

MASTER EN MARINA
TRABAJO FIN DE MASTER

***ESTUDIO DEL MANTENIMIENTO DE
UNA PLANTA DE NEGRO DE CARBÓN
MEDIANTE DIVERSOS MÉTODOS DE
ANÁLISIS DE FALLOS***

Alumno: Torrontegui, Aguado, Lander

Director: Basterretxea, Bitorika, Aingeru

Curso: 2021-2022

Fecha: 8, febrero, 2021

RESUMEN TRILINGÜE

- Castellano:

Después de la Primera y Segunda guerra Mundial, comienza a definirse el concepto de fiabilidad. Como consecuencia se desarrollan nuevos métodos de trabajo que modifican las técnicas de mantenimiento, pese a la reticencia a realizar las cosas de forma distinta a como se venían haciendo. Con el fin de reforzar este nuevo concepto, se propone, mejorar la instrumentación de los equipos y reforzar la formación y supervisión del personal entre otras medidas.

Por ello, el propósito de este trabajo es analizar el plan de mantenimiento de la empresa Cabot Colombiana S.A., planta dedicada al negro de carbón y a otros productos químicos e industriales, para su posterior mejora. Para ello, se han utilizado diversos métodos de análisis de fallos (análisis de criticidad, diagrama de Pareto, etc.), con el objetivo de determinar el tipo de mantenimiento más adecuado a aplicar, ajustándose a las necesidades de la planta.

Palabras clave: fiabilidad, negro de carbón, mantenimiento, métodos, análisis de fallos.

- Euskera:

Lehenengo eta Bigarren Mundu Gerren ostean, fidagarritasun kontzeptua zehazten hasi zen. Honen ondorioz, mantenu teknikak aldatzen zituzten lan método berriak agertu ziren, nahiz eta betiko egite-moduak aldatzearen kontrako iritziak agertu. Ideia hau indartzearen asmoz, honako hauek proposatzen dira: ekipo desberdinen tresneriaren hobekuntza eta langileriaren formakuntza eta gainbegiratzea, besteen artean.

Lan honen helburua Cabot Colombiana SA enpresaren mantenu plana aztertzea da. Enpresa honek ikatz-beltzarekin eta beste produktu kimiko eta industrialekin lan egiten du, haien hobekuntzarako. Mantenu planaren azterketa egiteko akats-analisi método desberdinak erabili dira, (kritikotazun analisisa, Pareto diagrama, etc.), mantenu moten artean fabrikarentzat egokiena zein den jakiteko.

Hitz gakoak: fidagarritasun, ikatz-beltza, mantenu, metodoak, akats-analisisa.

- Inglés:

After the First and Second World Wars, the concept of reliability began to be defined. As a result, new working methods were developed that modified maintenance techniques, despite the reluctance to do things differently from the way they had been done. In order to reinforce this new concept, it is proposed to improve the instrumentation of the equipment and to reinforce the training and supervision of the employees, among other measures.

Therefore, the purpose of this work is to analyse the maintenance plan of the company Cabot Colombiana S.A., a company dedicated to carbon black and other chemical and industrial products, in order to improve it. For this, several failure analysis methods have been used (criticality analysis, Pareto diagram, etc.), with the aim of determining the most appropriate type of maintenance to be applied, according to the needs of the plant.

Key words: reliability, carbon black, maintenance, methods, failure analysis.

ÍNDICE

RESUMEN TRILINGÜE	2
LISTA DE TABLAS.....	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE ACRÓNIMOS	9
1. INTRODUCCIÓN	10
2. OBJETIVOS.....	11
3. TEORIA DEL MANTENIMIENTO	12
3.1. Introducción	12
3.2. Tipos de mantenimiento	15
3.2.1. <i>Mantenimiento Correctivo</i>	15
3.2.2. <i>Mantenimiento Preventivo</i>	15
3.2.3. <i>Mantenimiento Predictivo</i>	15
3.2.4. <i>Mantenimiento Cero Horas (Overhaul)</i>	15
3.2.5. <i>Mantenimiento En Uso</i>	15
3.2.6. <i>Mantenimiento basado en RCM</i>	16
3.2.7. <i>Mantenimiento Productivo Total (TPM)</i>	16
4. PRESENTACIÓN DE LA PLANTA.....	18
4.1. Descripción del proceso	20
4.2. Descripción del producto	22
4.3. Equipos principales de la planta	24

4.3.1. Filtros Principales MUF (membrana de ultrafiltración)	24
4.3.2. Filtros de Proceso.....	25
4.3.3. Filtros de Purga.....	25
4.3.4. Chimeneas	26
4.3.5. Reactor.....	27
4.3.6. Intercambiador	27
4.3.7. Venturi	28
4.3.8. Molino.....	28
4.3.9. Peletizador.....	29
4.3.10. Secador.....	30
5. METODOS DE ANÁLISIS	31
5.1. Diagrama de Pareto.....	31
5.2. Análisis de criticidad	34
5.3. Análisis del Modo y Efecto de Fallos (AMEF)	36
6. PROPUESTA DE MEJORAS.....	46
7. CONCLUSIONES	48
BIBLIOGRAFÍA.....	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fallos por equipo

Tabla 2. Horas perdidas por equipo

Tabla 3. Criterios evaluación Frecuencia

Tabla 4. Criterios evaluación Severidad

Tabla 5. Causas típicas de fallo

Tabla 6. Criterios valoración Ocurrencia

Tabla 7. Criterios valoración Severidad

Tabla 8. AMEF Filtros Principales MUF

Tabla 9. AMEF Reactor

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. McCue, primera planta de negro de humo de Godfrey y Samuel Cabot (fundadores de Cabot S.A.)

Figura 2. Sedes de Cabot S.A. en todo el mundo

Figura 3. Objetivos medioambientales

Figura 4. Proceso de Negro Térmico

Figura 5. Proceso Negro de Horno

Figura 6. Desarrollo de la estructura de Negro de Carbón

Figura 7. Gránulos de Negro de Carbón

Figura 8. Filtros Principales y mangas internas de los filtros

Figura 9. Filtros de Proceso

Figura 10. Filtros de Purga

Figura 11. Chimeneas o “flare stacks”

Figura 12. Reactor

Figura 13. Intercambiador de calor

Figura 14. Efecto Venturi

Figura 15. Molino de Rodillos

Figura 16. Peletizador

Figura 17. Secador de tambor rotatorio

Figura 18. Diagrama de Pareto (fallos por equipo)

Figura 19. Diagrama de Pareto (horas perdidas por equipo)

Figura 20. Matriz Criticidad

Figura 21. Línea de producción de negro de carbón abril 2009 – abril 2010

LISTA DE ACRÓNIMOS

RCM: Reliability Centered Maintenance (Mantenimiento Basado en Fiabilidad)

TPM: Total PRoductive Maintenance (Mantenimiento Productivo Total)

MUF: Membrana de Ultra Filtración

AMEF: Análisis del Modo y Efecto de Fallos

FMEA: Failure Mode Effects Analisis

NASA: National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio)

TNO: Tiempo de No Operación

TO: Tiempo de Operación

TBF: Time Between Failure (Tiempo Entre Fallos)

RPN: Risk Priority Number (Numero de Prioridad de Riesgo)

1. INTRODUCCIÓN

Desde finales del siglo XIX el mantenimiento ha pasado por distintas etapas, ya que este ha evolucionado de la mano de la revolución industrial y por ello, ha ido adaptándose a los diferentes cambios y necesidades. La posguerra supone una etapa importante cuando se habla de mantenimiento industrial debido a la importancia que adquiere el término de fiabilidad y la aparición de nuevos métodos de trabajo, modificando las técnicas utilizadas hasta el momento.

En la actualidad, aún pueden encontrarse muchas empresas que siguen ancladas en técnicas del pasado, por lo que sus métodos de trabajo pueden categorizarse como obsoletos. Cuando la actividad de mantenimiento se rige por la reparación de averías urgentes sin contar con una planificación adecuada del tipo de mantenimiento que necesita cada uno de los equipos de la planta industrial, aparecen algunos aspectos que perjudican su efectividad, como es la pérdida de producción.

Por ello, se ha visto la necesidad de realizar un estudio del mantenimiento de una planta de negro de carbón mediante diversos métodos de análisis de fallos. Dichos análisis se han llevado a cabo teniendo como referencia la lista de fallos en la línea de producción de la empresa Cabot Colombiana S.A.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto fin de master es determinar el tipo de mantenimiento más adecuado a aplicar en una planta industrial. Para la realización del trabajo se ha seleccionado la compañía Cabot Colombiana S.A. Esta empresa cuenta con distintas delegaciones por todo el mundo y desde 1966 se dedica a la compraventa, importación y exportación de negro de carbón y otros productos químicos e industriales. Mediante distintos métodos de análisis de fallos se pretende detectar las deficiencias más habituales en la planta y así conseguir optimizar el mantenimiento de esta.

3. TEORIA DEL MANTENIMIENTO

3.1. Introducción

La ingeniería del mantenimiento es la parte de la ingeniería dedicada al estudio y desarrollo de técnicas que faciliten el mantenimiento de una instalación, como puede ser; una planta industrial, un buque, un edificio, etc. La gestión del mantenimiento de una instalación afecta a los cuatro objetivos básicos del mantenimiento; disponibilidad, fiabilidad, vida útil y el coste de explotación a lo largo de toda su vida. (1)

Se conoce como mantenimiento, el conjunto de técnicas destinadas a conservar equipos e instalaciones industriales en servicio durante el mayor tiempo posible y con el máximo rendimiento. (2)

Desde finales del siglo XIX el mantenimiento ha pasado por distintas etapas. Al inicio de la revolución industrial los operarios se encargaban de las reparaciones de los equipos. Según las maquinas iban evolucionando y la dedicación a tareas de reparación aumentaba, comenzaron a crearse los primeros departamentos de mantenimiento, con cometidos diferentes a los de los operarios de producción. En esta etapa del proceso industrial, las tareas eran principalmente correctivas, destinando la mayor parte del tiempo a solucionar los problemas que aparecían en los equipos.

Después de la Primera y la Segunda Guerra Mundial y de la crisis energética de 1973 comienza a definirse el concepto de fiabilidad, como consecuencia, se desarrollan nuevos métodos de trabajo que modifican las técnicas de mantenimiento:

1. La robustez del diseño, a prueba de fallos, con el fin de minimizar las intervenciones de mantenimiento.
2. El mantenimiento predictivo, como disyuntiva al mantenimiento preventivo.
3. En el análisis de fallos, tanto los que han ocurrido como los que tienen probabilidad de ocurrir.

Se desarrolla el mantenimiento basado en fiabilidad o RCM. Este tipo de mantenimiento está fundamentado en el estudio de los equipos, en análisis de los modos de fallo y en la aplicación de técnicas estadísticas y tecnología de detección. El RCM como filosofía de mantenimiento se basa en la tecnología.

