de los equipos (Ventiladores ver figura # 8) que inyectan flujo volumétrico que viene a una temperatura y presión establecida, las cuales se mezclan en una cámara de combustión que generan un flujo de aire turbulento y calentado hasta una temperatura máxima de 580°C.

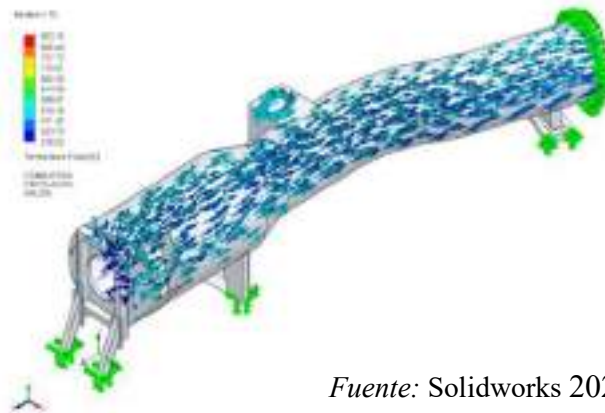
Table # 09 Condiciones de frontera CFD - FEM

Sistema de unidades:	Sistema internacional
Tipo de análisis:	Análisis de flujo interno.
Transferencia de calor en sólidos:	Se consideró el ducto como pared adiabática, debido a que tiene un aislamiento térmico y se asume que la transferencia de calor es igual a cero.
Flujo:	Flujo turbulento. Intensidad del 2%, en una longitud de 23m.
Fluido:	Aire.
Sólidos:	AISI 304L y AISI409.
Parámetros termodinámicos:	Presión estática igual a la atmosférica. Temperatura ambiente 30°C.
Estado inicial de velocidad:	Velocidad inicial del fluido 0m/s.
Entrada 1, condición de frontera:	Entrada de flujo volumétrico del ventilador de combustión a 6.4166m3/s y a una temperatura de 103°C. Presión de 4324 Pa.
Entrada 2, condición de frontera:	Entrada de flujo volumétrico del ventilador de circulación a 18.0556m3/s y a una temperatura de 249°C. Presión de 21194 Pa.
Salida, condición de frontera:	Tipo de salida de presión total, presión atmosférica como referencia y temperatura de fluido a 580°C.
Objetivos de superficie:	1. Presión total del sistema. 2. Velocidad. 3. Flujo máxico. 4. Esfuerzos en paredes del ducto. 5. Fuerzas en las paredes.

Fuente: Autor

- Como resultado del análisis CFD se obtiene la trayectoria del flujo, presiones, fuerzas y esfuerzos en las paredes del ducto. Ver figura # [15].

Figura # 15 Trayectorias de flujo, máximo 853k (580°C) a la salida.



Fuente: Solidworks 2022 Simulation

A través del método de análisis de elementos finitos FEM, podemos evaluar cualquier geometría y aplicarle cargas externas como fuerzas, presiones, fuerzas gravitacionales, fuerzas centrifugas, analizar trazados de esfuerzos, desplazamientos y factor de seguridad. El FEM descompone un objeto real en un gran número (entre miles y cientos de miles) de elementos finitos, como pequeños cubos. Las ecuaciones matemáticas permiten predecir el comportamiento de cada elemento. Luego, los recursos computacionales suman todos los comportamientos individuales para predecir el comportamiento real del objeto.

Tabla # 10 Propiedades del estudio

Tipo de análisis.	Estático.
Tipo de malla.	Malla sólida.
Efectos térmicos.	Activados.
Opción Térmica.	Incluye temperatura del análisis CFD.
Incluye fluid pressure effects from SOLIDWORKS Flow Simulation.	Activado.
Unidades	Sistema internacional SI
Tipo de contacto	Bordes = Componente soldado rígido, como un solo conjunto.

Tipo de malla:	Malla sólida.
Malla usada:	Método de malla de Curvatura.
Puntos Jacobianos de alta calidad:	16 Puntos.
Máximo tamaño de elemento:	40 mm
Mínimo tamaño de elemento:	8 mm.
Calidad de malla:	Alta
Nodos totales:	460168.
Elementos totales:	232374.