4. La implicación de todas las instalaciones en la organización del mantenimiento.

Aparece el concepto TPM, o Mantenimiento Productivo Total, en el que algunas de las tareas normalmente realizadas por el personal de mantenimiento ahora pasan a realizarse por operarios de producción. Estas tareas 'transferidas' son trabajos de limpieza, lubricación, ajustes, reaprietes de tornillos y pequeñas reparaciones. Con esto se pretende conseguir, que el operario de producción se implique más en el cuidado de la máquina, teniendo como objetivo el TPM, conseguir cero averías o una aproximación. Como filosofía de mantenimiento, el TPM se basa en la formación, motivación e implicación del equipo humano, en lugar de la tecnología. (1)

Sin embargo, aún existen muchas empresas que siguen ancladas en técnicas de mantenimiento obsoletas, además, existen otros sectores industriales más específicos como puede ser el sector marítimo, donde la aplicación de estas técnicas de mantenimiento actualizadas no es compatible con la diversidad de buques mercantes existentes hasta la fecha, a esto se suma, la reticencia a realizar las cosas de forma distinta a como se han hecho siempre.

Todavía quedan muchas empresas en las que la actividad de mantenimiento está regida por la reparación urgente de averías, siendo la propia planta la que marca las pautas y no los profesionales a cargo de ella.

Así mismo, aún quedan muchos responsables de mantenimiento que consideran que estos nuevos métodos como: la implantación del TPM o RCM, el análisis de fallos potenciales o la elaboración de un plan de mantenimiento programado, son conceptos interesantes desde un punto de vista teórico, pero poco factibles a nivel práctico.

Existen diversos motivos por los que una planta industrial debería planificar el tipo de mantenimiento más adecuado para su buen funcionamiento, es decir, razones por las que sean los operarios los que gestionen el mantenimiento de las instalaciones y no al contrario.

Estos motivos son:

1. El coste elevado que supone en la mayoría de casos la pérdida de producción. Este coste normalmente es muy superior al de la propia reparación.
2. Porque la mayoría de las instalaciones deben estar disponibles durante mucho tiempo y además deben ser fiables. Un claro ejemplo es el de los buques, estos deben estar disponibles continuamente durante todo el viaje. Ello supone que deben planificarse ciertas previsiones sobre la operatividad y el manejo de la instalación, evitándole a la empresa sobrecostes excesivos.
3. Porque en la actualidad, la seguridad y el medio ambiente cada vez adquieren mayor importancia en la gestión industrial.

Por todas estas razones, es necesario definir formas de actuación, además de objetivos, e identificar oportunidades de mejora, con el fin de tener el control sobre la instalación desde el punto de vista del mantenimiento.

3.2. Tipos de mantenimiento

Con el tiempo, los equipos, maquinas e instalaciones han evolucionado de manera que cada vez son más complejos, exigiendo una mejora continua y mayor dedicación por parte de los técnicos de mantenimiento.

Históricamente, se distinguen varios tipos de mantenimiento, dependiendo del tipo de tareas que conlleve el mantenimiento a realizar.

3.2.1. *Mantenimiento Correctivo*: es el conjunto de tareas destinadas a corregir los defectos que se van presentando en los equipos, comunicados al departamento de mantenimiento por los propios operarios.

3.2.2. *Mantenimiento Preventivo*: tiene como objetivo mantener un nivel de operatividad determinado en los equipos, programando las actuaciones de los técnicos en el momento más adecuado. Es un mantenimiento de carácter metódico, se realiza, aunque el equipo no muestre ningún síntoma de tener un problema.

3.2.3. *Mantenimiento Predictivo*: este tipo de mantenimiento consiste en conocer e informar permanentemente del estado y operatividad de las instalaciones mediante el conocimiento de los valores de determinadas variables, representativas de tal estado y operatividad. Tales como: temperatura, vibración, consumo de energía, etc.

3.2.4. *Mantenimiento Cero Horas (Overhaul)*: es el conjunto de tareas cuyo objetivo es revisar los equipos a intervalos programados, antes de que aparezca ningún fallo. Esta revisión tiene como objetivo, dejar el equipo a cero horas de funcionamiento, es decir, como si fuese nuevo. En este tipo de revisiones se sustituyen todos los componentes deteriorados por el uso. Con ello se pretende asegurar el buen funcionamiento del equipo durante un tiempo fijado con anterioridad.

3.2.5. *Mantenimiento En Uso*: se trata del mantenimiento básico de un equipo, normalmente realizado por los operarios del mismo. Consiste en realizar una serie de tareas básicas, como pueden ser: inspecciones visuales, limpieza, lubricación, reapriete de tornillos, etc, para las que no es necesario una gran formación por parte del usuario del equipo, es suficiente con un breve entrenamiento. (3)

3.2.6. *Mantenimiento basado en RCM*: respecto a las técnicas mencionadas anteriormente, el mantenimiento basado en RCM, es una de las más modernas para la elaboración de un plan de mantenimiento, ya que esta cuenta con algunas ventajas sobre las otras técnicas. En un principio, fue desarrollada para ser utilizada en el sector de la aviación. Visto que no se obtenían buenos resultados en la seguridad de la navegación aérea, se trasladó al campo militar y mucho después al industrial.

Esta técnica está basada en exponer todos los fallos potenciales que puede presentar una instalación, en identificar las causas que los originan y en la forma de prevenir esos fallos, según la importancia de cada uno.

El objetivo de un mantenimiento centrado en fiabilidad es, como su propio nombre indica, aumentar la fiabilidad de la instalación, consiguiendo así disminuir el tiempo de parada debido a averías imprevistas que interrumpan la producción. De esta manera también se consigue disminuir los costes de mantenimiento, ya que la planta está en disposición de producir durante más tiempo.

Analizar este tipo de fallos potenciales de una instalación industrial, proporciona unos resultados:

- Ayuda a entender mejor el funcionamiento de los equipos.
- Estudia todas las posibilidades de fallo y desarrolla mecanismos para evitarlos.
- Define una serie de acciones para que la planta permanezca el menor tiempo posible parada y así no interrumpa la producción. (4)

3.2.7. *Mantenimiento Productivo Total (TPM)*: el Mantenimiento Productivo Total se enfoca en el mantenimiento proactivo y preventivo para maximizar la eficiencia operativa del equipo. Es un programa de mantenimiento cuyo objetivo es aumentar considerablemente la producción y, a la vez, incrementar la motivación del personal de la planta. Este programa enfoca el mantenimiento como una parte imprescindible del proceso de producción, los tiempos de inactividad para realizar el mantenimiento forman parte del día a día en la producción. El objetivo es mantener al mínimo el mantenimiento rutinario y no programado.

El TPM se desarrolló en la década de 1960 y se basa en las 5S y ocho pilares. Establecer objetivos para maximizar la eficiencia de los equipos e

involucrar a todos los departamentos en la planificación, la producción, la calidad y el mantenimiento, son los principales objetivos de las 5S y los ocho pilares o actividades de apoyo. Todo ello se traduce: en un mantenimiento sin averías, sin interrupciones de producción, sin defectos y sin accidentes. (5)

El termino de las 5S proviene de cinco palabras japonesas.

- Seiri: clasificar
- Seiton: ordenar
- Seiso: limpiar
- Seiketsu: estandarizar
- Shitsuke: disciplinar

Este tipo de mantenimiento cuenta con ocho pilares dirigidos a implementar de manera proactiva la fiabilidad de las maquinas.

- Mantenimiento autónomo
- Mantenimiento planificado
- Mantenimiento de calidad
- Mejoras enfocadas
- Prevención del mantenimiento
- Formación y entrenamiento
- Salud, seguridad y medio ambiente
- Funciones de oficina

En la planta de Cabot Colombiana S.A., el tipo de mantenimiento más utilizado es una combinación de las técnicas de mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo. Por un lado, el mantenimiento correctivo, utilizado con el fin de reparar las averías que surgen en los equipos de manera imprevista, el preventivo, en el que se programan las intervenciones de los técnicos, con el fin de realizarlas en el momento más adecuado y el predictivo, con el propósito de conocer permanentemente el estado y la operatividad de las instalaciones mediante ciertos valores de determinadas variables como; temperatura, vibraciones, etc. Estas técnicas persiguen el mismo objetivo, evitar que la planta se detenga para no interrumpir la producción.

4. PRESENTACIÓN DE LA PLANTA

La empresa seleccionada para el estudio del plan de mantenimiento ha sido Cabot Colombiana S.A. cuya sede principal se encuentra en Boston, Massachusetts, Estados Unidos. Es una empresa productora de Negro de Humo,



*Figura 1. McCue, primera planta de negro de humo de Godfrey y Samuel Cabot (fundadores de Cabot S.A.)
Fuente: www.cabotcorp.com*

también conocido como Negro de Carbón, para la industria nacional y de exportación. Desde 1966 se dedica a la compraventa, importación y exportación de Negro de Carbón y otros productos químicos e industriales, además, forma parte de una red internacional de plantas de Cabot Corporation Inc. repartidas por todo el mundo; Norte América, Sur América, Europa, Asia Pacífico y China. Esta compañía manufactura en torno a 50 tipos distintos de negro de carbón, en función de las necesidades requeridas por sus clientes, para cada tipo de aplicación. Entre estos se encuentran: Regal, Sterling, Vulcan, Black Pearls, Monarch, Mogul y Elftex. El negro de carbón se utiliza: en cubiertas de neumáticos, cableado eléctrico, equipamiento electrónico, y nuclear, artículos de caucho y goma, artículos mecánicos, tintas de impresión y tóner, etc. Uno de los usos más antiguos es en los pigmentos de las pinturas. Además, Cabot S.A. también se dedica a la aplicación de capas de negro de carbón en tuberías y conductos de plástico y caucho, otorgándoles propiedades de aislamiento eléctrico. Este tipo de tuberías son utilizadas principalmente en, mangueras de combustible, tuberías de abastecimiento de gases, en cableado de alto voltaje, etc. Por último, mencionar que una de las aplicaciones más actuales del negro de carbón es, en los viñedos franceses, mediante unos mantos plásticos negros que cubren la tierra sobre la que se encuentran las vides, con el fin de preservarlas de agentes externos, como por ejemplo las heladas nocturnas.

Las materias primas necesarias para la producción del negro de carbón provienen principalmente del cracking térmico que se realiza en las plantas petroquímicas y del antraceno.



Figura 2. Sedes de Cabot S.A. en todo el mundo Fuente: www.cabotcorp.com

Pese a manejar productos químicos e industriales, la compañía está muy comprometida con el medio ambiente, por ello, le da gran importancia al uso eficiente y seguro de los recursos naturales destinados a la producción. Además, cumple con los objetivos marcados, con el fin de reducir las emisiones de gases que favorecen al efecto invernadero y la intensidad energética.

Gracias a todas estas medidas, la empresa consigue moderar su huella ecológica. Para poder alcanzar estos objetivos invierte gran parte de su capital en nuevos equipos e infraestructura, con el fin de mantener el cumplimiento de las normas de contaminación cada vez más restrictivas y al mismo tiempo poder aumentar la eficiencia energética y reducir el impacto medioambiental. (6)

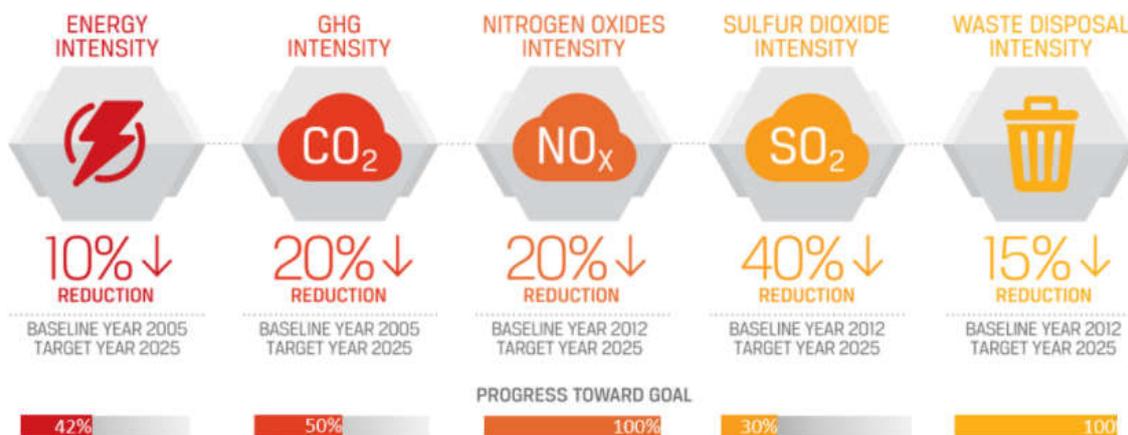


Figura 3. Objetivos medioambientales Fuente: www.cabotcorp.com

4.1. Descripción del proceso

Hasta 1872 no se obtuvo el llamado negro de carbón a nivel industrial en una fábrica de New Cumberland (Estados Unidos). El negro de humo se producía mediante el enfriado de una llama de gas contra losas de esteatita (variedad de talco compactado) rascando el producto adherido a las paredes, posteriormente. A partir de 1872 se dieron importantes modificaciones en el proceso de obtención; cabe destacar el descubrimiento del inglés Mote en 1904, del efecto reforzador del negro de carbón al hule, patente del primer proceso térmico en plena Primera Guerra Mundial. En 1928 la aparición del horno de gas, revolucionó la producción del negro de carbón y la aparición en Texas del proceso del horno de aceite, debida a J. C. Krejci. (6)

Fundamentalmente se utilizan dos procesos de fabricación de negro de carbón: negro de horno o proceso de horno de aceite y negro térmico, también conocido como horno de gas.

En el proceso de *negro térmico* se utiliza como materia prima gas natural que consta principalmente de metano. A lo largo del proceso se utilizan un par de hornos que se alternan aproximadamente cada cinco minutos entre precalentamiento y producción de negro de carbón. El gas natural se inyecta en el horno recubierto de material refractario en caliente y ausencia de aire, descomponiendo el calor del material refractario, el gas natural, en negro de carbón e hidrogeno. La corriente de material de aerosol se extingue con chorros de agua y se filtra a través de un filtro de bolsa. El producto obtenido se procesa posteriormente con el fin de eliminar las impurezas, se peletiza, evalúa y por último se empaqueta o almacena en los silos.

El gas sin hidrogeno se quema en aire para precalentar el segundo horno. El calor residual se utiliza fundamentalmente para generar energía eléctrica.

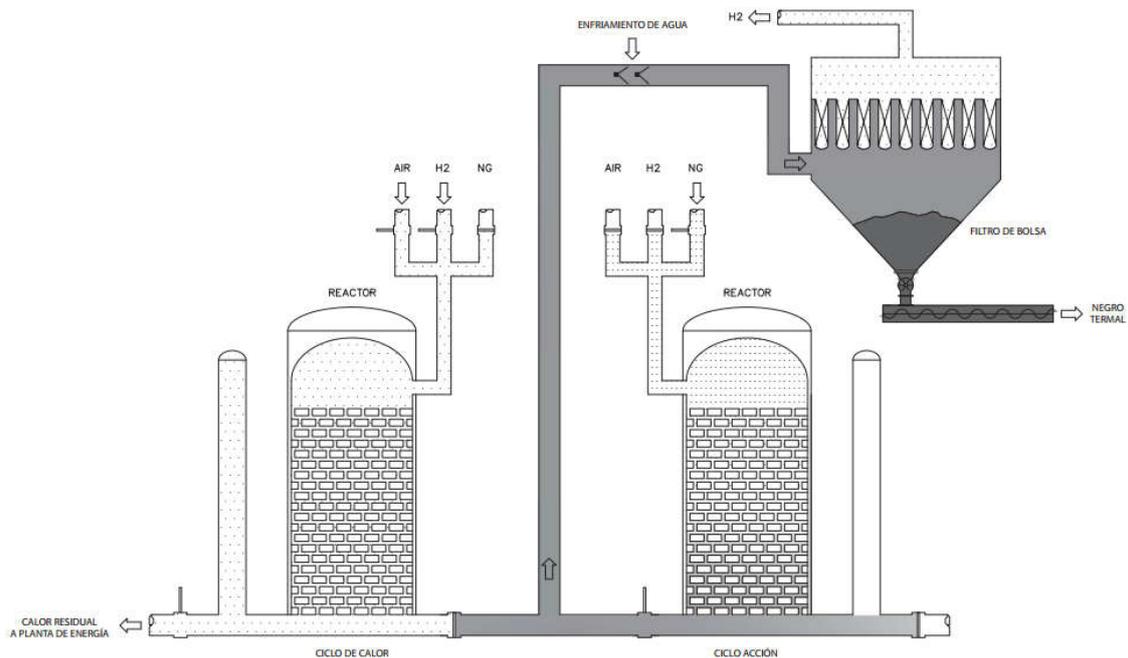


Figura 4. Proceso de Negro Térmico Fuente: www.carbon-black.org

En Cabot S.A., el método utilizado para la producción de negro de carbón es el de *negro de horno*, que utiliza como materia prima aceites aromáticos pesados. Los hornos de producción emplean boquillas de atomización en un reactor cerrado con el fin de pirolizar el aceite de alimentación bajo condiciones controladas, principalmente temperatura y presión. La materia prima se introduce en una corriente de gas caliente en la que el material de alimentación se vaporiza y se piroliza, formando partículas microscópicas de carbón. La velocidad de reacción se controla con chorros de vapor en casi todos los reactores de horno. El negro de carbón sale del reactor y pasa por los intercambiadores de calor donde es enfriado y recogido en filtros de bolsa. A continuación, se procesa para eliminar las impurezas.

Después de pasar por los filtros de mangas, el producto es peletizado, secado, analizado y preparado para su almacenaje en silos. El gas residual remanente en el reactor, cuenta con una gran variedad de gases como monóxido de carbono e hidrogeno. La mayoría de las plantas utilizan este gas residual para la producción de calor, vapor o energía eléctrica.

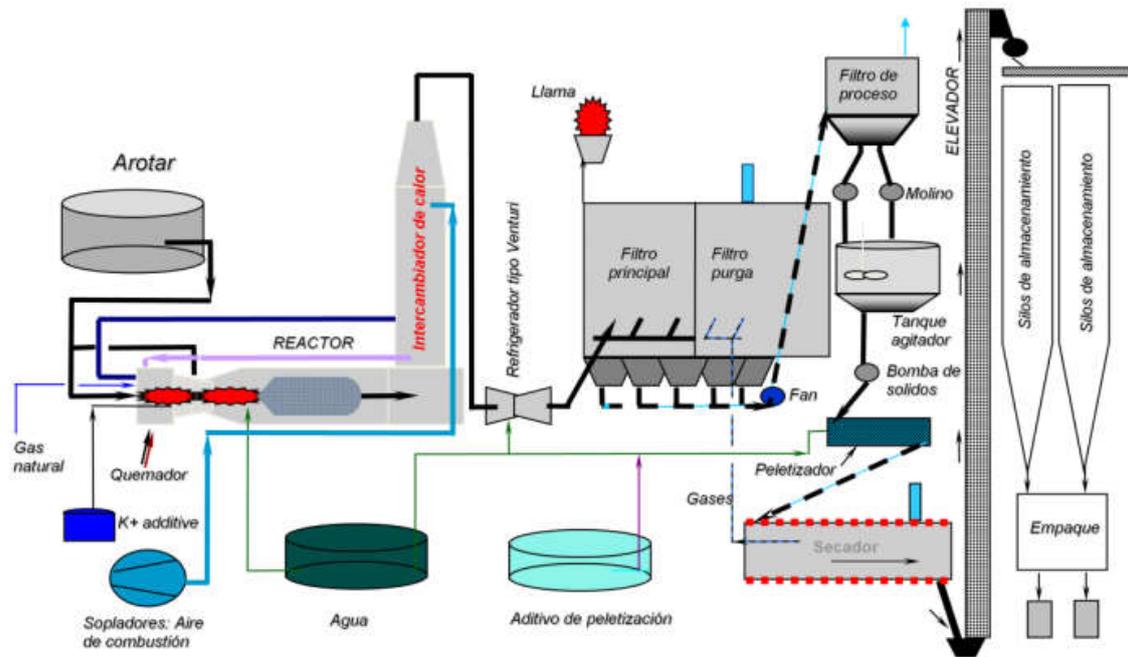


Figura 5. Proceso Negro de Horno. Fuente: Universidad Tecnológica de Bolívar

4.2. Descripción del producto

Los productos conocidos a día de hoy como negro de carbón, son descendientes directos de los “negros de humo”, producidos por los chinos hace más de 3500 años. Los primeros negros de humo no eran muy puros y se diferenciaban considerablemente en su composición química de los actuales negros de carbón.

El negro de carbón, es carbón elemental puro en forma de partículas coloidales producidas por la combustión parcial o la descomposición térmica de hidrocarburos gaseosos o líquidos en condiciones controladas. Físicamente se trata de un polvo negro o gránulos negros finamente divididos, estos forman agregados de morfología aciniforme (con forma de racimos), compuestos de partículas primarias esferoidales (Nódulos), presentando uniformidad de tamaño

en los agregados. Importantes fuerzas eléctricas mantienen la integridad del agregado y fomentan la formación de aglomerados.