Fuente: Solidworks 2022 Simulation

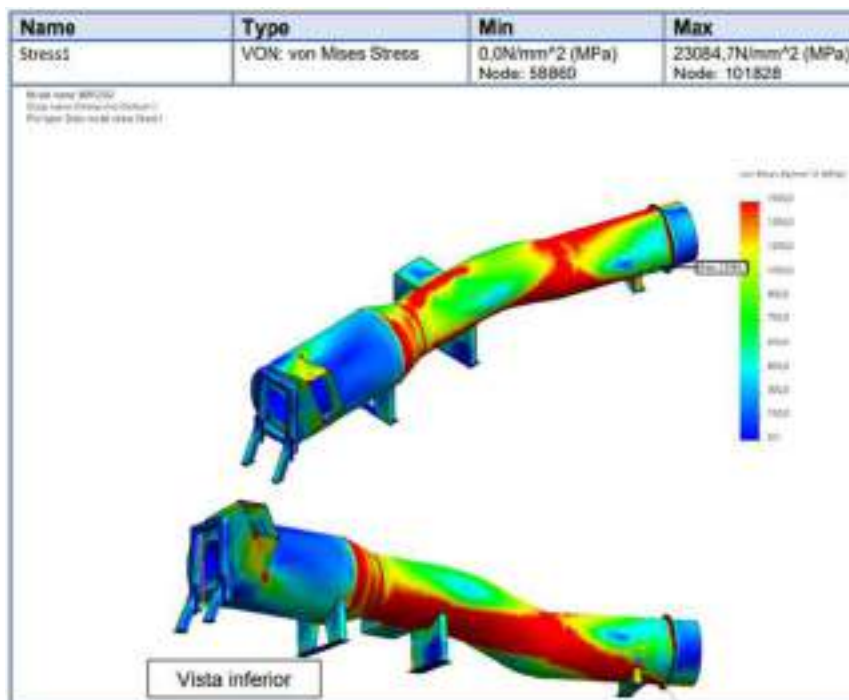
Tabla # 11 Información de las cargas soportadas

Carga	Imagen de la carga	Detalles de la carga	
Gravedad		Valor:	-9.81
		Unidades:	m/s ²
Aislamiento Térmico		Esfuerzo por unidad de área	
		$Esf = \frac{139.53N}{m^2} + \frac{6.5N}{m^2} = 203.30N/m^2$	

Fuente: Autor

- Con toda la información (ver tablas #9, #10, #11) en el Software Solidworks 2022, se corre el modelo dando como resultado FEM.

Figura: # 16 Trazado de Von Mises a 580°C. Fabricación (Modo de falla)



Fuente: Solidworks 2022 Simulation

Como conclusión de la simulación con FEM se tiene que a temperatura máxima (580°C), el ducto presenta un desplazamiento alto en la zona intermedia donde están los codos de transición,

se concluye que hay que agregar un soporte rígido adicional en esa zona para disminuir los desplazamientos causados por la dilatación térmica y los esfuerzos que generan las presiones internas del fluido. Ver figura # [16].

En cuanto a las dilataciones a diferentes temperaturas, el comportamiento del material AISI304L, no presenta roturas de esfuerzo en las paredes, tampoco presenta deformaciones plásticas en las propiedades mecánicas, tener claro que el material AISI304L Es provisional y que se tiene que restablecer el equipo a condiciones de fábrica.

5.1. Costo y presupuesto de la implementación

Después de solicitar la cotización de la fabricación del ducto con La empresa fabricante, se identifica que no es una opción parar la máquina para esperar el material. Por consiguiente, la opción de la reparación del ducto en AISI304L, es la opción viable para trabajar la maquina hasta planear el cambio del ducto por lo que se procede con las cotizaciones. Ver tabla # [12].

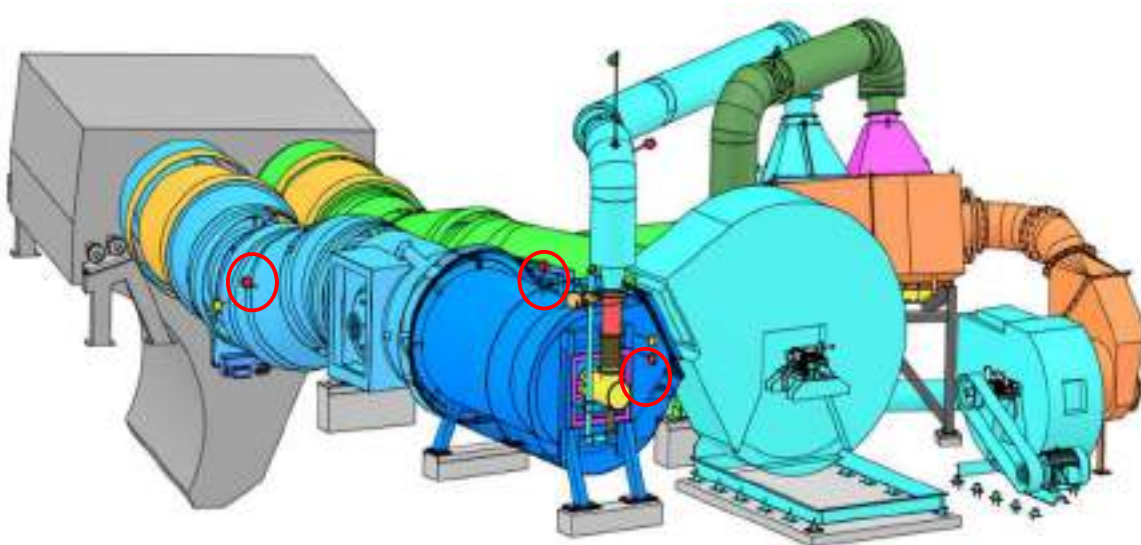
Tabla # 12 Cuadro Comparativo de los Costos Reparación, Fab. y Montaje

Cuadro Comparativo Precio y Motaje			
Proveedor	Prov. 1	Prov. 2	Prov. 3
Tiempo de montaje	14 Días	15 Días	16 Días
Material	AISI 304L	AISI 304L	AISI 304L
Cantidad de Laminas	11	11	11
Dimensiones	6mX1.5mX1/4"	6mX1.5mX1/4"	6mX1.5mX1/4"
Costo del Material	\$ 115.005.000	\$ 120.100.000	\$ 119.130.000
Mano de obra	\$ 95.800.000	\$ 105.285.000	\$ 101.135.000
Transporte y otros	\$ 1.780.000	\$ 1.240.000	\$ 1.570.000
Traslado y Rolado	\$ 10.700.000	\$ 9.800.000	\$ 12.690.000
Area del recubrimiento	44 M2	44 M2	44 M2
Aislamiento	\$ 23.320.000	\$ 23.320.000	\$ 23.320.000
TOTAL	\$ 316.565.000	\$ 329.705.000	\$ 327.805.000

Fuente: Autor

- ✓ Para la **Segunda tarea** se toman los planos del ducto quemador LH y se simula la instalación de los SIL de seguridades adicionales que salieron después de analizar la falla por medio del Software AutoCAD. Ver figura # [17], se digitaliza para poder evidencian donde quedarían las instalaciones, se evalúa el costo del montaje, los costos de la programación del control y el valor de los equipos (Termocuplas),

Figura: # 17 Simulación de montaje de la seguridad del equipo SIL (Termocuplas)



Fuente: Autor

El objetivo principal es garantizar que el sistema responda automáticamente al momento de presentarte cualquier anomalía, que represente un peligro al equipo, como consecuencia el sistema generara una alarma al operario y en sus defectos dependiendo la falla un disparo de Stop de Maquina. Luego se establecen los costos de montaje de los SIL, Ver table # [13]

Tabla: # 13 Presupuesto montaje sistema de seguridad del equipo

Presupuesto de implementación y montaje de SIL			
Actividades	Unidad/M	Precio	Valor total
Termo-posos	3	\$ 925.000	\$ 2.775.000
Termocuplas	4	\$ 1.240.000	\$ 4.960.000
Cable apantallado tipo J	210	\$ 12.300	\$ 2.583.000
Coraza o funda de alta temperatura	210	\$ 7.200	\$ 1.512.000
Tubería Conduit de 1/2"X 6M	160	\$ 3.830	\$ 612.800
Canaleta de cableado	9	\$ 134.000	\$ 1.206.000
Mano de obra de montaje de termo posos	1	\$ 1.280.000	\$ 1.280.000
Mano de obra de montaje de cableado de control	1	\$ 3.850.000	\$ 3.850.000
Programación de PLC	1	\$ 11.240.000	\$ 11.240.000
Pruebas de funcionamiento y seguridades	2	\$ 930.000	\$ 1.860.000
Informe	1	\$ -	\$ -
TOTAL		\$ 19.622.330	\$ 31.878.800