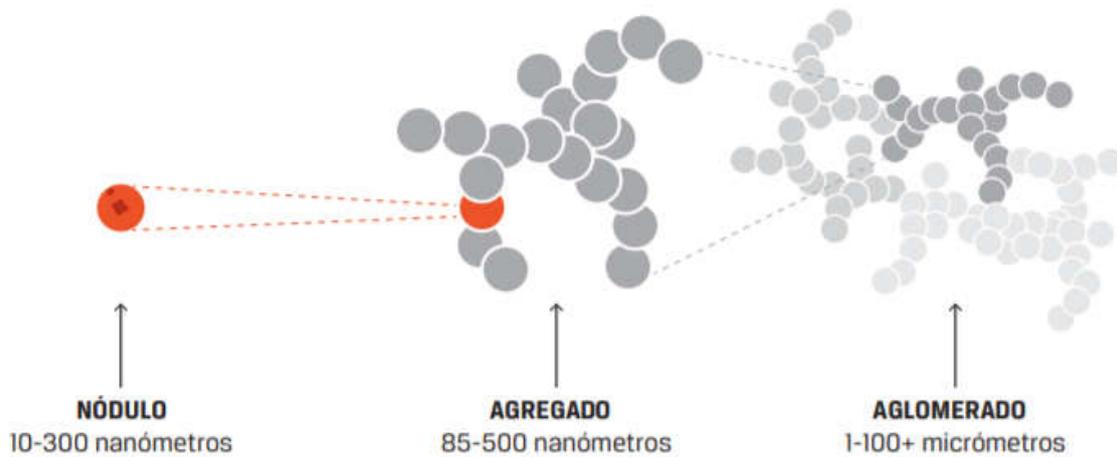


Figura 6. Desarrollo de la estructura de Negro de Carbón Fuente: www.carbon-black.org

El Negro de Carbón es considerado un material nanoestructurado, es decir, es un material que tiene estructura interna o superficial en nanoescala. Comúnmente, el negro de carbón se transporta y se coloca en el mercado en forma de gránulos (aglomerados comprimidos), con el objetivo de facilitar su manipulación y así poder reducir la formación de polvo. El tamaño de estos gránulos, normalmente es inferior a un milímetro. (7)



Figura 7. Gránulos de Negro de Carbón Fuente: www.carbon-black.org

Gran parte de la producción de negro de carbón, se utiliza en la industria de cauchos naturales y sintéticos, aunque también puede utilizarse como pigmento en una amplia gama de productos: neumáticos, mangueras hidráulicas, correas, cintas transportadoras, recubrimiento de techos en edificios, tintas, pinturas, plásticos, etc.

4.3. Equipos principales de la planta

Para entender mejor el proceso de fabricación del negro de carbón, a continuación, se describen los equipos principales de la línea de producción, que posteriormente servirá de ayuda en el análisis de las tablas de fallos.

4.3.1. Filtros Principales MUF (membrana de ultrafiltración)

Se utilizan para separar, en un proceso de producción ininterrumpido, el negro de carbón de los gases que le acompañan provenientes del reactor. Ambos elementos tienen gran valor en el proceso. El negro de carbón se deposita en mangas internas del filtro y los gases pasan a través de estas, utilizándose posteriormente como fuente de calor en secadores, etc.

Los tipos de mangas más utilizados son:

- Mangas de fibra de vidrio convencional: el propio negro de carbón depositado en la tela hace de filtro. Esto se conoce como filtración profundizada.
- Mangas revestidas con membranas: El negro de carbón se recopila en la superficie de las membranas. Esto se denomina filtración superficial.



El objetivo principal de estos filtros es evitar la emisión de negro de carbón a la atmósfera y separarlo de la corriente de gases.



Figura 8: Filtros Principales y mangas internas de los filtros Fuente: depurfiltech.es

4.3.2. Filtros de Proceso

Es un filtro tipo Pulse Jet, sirve para separar el negro de carbón del aire que lo transporta. Las entradas a este filtro provienen del filtro principal y del filtro de purga. Las partículas de negro de carbón quedan retenidas en la parte exterior de las bolsas dejando pasar el aire que las transportan. Estas bolsas se limpian de forma continua mediante un pulso de aire de alta presión consiguiendo que las partículas de negro de carbón se desprendan de las bolsas y caigan a la tolva del filtro para continuar con el proceso.

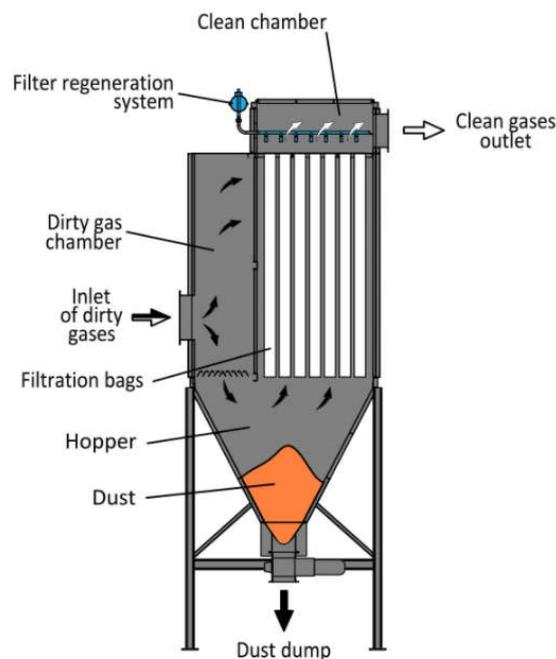


Figura 9: Filtros de Proceso Fuente: haitihealthalliance.org

4.3.3. Filtros de Purga

Es un filtro tipo Pulse Jet, sirve para separar pequeñas partículas de negro de carbón, pero en este caso mediante corrientes de vapor de agua que provienen del secador. Este tipo de filtros no cuentan con extractores, si no con el tiro forzado de la chimenea.

El objetivo principal de estos filtros es recuperar las partículas de negro de carbón que hayan podido salir del secador y mejorar la calidad de los pellets.



Figura 10: Filtros de Purga Fuente: andersonhb.com

4.3.4. Chimeneas

Las chimeneas o “flare stacks” se utilizan en la quema de los gases de cola que no se han aprovechado como fuente de energía en la planta, permiten la combustión de estos gases mediante el oxígeno del aire.

El objetivo principal de estas chimeneas es proteger los filtros MUF de sobrepresiones y evitar que los gases de cola lleguen a la atmosfera.



Figura 11: Chimeneas o “flare stacks” Fuente: fineartamerica.com

4.3.5. Reactor

Es el equipo destinado a la quema de negro de carbón, que cuenta con una geometría interna muy variable, donde se introducen las materias primas. En el reactor existen zonas donde se generan gases de combustión dentro de una cámara, posteriormente se inyecta el aceite, mezclándose con los gases de esta, este aceite se evapora, dando lugar a un proceso de pirolisis en la zona de reacción y a continuación, la mezcla se enfría a temperaturas inferiores a 800°C.

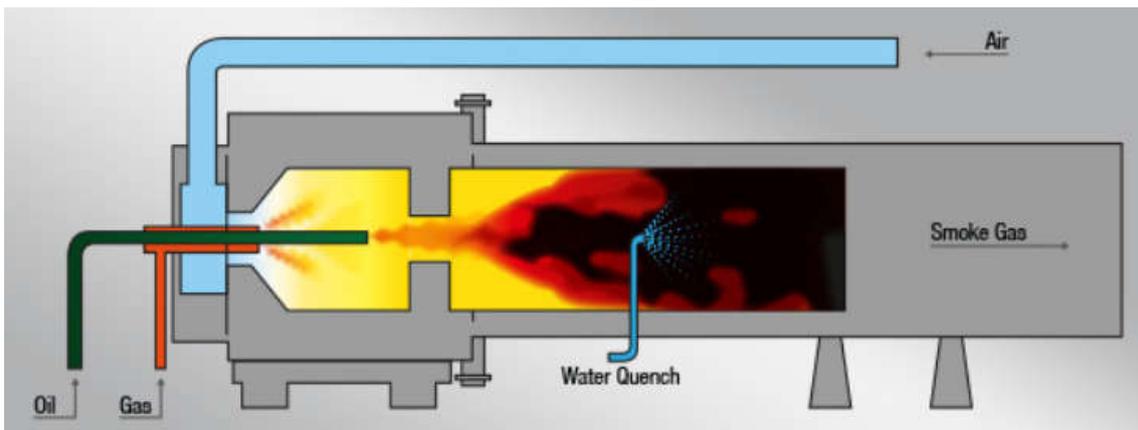


Figura 12: Reactor Fuente: pentacarbon.de

4.3.6. Intercambiador

El intercambiador es el equipo destinado a disminuir la temperatura del negro de carbón que llega del reactor, mediante el proceso de transferencia de calor. Este proceso se puede realizar de diferentes maneras, en este caso el método utilizado es por aire de alta presión.



Figura 13: Intercambiador de calor Fuente: directindustry.es

4.3.7. Venturi

Además del intercambiador, también se utiliza un venturi para enfriar el negro de carbón proveniente del reactor. Gracias al venturi aumenta la velocidad de la mezcla, facilitando su paso a la etapa de filtrado.

$$Q = V \times A$$

Q: Caudal del fluido

V: Velocidad del fluido

A: Área transversal de la tubería

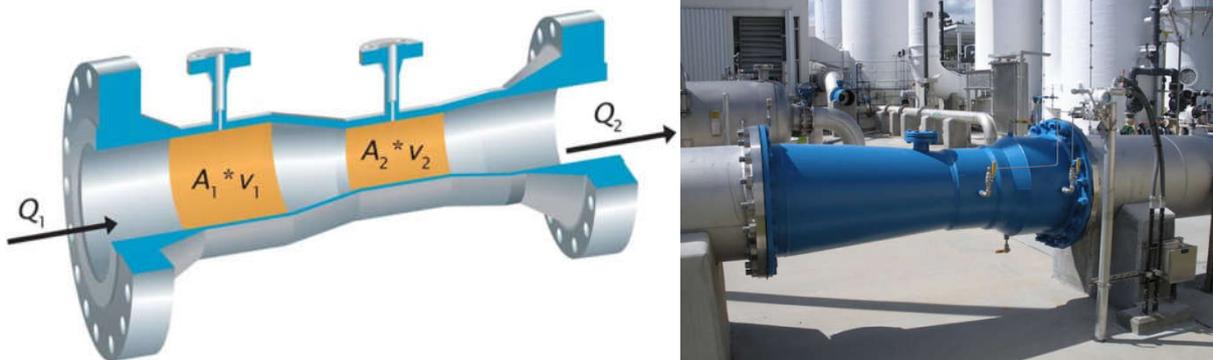


Figura 14: Efecto Venturi Fuente: ingenieriaquimicareviews.com

4.3.8. Molino

Este equipo permite disminuir el tamaño de las partículas de negro de carbón a través de un proceso de molienda. En la industria del negro de carbón se encuentran diferentes tipos de molinos: molinos de cono, de rodillos, de anillos de bolas y de martillos.



Figura 15: Molino de Rodillos Fuente: gebr-pfeiffer.com

4.3.9. Peletizador

Tras el proceso de molienda, el negro de carbón pasa al peletizador para adquirir mayor densidad a través de la mezcla de agua y aglutinantes. El peletizador cuenta con un árbol de pines que por rotación consigue que la mezcla sea más densa y se convierta en pellet, así mismo, posee unas boquillas para spray de agua que componen una mezcla más homogénea.



Figura 16: Peletizador Fuente: feelwarm.pt

4.3.10. Secador

Después del proceso de peletización, el negro de carbón pasa directamente al secador, se trata de un tambor rotativo que permite secar los pellets del material. Esto se consigue con quemadores que alcanzan temperaturas superiores a 500°C y así, el producto queda preparado para su transporte y almacenaje.



Figura 17: Secador de tambor rotatorio Fuente: rotarykilnfactory.com

5. METODOS DE ANÁLISIS

Los métodos de análisis seleccionados para este proyecto son: Diagrama de Pareto, Análisis de Criticidad y Análisis del Modo y Efecto de Fallos; esto se debe a que son las herramientas más eficientes para el tipo de planta que se trabaja, además permiten elaborar documentos que recopilen y clasifiquen mucha información acerca de los equipos, procesos y el sistema en general.