Fuente: Autor

5. Conclusiones.

- El análisis de falla es una disciplina investigativa que proporciona herramientas para la obtención de conocimientos y resultados, estos análisis permite comprender las condiciones de trabajo a las cuales fueron sometidos componentes mecánicos antes y después de la falla, a través de la aplicación de técnicas, paso a paso, métodos se define el camino para lograr identificar la causa principal o raíz del problema con el objetivo de que no se vuelva a presentar buscando atacar cada posible anomalía que tenga una probabilidad de ocurrencia, en la investigación se deja un documento estándar de cómo aplicar la metodología la cual puede ser aplicada en cualquier equipo como forma de investigar fallas ocurridas o en su defecto antes que se presenten.
- Se logró desarrollar una metodología mixta de análisis de falla, para este estudio se ejecutó dicha metodología en la falla presentada en el equipo ducto quemador LH de campana de alto rendimiento para secado de papel tissue, contempla desde la revisión del montaje y diseño, hasta el plan de actividades a ejecutar para que la falla no se vuelva a presentar y como resultado para la gestión de mantenimiento se fusionaron técnicas y metodologías (RCA, AMEF, ECA, FTA) estableciendo así actividades preventivas que atacan no solo la falla principal si no todas las posibles fallos en el sistema o equipos.
- Se presentaron recomendaciones a la empresa de los hallazgos que se identificaron durante la recolección y tratamiento de la información con relación a la probabilidad de ocurrencia de fallas en actividades rutinarias, se simulo las actividades con mayor impacto económico para

aportar a la toma de decisiones, antes de hacer la inversión, generando alternativas que apuntan a la buena gestión del mantenimiento.

6. Referencias Bibliográficas

- Aguirre Mora, C. O. (2015). Análisis de costos del servicio de mantenimiento para camiones de carga pesada y diseño de estrategias de postventa caso AUTEK SA. [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana de Guayaquil]. UPS Repositorio Digital. https://repositorio.ups.edu.ec/aguirre_mora_2015.pdf
- Aparicio, Laura; (2013) Metodologías mixtas para el desarrollo de un plan de mantenimiento enfocado a la reducción de errores humanos bajo la aplicación de la técnica de fiabilidad humana Sherpa Colombia.
- Becker, Stefan J. (2017). Integración de RCA y AMEF para la optimización de procesos en la industria automotriz alemana [Tesis de maestría, Universidad Técnica de Múnich].
- Besterfield, D. H. (2003). Quality Control. Prentice Hall.
- Boudreau, J. & Germgård, U. (2014). Influence of pulp properties on tissue paper quality. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 29(4), 582-591.
- Carlson, C. S. (2012). Effective FMEAs: Achieving safe, reliable, and economical products and processes using Failure Mode and Effects Analysis. John Wiley & Sons.
- Chin, K. S., Wang, Y. M., Poon, G. K., & Yang, J. B. (2009). Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach. Computers & Operations Research, 36(6), 1768-1779.
- Dale, B. G. (2003). Managing Quality. Blackwell Publishing.
- Denzin, N. K., & Lincoln, Y. S. (2005). Handbook of qualitative research.
- Duffuaa, S.O., Raouf, A., & Dixon, J. (2017). Optimization of Maintenance Systems and Operations. Springer.

- Eklund, D. & Lindström, T. (1991). The role of wood polymers in hornification and in the retarding effects of chemical additives. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 6(4), 141-146, 151.
- Ericson II, C. A. (2011). *Fault Tree Analysis - A History*. Proceedings of the 2011 Annual Reliability and Maintainability Symposium.
- Ericson, C. A. (2011). *Hazard Analysis Techniques for System Safety*. John Wiley & Sons.
- Garcés Guerrero, M. d. L. (2011). Optimización del mantenimiento preventivo en función del costo en la empresa Bioalimentar CIA. LTDA. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. ESPOL Repositorio Digital. https://repositorio.espol.edu.ec/garces_guerrero_2011.pdf
- Gómez, Paula A. (2015). Metodología para la gestión de mantenimiento en la industria petrolera colombiana: Un enfoque RCA/AMEF [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]
- Imai, M. (1986). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. McGraw-Hill/Irwin.
- Ishikawa, K. (1986). *Guide to Quality Control*. Asian Productivity Organization.
- Ishikawa, K. (1990). *Introduction to Quality Control*. 3A Corporation.
- Jardine, A.K.S. & Tsang, A.H.C. (2013). *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications*. CRC Press.
- Juran, J. M. (1990). *Juran on Planning for Quality*. New York: Free Press.
- Karlsson, M. (2011). Thermal aspects of paper drying. Proceedings of the 7th International Paper and Coating Chemistry Symposium.
- Kelly, A. (1997). *Maintenance Strategy*. Butterworth-Heinemann.