5.1. Diagrama de Pareto

El diagrama de Pareto es un gráfico donde la información de los datos que se analizan se representa mediante un diagrama de barras de forma descendente y en función de su prioridad. Es decir, permite conocer el orden de importancia de las variables que intervienen en un estudio.

Este tipo de diagrama, es una técnica para clasificar gráficamente la información de mayor a menor relevancia, con el fin de conocer los problemas más importantes y así poder solucionarlos.

El diagrama de Pareto consta de tres ejes:

1. Eje Y izquierdo: Corresponde a la frecuencia con la que ocurre un problema.
2. Eje Y derecho: Atañe al porcentaje según el número total de ocurrencias.
3. Eje X: En la parte inferior del diagrama se nombran los equipos que se están evaluando.

Esta técnica se basa en el principio de Pareto, donde el 80% de las consecuencias provienen del 20% de las causas.

La función principal del diagrama de Pareto es ayudar a identificar las necesidades más importantes a las que dirigir los esfuerzos para no malgastar recursos de forma innecesaria, de ahí la importancia de hacer siempre un análisis de datos. (8)

Al analizar la lista de fallos (figura 21) de la línea de producción de Cabot Colombiana S.A. desde abril de 2009 a abril de 2010, se obtiene la siguiente tabla de fallos por equipo.

EQUIPO	FALLOS	PARETO
MUF	21	30%
Fallo externo de energía	18	57%
Reactor	9	70%
Secador	3	74%
Peletizador	3	78%
KF-5	2	81%
Generador	2	84%
Compresor	2	87%
Tarjeta DCS	1	88%
Tanque agitador	1	90%
Subestación de gas natural	1	91%
Soplador	1	93%
Secador de aire de instrumentos	1	94%
Petroquímico	1	96%
Intercambiador	1	97%
Filtro de polvo	1	99%
Bombas de aceite	1	100%
TOTAL	69	

Tabla 1: Fallos por equipo Fuente: propia

Como se puede apreciar en la tabla anterior, el MUF (filtros principales de membrana de ultrafiltración), los fallos de energía y el reactor, son los equipos en los que se centran los fallos del periodo analizado, que corresponden al 70% del total de fallos. En el caso de los fallos de energía, estos corresponden principalmente a cortes imprevistos del suministro eléctrico por parte del proveedor.

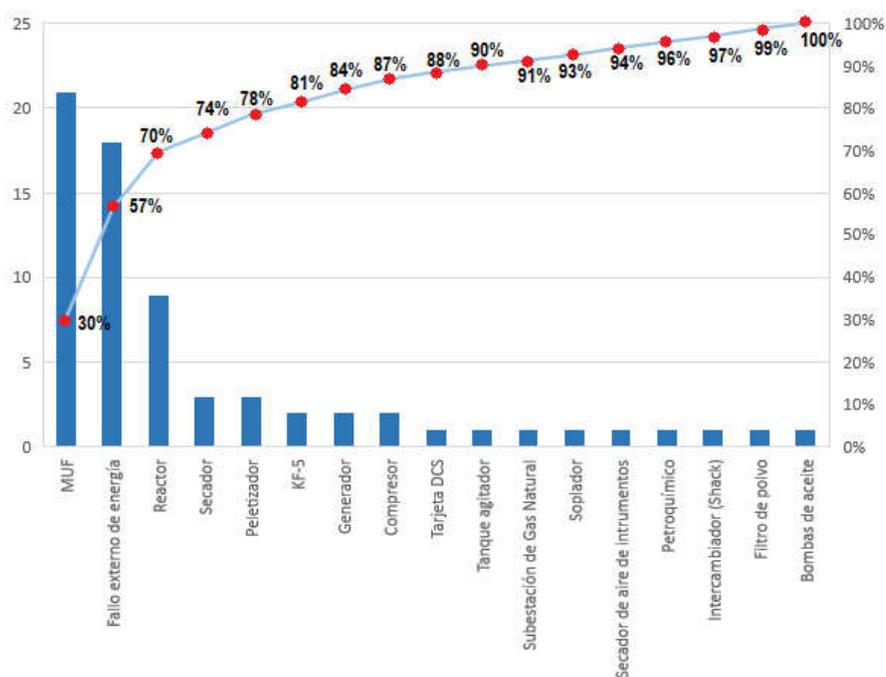


Figura 18: Diagrama de Pareto (fallos por equipo) Fuente: propia

Con el fin de llegar a una conclusión más real, sería adecuado analizar los equipos, no solo por la frecuencia de fallos, sino también por su duración. Tiene la misma importancia un equipo que presenta continuos fallos como uno que falla poco pero que cuando lo hace su reparación conlleva mucho tiempo.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se obtiene la siguiente tabla de horas perdidas por fallos en los equipos y su correspondiente diagrama de Pareto.

EQUIPO	TOTAL HORAS	PARETO
MUF	234.912	38%
Reactor	130.682	59%
Fallo externo de energía	103.163	75%
Peletizador	51.199	83%
Subestación de gas natural	35.283	89%
Secador	11.549	91%
Intercambiador	9.550	92%
Compresor	8.666	94%
KF-5	8.366	95%
Tanque agitador	7.533	96%
Bombas de aceite	6.550	97%
Generador	5.050	98%
Soplador	4.733	99%
Petroquímico	3.050	99%
Tarjeta DCS	2.350	100%
Filtro de Polvo	0.916	100%
Secador de aire de instrumentos	0.333	100%
TOTAL	623.884	

Tabla 2: Horas perdidas por equipo Fuente: propia

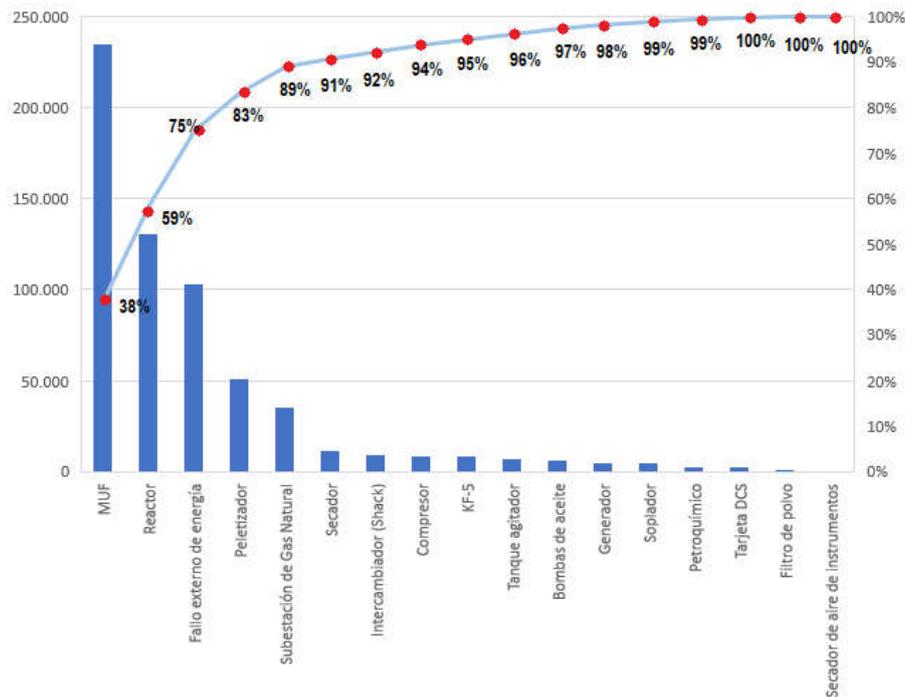


Figura 19: Diagrama de Pareto (horas perdidas por equipo) Fuente: propia

Comparando ambos diagramas de Pareto se llega a la conclusión de que el reactor y el MUF siguen siendo los equipos que más fallos presentan y que más horas perdidas provocan. Gracias a este método se han podido identificar estos dos equipos como los causantes principales de problemas en los que centrar los esfuerzos para poder mejorar la confiabilidad de la planta, aun así, es conveniente complementar estos resultados con un análisis de criticidad que permita detallar el diagnostico actual.

5.2. Análisis de criticidad

El análisis de criticidad es una metodología que permite clasificar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, cuya finalidad es facilitar la toma de decisiones.

Para llevar a cabo un buen análisis de criticidad se debe definir criterios de evaluación y seleccionar un método para dar prioridad a los sistemas que se analizan.

La criticidad de los equipos es directamente proporcional a la frecuencia de ocurrencia de un fallo por las consecuencias que puede ocasionar. (9)

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Severidad}$$

Como se ha mencionado anteriormente, el primer paso es definir los criterios de evaluación, a fin de obtener una calificación de frecuencia y severidad de los equipos más problemáticos de la instalación, que en este caso son: el MUF (filtros principales de membrana de ultrafiltración) y el Reactor.

PUNTOS	PROBABILIDAD DE FALLO	DESCRIPCION	FRECUENCIA DE FALLO	MUF	REACTOR
1	Remota	No es razonable que este modo de fallo ocurra.	Fallos superiores a 3 años	Este tipo de equipos suelen causar continuos problemas si no se aplica un adecuado programa de mantenimiento debido a las altas temperaturas y presiones que se manejan en el proceso, así como por la propia naturaleza del negro de carbón.	
2	Baja	Basado en equipos similares con bajo índice de fallos.	1/10000		
3	Moderada	Basado en equipos similares con fallos esporádicos.	1/1000		
4	Alta	Basado en equipos similares que han causado problemas.	1/100		
5	Muy Alta	Hay certeza que los fallos se repetirán.	1/10		

Tabla 3: Criterios evaluación Frecuencia Fuente: Basterretxea (2019)

PUNTOS	PROBABILIDAD DE FALLO	DESCRIPCION	MUF	REACTOR
1	Menor	No hay consecuencias inmediatas.	Un fallo grave en el MUF, como puede ser, escape de negro de carbón a la atmosfera puede provocar serios problemas ambientales.	Un fallo en el reactor que genere perdida de producto o escape de gases, puede acarrear graves consecuencias debido a la altas temperaturas que se manejan en el mismo, o incluso provocar grandes incendios.
2	Baja	No hay degradación del sistema.		
3	Moderada	Alguna degradación del sistema.		
4	Critica	Perdida del funcionamiento del sistema.		
5	Catastrófica	Un fallo que puede ocasionar muertes o daños materiales muy graves.		

Tabla 4: Criterios evaluación Severidad Fuente: Basterretxea (2019)

F R E C U E N C I A	1					
	2					
	3					
	4					MUF Reactor
	5					
		1	2	3	4	5
SEVERIDAD						

Figura 20: Matriz Criticidad Fuente: propia

Aunque el MUF y el Reactor son evaluados como equipos críticos, debido a la severidad y frecuencia de sus fallos, se determina como equipo más crítico del sistema al MUF, por presentar mayor número de averías.

5.3. Análisis del Modo y Efecto de Fallos (AMEF)

El Análisis del Modo y Efecto de Fallos, conocido como AMEF o FMEA (Failure Mode Effect Analysis), se creó en Estados Unidos a finales de la década de los 40. Este método desarrollado por la NASA, tiene como objetivo evaluar la fiabilidad de los equipos y a su vez determinar los efectos que generan los fallos de los mismos.