- Kelly, A., & Harris, M.J. (1978). *Management of Industrial Maintenance*. Butterworth-Heinemann.
- Kelly, A. (1984). *Maintenance Systems and Documentation*. Pergamon.
- Kelly, A. (2019). Maintenance Strategy: Implications from the industry. *Journal of Maintenance Engineering*.
- Kume, H. (1990). *Statistical Methods for Quality Improvement*. Association for Overseas Technical Scholarship (AOTS).
- Latino, R.J., & Latino, K.C. (2006). *Root Cause Analysis: Improving Performance for Bottom-Line Results*. CRC Press.
- Larsen, Kristian E. (2018). *Evaluación de riesgos en plataformas petroleras noruegas mediante árbol de falla y ECA [Tesis doctoral, Universidad de Oslo]*.
- Lee, B. K., & Ha, J. W. (1999). A simplified fault tree analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 64(2), 127-132.
- Liker, J.K. (2004). *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. McGraw-Hill.
- Liu, Y. & Hu, H. (2015). Adhesive formulations of dry strength agents for the Yankee dryer in tissue paper manufacturing. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 481, 267-273.
- López, Juan C. (2016). *Implementación del árbol de falla y ECA en la gestión de riesgos de centrales hidroeléctricas en Colombia [Tesis doctoral, Universidad de los Andes]*.

- Martínez, A. (2014). Metodología para la definición de tareas de mantenimiento basado en confiabilidad, condición y riesgo aplicada a equipos del sistema de transmisión nacional [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UN. http://www.repositorio.unal.edu.co/martinez_2014_tesis.pdf
- McDermott, R. E., Mikulak, R. J., & Beauregard, M. R. (2009). The basics of FMEA. CRC Press.
- McDonald, J.D. (1999). Tissue papermaking on a Yankee. In Paper Technology (Vol. 40, No. 2, pp. 33-39).
- Möller, J., & Hansson, J. (2009). Root Cause Analysis: Simplified Tools and Techniques. ASQ Quality Press.
- Müller, Anna K. (2018). Análisis integrado de RCA y AMEF en la industria farmacéutica suiza [Tesis doctoral, Universidad de Zúrich].
- Modarres, M. (2006). Risk Analysis in Engineering: Techniques, Tools, and Trends. CRC Press.
- Modarres, M., Kaminskiy, M., & Krivtsov, V. (2009). Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide. CRC Press.
- Mobley, R.K. (1998). Maintenance Fundamentals. Butterworth-Heinemann.
- Mobley, R.K. (2002). An Introduction to Predictive Maintenance. Elsevier.
- Mobley, R.K. (2004). Plant Engineer's Handbook. Butterworth-Heinemann.
- Ohno, T. (1988). Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production. Productivity Press.
- Palady, P. (1997). Failure modes and effect analysis: Predicting & preventing problems before they occur. PT Publications.
- Parida, A. & Kumar, U. (2007). Implementing Condition Monitoring Systems in Modern Industries. Stockholm: Maintenance Solutions Press.

- Parida, A. & Kumar, U. (2007). Lifecycle Analysis for Sustainable Maintenance Strategies. International Journal of Sustainable Maintenance Engineering.
- Parida, A. & Kumar, U. (2007). Maintenance Benchmarking: Best Practices & Performance Metrics. Maintenance World.
- Paulapuro, H. (2000). Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End. Fapet Oy.
- Pillay, A., & Wang, J. (2003). Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. Reliability Engineering & System Safety, 79(1), 69-85.
- Pyzdek, T., & Keller, P. (2009). The Six Sigma Handbook. McGraw-Hill.
- Rausand, M. (2011). Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications.
- Rausand, M., & Høyland, A. (2004). System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications. John Wiley & Sons.
- Reeve, D. W. (1996). Pulp Bleaching: Principles and Practice. TAPPI Press.
- Riera Chávez, J. J. (2012). Diseño e implementación de un sistema de mantenimiento industrial asistido por computador para la empresa Cubiertas del Ecuador KUBIEK SA. [Tesis de grado, Escuela Politécnica del Ejército]. ESPE Biblioteca Digital. https://biblioteca.espe.edu.ec/riera_chavez_2012.pdf
- Rooney, J.J., & Vanden Heuvel, L.N. (2004). Root Cause Analysis for Beginners. Quality Progress, 45-53.
- Rossi, Marco L. (2019). Árbol de falla y ECA para la gestión de riesgos en la industria energética italiana [Tesis de maestría, Politécnico de Milán].
- Rother, M. (2010). Toyota Kata: Managing People for Improvement, Adaptiveness, and Superior Results. McGraw-Hill Education.

Shingo, S., & Dillon, A.P. (1989). A Study of the Toyota Production System from an Industrial Engineering Viewpoint. Productivity Press.

Valdivieso Torres, J. C. (2010). Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para la empresa Extruplas S.A. [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. UPS Repositorio Digital. https://repositorio.ups.edu.ec/valdivieso_torres_2010.pdf