A través de él, se pueden identificar fallos en productos, procesos y sistemas, además de evaluar y clasificar sus efectos, causas y elementos de identificación, en un mismo documento con el fin de evitar su ocurrencia.

Principales objetivos del AMEF

- Identificar los modos de fallo que tiene mayor posibilidad de pérdida de las funciones de un equipo.
- Identificar las causas de los fallos y el origen de las mismas.
- Garantiza no malgastar tiempo y esfuerzo buscando síntomas, en lugar de causas.

Tipos de AMEF

- **Productos:** El AMEF aplicado a un producto, sirve para detectar posibles fallos en el diseño, aumentando las probabilidades de anticiparse a los efectos que pueden llegar a tener en el proceso de producción.
- **Procesos:** El AMEF aplicado a los procesos, sirve para detectar posibles fallos en el proceso de producción, aumentando la probabilidad de anticiparse a los efectos que pueda tener en etapas posteriores de cada proceso.
- **Sistemas:** El AMEF aplicado en sistemas, sirve para detectar posibles fallos en el diseño del software, aumentando las probabilidades de anticiparse a los efectos que pueden tener en su funcionamiento.
- **Otros:** El AMEF puede aplicarse a cualquier proceso en general en el que se pretendan identificar, clasificar y prevenir fallos mediante el análisis de sus efectos, y cuyas causas sea necesario documentar. (10)

El paso inicial para el Análisis del Modo y Efecto de Fallos es la recopilación de datos; gracias a la documentación facilitada por Cabot Colombiana S.A, se considera relevante analizar la fiabilidad de la planta, en lo que a fallos de los equipos se refiere, en el plazo de tiempo entre abril de 2009 y abril de 2010.

En la figura 21 se observan los datos facilitados por la compañía, cuyos ítems se describen a continuación.

1. **Estado del equipo:** Señala el equipo en funcionamiento o parado.
2. **Inicia:** Fecha y hora exacta en que se da el fallo.
3. **Finaliza:** Fecha y hora exacta en que finaliza el fallo, entendiéndose esta como el momento en que el equipo entra nuevamente en funcionamiento.
4. **TNO:** Tiempo de no operación. Corresponde al tiempo de duración del fallo, en el que el equipo no está disponible.
5. **TO:** Tiempo de operación del equipo. Corresponde a la diferencia entre la fecha donde finalizó el fallo x y la fecha de suceso del fallo x+1. También, se puede entender como el tiempo comprendido entre dos fallos.

6. **TBF:** Tiempo entre fallos. Corresponde a la diferencia entre la fecha donde se presentó el fallo x y la fecha de suceso del fallo x-1.

7. **Razón:** Causa general del fallo.

Nº	ESTADO DEL EQUIPO	INICIA	FINALIZA	TNO	TO	TBF	RAZÓN (CAUSA) DE LA FALLA	EQUIPO
1	Fuera de Ser. Operando	4/3/2009 12:49 4/3/2009 17:13	4/3/2009 17:13 4/6/2009 8:21	4.42	63.1		Sale reactor por alta OAC debido a alto contenido de sedimentos en aceite	Reactor
2	Fuera de Ser. Operando	4/6/2009 8:21 4/6/2009 9:51	4/6/2009 9:51 4/9/2009 6:15	1.52	68.3	67.53	Alta presión estática en MUF	MUF
3	Fuera de Ser. Operando	4/9/2009 6:15 4/9/2009 9:49	4/9/2009 9:49 4/11/2009 9:30	3.58	47.6	69.90	Se para la KF por problemas en el motor.	KF-5
4	Fuera de Ser. Operando	4/11/2009 9:30 4/11/2009 11:42	4/11/2009 11:42 4/23/2009 3:11	2.22	279.4	51.25	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
5	Fuera de Ser. Operando	4/23/2009 3:11 4/23/2009 7:12	4/23/2009 7:12 4/23/2009 10:44	4.03	3.52	281.6	FGM Exclusion (DISPARO COMPRESOR ZR-200 POR ALTA *T ACEITE).	Compresor
6	Fuera de Ser. Operando	4/23/2009 10:44 4/23/2009 12:44	4/23/2009 12:44 4/23/2009 13:13	2.02	0.47	7.55	Alta presión estática en MUF	MUF
7	Fuera de Ser. Operando	4/23/2009 13:13 4/23/2009 14:54	4/23/2009 14:54 4/24/2009 3:48	1.70	12.88	2.48	Alta presión estática en MUF	MUF
8	Fuera de Ser. Operando	4/24/2009 3:48 4/24/2009 6:38	4/24/2009 6:38 4/25/2009 10:27	2.85	27.80	14.58	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
9	Fuera de Ser. Operando	4/25/2009 10:27 4/25/2009 12:28	4/25/2009 12:28 4/27/2009 21:45	2.03	57.27	30.65	Alta presión estática en MUF	MUF
10	Fuera de Ser. Operando	4/27/2009 21:45 4/27/2009 22:37	4/27/2009 22:37 4/30/2009 23:27	0.88	72.82	59.30	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
11	Fuera de Ser. Operando	4/30/2009 23:27 5/1/2009 0:52	5/1/2009 0:52 5/2/2009 10:52	1.42	34.00	73.70	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
12	Fuera de Ser. Operando	5/2/2009 10:52 5/2/2009 12:15	5/2/2009 12:15 5/4/2009 23:18	1.40	59.03	35.42	AJUSTE DE RODAMIENTOS RODILLO NOR-ESTE DE SECADOR.	Secador
13	Fuera de Ser. Operando	5/4/2009 23:18 5/5/2009 0:22	5/5/2009 0:22 5/6/2009 17:34	1.08	41.18	60.43	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
14	Fuera de Ser. Operando	5/6/2009 17:34 5/6/2009 22:20	5/6/2009 22:20 5/7/2009 10:57	4.78	12.60	42.27	KF-5 FRENADA. (LOBULOS ROSANDO CONTRA CUERPO KF.)	KF-5
15	Fuera de Ser. Operando	5/7/2009 10:57 5/7/2009 17:17	5/7/2009 17:17 5/10/2009 14:03	6.35	68.75	17.38	Fuga de NH en filtro	MUF
16	Fuera de Ser. Operando	5/10/2009 14:03 5/10/2009 20:34	5/10/2009 20:34 5/14/2009 20:34	6.53	95.98	75.10	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
17	Fuera de Ser. Operando	5/14/2009 20:34 5/14/2009 21:28	5/14/2009 21:28 6/4/2009 6:08	0.92	488.6	102.5	FGM exclusion (cortocircuito acometida motor colector de polvo CT-1)	Filtro de polvo
18	Fuera de Ser. Operando	6/4/2009 6:08 6/4/2009 12:40	6/4/2009 12:40 6/10/2009 13:06	6.55	144.4	489.5	Parada para reparar problema en bomba de aceite por baja presión y flujo	Bombas de Aceite
19	Fuera de Ser. Operando	6/10/2009 13:06 6/10/2009 13:58	6/10/2009 13:58 6/18/2009 15:08	0.88	193.1	150.9	Salida de tablero de 4,160 Vol. Saca ambas unidades	Generador
20	Fuera de Ser. Operando	6/18/2009 15:08 6/18/2009 17:28	6/18/2009 17:28 6/20/2009 12:06	2.35	42.62	194.0	Fusible Quemado de Modulo 17 de Reactor	Tarjeta DCS
21	Fuera de Ser. Operando	6/20/2009 12:06 6/23/2009 11:50	6/23/2009 11:50 7/2/2009 22:51	71.7	227.0	44.97	FGM Exclusion (Cambio de garganta y habilitar quench 5 ft por TRIS V7H)	Reactor
22	Fuera de Ser. Operando	7/2/2009 22:51 7/3/2009 0:00	7/3/2009 0:00 7/3/2009 0:00	1.15	0.00	298.7	Daño en piston de represión	MUF
23	Fuera de Ser. Operando	7/3/2009 0:00 7/3/2009 0:30	7/3/2009 0:30 7/16/2009 16:56	0.52	328.4	1.15	Daño en piston de represión	MUF
24	Fuera de Ser. Operando	7/16/2009 16:56 7/16/2009 21:33	7/16/2009 21:33 8/3/2009 3:11	4.63	413.6	328.9	Falla en el compresor	Compresor
25	Fuera de Ser. Operando	8/3/2009 3:11 8/4/2009 15:30	8/4/2009 15:30 8/4/2009 15:53	36.3	0.37	418.2	Parada programada para cambio de árbol PRD y bolsas FG Purga	Peletizador
26	Fuera de Ser. Operando	8/4/2009 15:53 8/4/2009 23:42	8/4/2009 23:42 8/7/2009 15:12	7.83	63.48	36.70	FALLA DE ENERGIA POR DAÑO FUSIBLES LINEA DE ALTA TENSION.	Fallo externo de energía
27	Fuera de Ser. Operando	8/7/2009 15:12 8/9/2009 0:40	8/9/2009 0:40 8/11/2009 6:04	33.4	53.38	71.32	Fuga de agua por la pieza de transición, ocasiona inestabilidad en la calidad.	Reactor
28	Fuera de Ser. Operando	8/11/2009 6:04 8/11/2009 13:35	8/11/2009 13:35 8/22/2009 2:06	7.53	252.5	86.87	Se atasca la KF por lámina caída del TK agitador	Tanque agitador
29	Fuera de Ser. Operando	8/22/2009 2:06 8/22/2009 19:30	8/22/2009 19:30 8/29/2009 13:51	17.4	162.3	260.0	REPARACION AGITADOR DEL TANQUE Y REVISION LINER QUEMADOR REACTOR.	Reactor
30	Fuera de Ser. Operando	8/29/2009 13:51 8/29/2009 17:54	8/29/2009 17:54 9/9/2009 9:26	4.07	255.5	179.7	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
31	Fuera de Ser. Operando	9/9/2009 9:26 9/9/2009 19:56	9/9/2009 19:56 9/13/2009 4:23	10.5	80.45	259.5	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
32	Fuera de Ser. Operando	9/13/2009 4:23 9/13/2009 9:41	9/13/2009 9:41 9/13/2009 23:19	5.32	13.62	90.95	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
33	Fuera de Ser. Operando	9/13/2009 23:19 9/13/2009 23:28	9/13/2009 23:28 9/14/2009 14:25	0.15	14.95	18.93	Válvula masonellan	Reactor
34	Fuera de Ser. Operando	9/14/2009 14:25 9/14/2009 15:44	9/14/2009 15:44 9/17/2009 19:29	1.32	75.75	15.10	Válvula masonellan	Reactor
35	Fuera de Ser. Operando	9/17/2009 19:29 9/18/2009 0:12	9/18/2009 0:12 9/24/2009 23:07	4.73	166.9	77.07	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía

36	Fuera de Ser. Operando	9/24/2009 23:07 9/26/2009 10:05	9/26/2009 10:05 9/28/2009 21:18	34.9 59.22	171.6	Revisión de tolvas MUF	MUF
37	Fuera de Ser. Operando	9/28/2009 21:18 9/30/2009 2:57	9/30/2009 2:57 9/30/2009 11:17	29.6 8.32	94.18	Revisión de tolvas MUF	MUF
38	Fuera de Ser. Operando	9/30/2009 11:17 9/30/2009 11:24	9/30/2009 11:24 10/3/2009 9:21	0.12 69.95	37.98	Actualización formula de PC del XB-1000.	Reactor
39	Fuera de Ser. Operando	10/3/2009 9:21 10/4/2009 23:45	10/4/2009 23:45 10/6/2009 11:21	38.4 35.58	70.07	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
40	Fuera de Ser. Operando	10/6/2009 11:21 10/6/2009 14:42	10/6/2009 14:42 10/7/2009 11:19	3.37 20.60	74.00	Alta presión estática en MUF	MUF
41	Fuera de Ser. Operando	10/7/2009 11:19 10/7/2009 11:32	10/7/2009 11:32 10/7/2009 20:11	0.23 8.63	23.97	Alta presión estática en MUF	MUF
42	Fuera de Ser. Operando	10/7/2009 20:11 10/7/2009 23:13	10/7/2009 23:13 10/8/2009 19:28	3.05 20.23	8.87	Daño en la comunicación de las válvulas de bloque de GN del petroquímico	Petroquímico
43	Fuera de Ser. Operando	10/8/2009 19:28 10/9/2009 2:11	10/9/2009 2:11 10/9/2009 16:24	6.73 14.20	23.28	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
44	Fuera de Ser. Operando	10/9/2009 16:24 10/9/2009 17:10	10/9/2009 17:10 10/9/2009 22:33	0.78 5.37	20.93	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
45	Fuera de Ser. Operando	10/9/2009 22:33 10/10/2009 3:16	10/10/2009 3:16 10/14/2009 9:38	4.73 102.3	6.15	Se dispara soplador GB-21 por alta temperatura y apaga el Reactor	Soplador
46	Fuera de Ser. Operando	10/14/2009 9:38 10/14/2009 13:48	10/14/2009 13:48 10/21/2009 22:10	4.17 176.3	107.0	Falla la transferencia eléctrica de la planta.	Generador
47	Fuera de Ser. Operando	10/21/2009 22:10 10/23/2009 5:56	10/23/2009 5:56 10/24/2009 14:17	31.7 32.33	180.5	Revisión de tolvas MUF	MUF
48	Fuera de Ser. Operando	10/24/2009 14:17 10/24/2009 14:44	10/24/2009 14:44 11/9/2009 22:06	0.47 391.3	64.12	Apagada del reactor por alta presión estática debido a los problemas en la valvu	MUF
49	Fuera de Ser. Operando	11/9/2009 22:06 11/11/2009 2:15	11/11/2009 2:15 12/26/2009 10:49	28.1 1088	391.8	Revisión de tolvas y cambio de bolsas con fuga	MUF
50	Fuera de Ser. Operando	12/26/2009 10:49 12/26/2009 11:16	12/26/2009 11:16 1/11/2010 21:56	0.47 394.6	1116	Alta presión estática en MUF	MUF
51	Fuera de Ser. Operando	1/11/2010 21:56 1/13/2010 3:48	1/13/2010 3:48 1/15/2010 11:59	29.8 56.17	395.1	Fuga de NH en filtro	MUF
52	Fuera de Ser. Operando	1/15/2010 11:59 1/15/2010 14:52	1/15/2010 14:52 1/16/2010 9:55	2.88 19.05	86.05	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
53	Fuera de Ser. Operando	1/16/2010 9:55 1/16/2010 12:53	1/16/2010 12:53 1/17/2010 4:50	2.98 15.93	21.93	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
54	Fuera de Ser. Operando	1/17/2010 4:50 1/17/2010 5:10	1/17/2010 5:10 2/2/2010 22:15	0.35 401.0	18.92	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
55	Fuera de Ser. Operando	2/2/2010 22:15 2/3/2010 1:49	2/3/2010 1:49 2/3/2010 11:00	3.58 9.17	401.4	Fallo externo de energía	Fallo externo de energía
56	Fuera de Ser. Operando	2/3/2010 11:00 2/3/2010 12:28	2/3/2010 12:28 2/6/2010 13:58	1.47 73.50	12.75	Alta presión estática en MUF	MUF
57	Fuera de Ser. Operando	2/6/2010 13:58 2/6/2010 14:17	2/6/2010 14:17 2/9/2010 0:04	0.33 57.77	74.97	Condensado en el aire de la fotocelda, sistema de secado de aire con problemas.	Secador de aire de instrumentos
58	Fuera de Ser. Operando	2/9/2010 0:04 2/10/2010 11:20	2/10/2010 11:20 2/10/2010 12:50	35.2 1.48	58.10	Instalación de la nueva estación de gas natural	Subestación de Gas Natural
59	Fuera de Ser. Operando	2/10/2010 12:50 2/10/2010 22:22	2/10/2010 22:22 2/12/2010 6:57	9.55 32.57	36.77	Incendio del material aislante en parte reparada del Shack.	Intercambiador (Shack)
60	Fuera de Ser. Operando	2/12/2010 6:57 2/12/2010 8:52	2/12/2010 8:52 2/13/2010 13:54	1.92 29.03	42.12	DAÑO EN EL FUSIBLE DE PARA DE EMERGENCIA DEL REACTOIR	Reactor
61	Fuera de Ser. Operando	2/13/2010 13:54 2/13/2010 20:08	2/13/2010 20:08 2/22/2010 16:29	6.25 212.3	30.95	LA LLANTA NORTE QUEDO SIN CUÑAS EN LA PARTE NORTE.	Secador
62	Fuera de Ser. Operando	2/22/2010 16:29 2/22/2010 23:20	2/22/2010 23:20 2/23/2010 22:07	6.87 22.77	218.5	DAÑO EN EL MOTOR DEL PRD.	Peletizador
63	Fuera de Ser. Operando	2/23/2010 22:07 2/25/2010 0:41	2/25/2010 0:41 3/12/2010 9:18	26.5 368.6	29.63	Revisión de tolvas MUF	MUF
64	Fuera de Ser. Operando	3/12/2010 9:18 3/12/2010 9:34	3/12/2010 9:34 3/14/2010 17:54	0.28 56.32	395.1	Alta presión estática en MUF	MUF
65	Fuera de Ser. Operando	3/14/2010 17:54 3/14/2010 19:18	3/14/2010 19:18 3/28/2010 23:16	1.42 339.9	56.60	Alta presión estática en MUF	MUF
66	Fuera de Ser. Operando	3/28/2010 23:16 3/29/2010 7:16	3/29/2010 7:16 3/29/2010 9:16	8.00 2.00	341.3	Falla en el variador de velocidad del peletizador	Peletizador
67	Fuera de Ser. Operando	3/29/2010 9:16 3/29/2010 13:09	3/29/2010 13:09 4/6/2010 22:05	3.90 200.9	10.00	Fallo rodillo suroeste secador.	Secador
68	Fuera de Ser. Operando	4/6/2010 22:05 4/8/2010 4:58	4/8/2010 4:58 4/8/2010 5:01	30.9 0.03	204.8	Parada programada para revisión de tolvas por fumadera	MUF
69	Fuera de Ser.	4/8/2010 5:01	4/8/2010 5:08	0.12	30.93	Alta OAC por taponamiento de Boquillas.	Reactor

Figura 21: Línea de producción de negro de carbón abril 2009 – abril 2010 Fuente: Cabot Colombiana S.A.

A continuación, se describen los ítems de la tabla del método de Análisis del Modo y Efecto de Fallos (AMEF).

1. **Planta:** Nombre de la planta.
2. **Grupo de Máquinas:** Reactor, Filtrado, Pelletizado, Secado, Almacenamiento, etc.
3. **Área:** Es el nombre de un equipo específico en alguno de los Grupos de Máquinas.
4. **Nº Unidad/Equipo:** Nombre de la unidad de producción, ej. Unidad 1.
5. **Descripción:** Descripción específica de la pieza del equipo analizado.
6. **Función:** Describe cual es la función de la pieza del equipo bajo análisis.
7. **Nº Modelo:** Número de modelo del fabricante.
8. **Tipo:** Referencia tipo del fabricante.
9. **Características del fallo:** Ver lista de causas típicas de fallo, (tabla 5).
10. **Modo de fallo:** Como se ha dado la rotura del ítem.
11. **Efecto del fallo:** Efecto de la rotura del ítem.
12. **Causa del fallo:** Causa de la rotura del ítem.
13. **Característica del deterioro:** Característica típica del deterioro.
14. **Aviso del fallo:** Señales que indican que el fallo es inminente.
15. **MTBF años:** Tiempo medio entre fallos.
16. **Tipo O o E:** "O" Fallo Oculto (se aprecia únicamente cuando se necesita usar el equipo), "E" Fallo Evidente (se aprecia tanto con el equipo en funcionamiento como parado).
17. **Ocu rtg:** Puntuaje Ocurrencia, ver tabla criterios de valoración de ocurrencia, (tabla 6).
18. **Sev rtg:** Puntuaje Severidad, ver tabla criterios de valoración de severidad, (tabla 7).
19. **RPN (O*S):** Risk Priority Number, Ocurrencia x Severidad.
20. **Tipo de Mantenimiento:** Ver lista de tipos de mantenimiento, (página 15).
21. **Tareas de Mantenimiento:** Descripción de las tareas de mantenimiento a realizar en el ítem.

CAUSAS TÍPICAS DE FALLO	
1	Sobrecarga
2	Desgaste
3	Erosión
4	Corrosión
5	Fouling
6	Contaminación
7	Fatiga
8	Falta de lubricación
9	Exceso de lubricación
10	Sobre temperatura
11	Demasiado frío
12	Demasiado caliente
13	Congelado
14	Mala operación
15	Montaje incorrecto
16	Varios

Tabla 5: Causas típicas de fallo Fuente: propia

CLASE	OCURRENCIA	FALLOS	PUNTOS
MUY ALTA	El fallo es casi inevitable.	1 en 2h.	10
		1 en 3h.	9
ALTA	El proceso no está en control estadístico o similares.	1 en 8h.	8
		1 en 20h.	7
MODERADA	El proceso está en control estadístico, pero con fallos aislados. Los procesos previos tienen fallos.	1 en 80h.	6
		1 en 400h.	5
		1 en 2000h.	4
BAJA	El proceso está en control estadístico.	1 en 15000h.	3
MUY BAJA	El proceso está en control estadístico. Solo fallos aislados asociados con procesos casi idénticos.	1 en 150 000h.	2
REMOTA	El fallo es improbable. No se conocen fallos asociados con procesos casi idénticos.	1 en 1.5m h.	1

Tabla 6: Criterios valoración Ocurrencia Fuente: Basterretxea (2019)

CLASE	SEVERIDAD	PUNTOS
EXTREMA	Puede dañar la maquina o al operador. Peligro sin advertencia.	10
	Puede dañar la máquina o al operador. Peligro con advertencia.	9
ALTA	Interrupción en la línea de producción. Perdida de la función primaria. 100% de desperdicio.	8
	Reducción de la función primaria. El producto requiere clasificación. Algo de desperdicio.	7
MODERADA	Interrupción menor de la producción. Algo de desperdicio. Perdida de desempeño de la función secundaria.	6
	Interrupción menor de la producción. 100% de reproceso. Desempeño reducido de la función secundaria.	5
	Defecto menor identificado por casi todos los clientes/operarios. El producto requiere clasificación y algo de trabajo extra.	4
BAJA	Defecto menor identificado por algunos clientes/operarios.	3
	Defecto menor identificado por un cliente/operario observador. Los defectos pueden ser trabajados en el lugar.	2
NULA	No hay efecto.	1

Tabla 7: Criterios valoración Severidad Fuente: Basterretxea (2019)

AMEF														
Planta: Cabot Colombiana S.A.			Grupo de Maquinas: Filtros Principales MUF				Área: Filtrado			N° Unidad / Equipo : 1				
Descripción: equipo formado por numerosas mangas que actúan como filtros.			Función: se utilizan para separar en un proceso de producción ininterrumpido, el negro de carbón de los gases que le acompañan.										N° Modelo : Confidencial	
													Tipo: Confidencial	
Grupo Comp.	Componente	Modo de Fallo	Efecto del Fallo	Causa del Fallo	Característica del deterioro	Aviso del Fallo?	MTBF días	Tipo O ó E	Ocu rtg	Sev rtg	RPN O*S	Tipo Mant.	Plan de acción	
													Tareas de Mantenimiento	
Sistema de filtrado	Valvula sobrepresión	Fallo en la apertura de la válvula	Sobrepresión en el sistema de filtrado	Deterioro de la válvula	Erosión/ Corrosión	Si	30	O	4	9	36	Correctivo Preventivo	Realizar mediciones con ultra sonidos más frecuentes para comprobar el estado de la válvula y su correcto funcionamiento	
	Mangas de fibra de vidrio	Deterioro de las mangas	Los filtros de mangas se van secando con el tiempo produciéndose pequeñas roturas en los mismos.	Uso prolongado/ excesivo de las mangas	Desgaste/ Sobretemperatura	No	35	E	4	10	40	Correctivo Preventivo	Cambiar las mangas con anterioridad, sin exceder su vida útil	
	Mangas revestidas con membranas	Obstrucción de las mangas	Los filtros de mangas se saturan por completo a medida que la cantidad de negro de carbón filtrado aumenta	Limpieza deficiente de las mangas	Desgaste/Varios	No	35	E	4	10	40	Correctivo Preventivo	Limpiar las mangas cada menos tiempo o con mayor eficiencia	
	Tuberías de aire a presión	Obstrucción tuberías soplado mangas	La línea de aire de soplado de los filtros se contamina con partículas que tapan las salidas de aire	Contaminación de la línea de aire de soplado de los filtros de mangas	Contaminación	No	?	O	2	3	5	Correctivo Preventivo	Antes de usar el equipo, comprobar mediante una purga en la línea la calidad del aire	

Tabla 8: AMEF Filtros Principales MUF Fuente: propia

AMEF														
Planta: Cabot Colombiana S.A.			Grupo de Maquinas: Reactor				Área: Generación			N° Unidad / Equipo : 1				
Descripción: equipo de geometría interna variable, formada por gran cantidad de ladrillos refractarios.			Función: equipo destinado a la quema de negro de carbón, donde se da la reacción.											N° Modelo : Confidencial
														Tipo: Confidencial
Grupo Comp.	Componente	Modo de Fallo	Efecto del Fallo	Causa del Fallo	Característica del deterioro	Aviso del Fallo?	MTBF días	Tipo O ó E	Ocu rtg	Sev rtg	RPN O*S	Tipo Mant.	Plan de acción	
													Tareas de Mantenimiento	
Generación de negro de carbón	Pared ladrillos refractario	Fisura en la pared de refractario	Rotura de la pared de refractario del interior del reactor	Temperatura de la cámara superior a la recomendada por el fabricante del refractario	Sobretemperatura	No	180	E	3	4	12	Correctivo Preventivo	Inspeccionar periódicamente el estado del refractario	
	Boquillas quemador	Taponamiento boquillas combustible quemador	Interrupción en la generación de negro de carbón/parada reactor	Exceso de sedimentos en el combustible	Varios	Si	360	O	3	5	15	Correctivo Preventivo	Inspeccionar periódicamente el circuito de combustible	

Tabla 9: AMEF Reactor Fuente: propia

El método AMEF permite identificar oportunidades de mejora, con el fin de aumentar la confiabilidad de los equipos y estos a su vez, por ser críticos, a mejorar la fiabilidad de la planta.

Con el fin de evitar la ocurrencia de los posibles fallos mencionados a la hora de realizar el AMEF de ambos equipos, se proponen una serie de actividades preventivas, teniendo en cuenta las consecuencias que estas pueden acarrear. Por ello, se recomienda implementar estas medidas tanto en el área de mantenimiento como en el de operaciones, puesto que son las áreas con mayor implicación en el proceso. Además, sería recomendable establecer un orden de prioridades para su implementación.

La característica de deterioro más común entre los fallos sugeridos es el desgaste. Esto se debe a las características del negro de carbón y las condiciones del proceso, evidenciando que la causa principal de la mayoría de los fallos es la corrosión.

Además, con las inspecciones periódicas se observa una oportunidad de mejora importante, ya que un gran número de los fallos que se pueden dar son visuales, lo que dificulta poderlos detectar con anterioridad, siendo necesario observar medidores de temperatura, presión, etc o la toma de mediciones, circunstancia un tanto complicada debido al gran tamaño de la planta. Por todo ello, se propone mejorar la instrumentación del filtro principal de mangas MUF y del reactor con el fin de poder detectar con anterioridad alteraciones en el funcionamiento normal de los mismos.

En algunas de las circunstancias analizadas, los fallos se deben a errores humanos al realizar su cometido, bien por inexperiencia o falta de entrenamiento e incluso por falta de supervisión, lo que también constituye una gran oportunidad de mejora respecto a la planta.

6. PROPUESTA DE MEJORAS

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante los distintos métodos de análisis; Diagrama de Pareto, Análisis de Criticidad y Análisis del Modo y Efecto de Fallos (AMEF), utilizados para el estudio de la fiabilidad de la planta de negro de carbón Cabot Colombiana S.A. se proponen las siguientes mejoras.

1. Como se ha mencionado anteriormente una de las características de deterioro más comunes entre los fallos propuestos en el método AMEF, es el desgaste, debido a las particularidades del negro de carbón y de su proceso de producción, concluyendo que la causa principal de gran parte de los fallos es la corrosión. Por ello se propone realizar mediciones periódicas con ultrasonidos, con el fin de detectar deterioros en los materiales de los equipos y así evitar fallos como roturas, grietas, etc.
2. Como un gran número de los fallos que se pueden dar tanto en el filtro principal de mangas MUF como en el reactor, son visuales, con el fin de poder detectar con anterioridad alteraciones en el funcionamiento normal de los mismos, se propone mejorar la instrumentación de ambos, mediante nuevos indicadores de temperatura, presión diferencial, etc.
3. Dado que algunos de los fallos de la planta se deben a errores humanos cometidos al realizar tareas de mantenimiento o de inspección, se propone reforzar la formación y supervisión del personal de la compañía, especialmente de los encargados del área de mantenimiento y de producción.
4. Con el fin de evitar fallos ocasionados por antigüedad de los equipos que pueden afectar tanto a la confiabilidad de la planta como a su productividad, se propone realizar un plan de renovación progresiva de equipos obsoletos.

5. Con el objetivo de evitar fallos externos de energía, que como se analizó previamente mediante un diagrama de Pareto constituyen un total de 18 paradas anuales de la planta, se propone elaborar un proyecto de subestación eléctrica, que pueda garantizar la continuidad de la producción en situaciones como la mencionada o que sirva de stand by en caso de fallos eléctricos inesperados por parte de la compañía suministradora.

La necesidad de llevar a cabo todas estas medidas es respaldada por el dinero perdido durante el tiempo que la planta esta parada como consecuencia de los fallos de los equipos mencionados anteriormente, más aún teniendo en cuenta que la inversión a realizar en mantenimiento preventivo y predictivo y en la planta en general no superaría la cuantía perdida por las paradas de la misma.

7. CONCLUSIONES

- Realizar mediciones periódicas con ultrasonidos por ejemplo mensualmente, con el fin de detectar deterioros en los materiales de los equipos y así evitar fallos en los mismos.
- Mejorar la instrumentación por medio de medidores de presión diferencial, tanto en el filtro principal de mangas MUF como en el reactor, mediante nuevos indicadores, con el fin de anticiparse a los fallos.
- Reforzar la formación y supervisión del personal a través de cursos de formación, especialmente de los encargados del área de mantenimiento y de producción con el objetivo de minimizar errores humanos.
- Realizar un plan de renovación progresiva de equipos obsoletos.
- Elaborar un proyecto de subestación eléctrica, que pueda garantizar la continuidad de la producción de la planta, pudiendo trabajar en isla en caso de necesidad.
- Implementar un mantenimiento basado en RCM que confiera mayor fiabilidad a la planta.
- Este trabajo fin de master pueda servir de base para futuros proyectos en los que implementar otro tipo de mantenimiento como puede ser el TPM y posteriormente poder comparar los resultados llegando a la conclusión de cuál podría ser el tipo de mantenimiento más adecuado para esta misma planta.

BIBLIOGRAFÍA

- (1): Profesor A. Basterretxea Bitorika. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao UPV/EHU, “Gestión Energética”, p. 2-5
- (2): SOLE INGENIERÍA & MANTENIMIENTO (2018). Historia y evolución del mantenimiento. <https://www.solesoluciones.com/historia-del-mantenimiento/>
- (3): RENOVE TECNOLOGÍA, S.L (2009-2018). Tipos de Mantenimiento. Recuperado de <http://www.renovetec.com/590-mantenimiento-industrial/110-mantenimiento-industrial/305-tipos-de-mantenimiento>
- (4): Profesor A. Basterretxea Bitorika. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao UPV/EHU, “Gestión Energética”, p. 14-15
- (5): Profesor A. Basterretxea Bitorika. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao UPV/EHU, “Gestión Energética”, p. 15-16
- (6): Basterretxea Bitorika, Aingeru., Pellón González, Inés., y García Castresana, Luis Angel. (2004). De la tinta china al tóner. Evolución de una técnica ancestral: la fabricación del “negro de humo”. Anales de la Real Sociedad Española de Química, volumen (4), p. 50-51.
- (7): Asociación Internacional de Negro de Carbón. (2016). Guía del usuario de Negro de Carbón. Información de Seguridad, Salud y Medioambiental. Recuperado de <http://www.carbon-black.org/>
- (8): ¿Qué es el diagrama de Pareto?. (4 de enero de 2022). *QuestionPro*. <https://www.questionpro.com/blog/es/diagrama-de-pareto/>
- (9): Torcasio, Aurelia., Wong, Carolina., y Ortiz, Mercedes. (2014). Reducción de Fallas en un Servicio de Correo Electrónico mediante la Aplicación de Metodologías de Confiabilidad. Espacios, volumen 35 (5), p.21. Recuperado de <https://www.revistaespacios.com/a14v35n05/14350421.html>

(10): Salazar, López. Bryan. (2019). Análisis del Modo y Efecto de Fallas (AMEF). Ingeniería Industrial online.com. Recuperado de <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/lean-manufacturing/analisis-del-modo-y-efecto-de-fallas-amef/>