



EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS GENERADOS POR MANTENIMIENTO Y SU
OPTIMIZACIÓN A PARTIR DEL MODELO DE ECONOMÍA CIRCULAR,
ENFOCADO EN PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE BEBIDAS UHT (ULTRA HIGH
TEMPERATURE)

ING. YEISON BENITEZ ROA

UNIVERSIDAD ECCI

DIRECCIÓN DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN MECÁNICA

BOGOTÁ D.C. – COLOMBIA

Evaluación de los impactos generados por mantenimiento y su optimización a partir
del modelo de economía circular, enfocado en plantas de producción de bebidas
UHT (ULTRA HIGH TEMPERATURE)

Ing. Yeison Benítez Roa, Esp.

Tesis presentada como requisito para optar al título de: Magister en Ingeniería con
énfasis en Mecánica

Director:

MSc. Fred Geovanny Murillo Rondón

Asesor Metodológico:

MSc. Jairo Yamith Palacios

Línea de Investigación:

Procesos Industriales

Grupo de Investigación TEIN-ECCI

Universidad ECCI

Dirección de Posgrados. Maestría en Ingeniería con énfasis en Mecánica

Bogotá D.C. – Colombia

2020

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a las todas aquellas personas que me apoyaron de una u otra manera para poder desarrollar y culminar este trabajo, también reitero mis agradecimientos a Tommy Benítez.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, a mi familia, profesores y asesores por el apoyo y contribución al desarrollo de este trabajo.

INTRODUCCIÓN

El manejo adecuado de los residuos pertenecientes a labores de mantenimiento en las empresas de producción de bebidas UHT, se ha vuelto un tema de gran importancia ya que es una actividad que genera impacto ambiental y altos costos económicos para la operación debido a la ausencia de estrategias de reutilización. El desarrollo de este trabajo busca la inclusión del modelo de economía circular en el área de mantenimiento por medio del planteamiento de un sistema, con el fin de aprovechar de una manera adecuada los diferentes recursos que permitan alcanzar una producción sostenible, bien sea en la propia industria de bebidas o en otras industrias. Este sistema se basa en prolongar la vida útil de las partes de los equipos UHT y el manejo de residuos de mantenimiento, llevando indicadores de control.

La economía circular es una alternativa diferente al modelo económico actual (extraer - usar - disponer), sugiriendo hacer un mejor uso de los recursos, además de reincorporar valor a la cadena productiva, basada en principios como el diseño sin residuos, o reincorporación de los residuos a la cadena como recursos en el mismo sector productivo o de otros formando ciclos o sistemas en cascada.

RESUMEN

Durante el desarrollo de este trabajo de grado se evaluaron los impactos generados por las labores de mantenimiento y su optimización a partir del modelo de economía circular enfocado en plantas de producción de bebidas UHT.

Se realizó una recopilación y análisis de datos referentes al consumo de energía eléctrica, manejo de partes post mantenimiento, clasificación y disposición de residuos; de igual forma se evidencio la necesidad de desarrollar una metodología que incorpore la economía circular en el modelo de mantenimiento utilizado en este tipo de industria.

Esta metodología utiliza equipos IoT para la medición, almacenamiento y procesamiento de datos con respecto a vibraciones, energía eléctrica y termografía; mediante algoritmos de Machine Learning con el fin de obtener análisis predictivos de las máquinas y determinar el momento adecuado para hacer intervenciones por parte del área de mantenimiento.

Actualmente los modelos de mantenimiento en plantas de producción de bebidas UHT se basan en acciones preventivas, predictivas y correctivas. Mediante la aplicación de la metodología mantenimiento circular se logra reducir las acciones correctivas y el impacto ambiental por medio de ahorro en el consumo de energía eléctrica, prolongación de la vida útil de partes, aumento en la disponibilidad de equipos y reutilización de residuos en otras industrias.

Palabras Claves: Mantenimiento Predictivo, IoT, Machine Learning, Economía Circular, UHT.

ABSTRACT

During the development of this degree work, the impacts generated by maintenance tasks and their optimization were evaluated based on the circular economy model focused on UHT beverage production plants.

A compilation and analysis of data regarding the consumption of electrical energy, handling of post-maintenance parts, classification and disposal of waste was carried out; Similarly, the need to develop a methodology that incorporates the circular economy in the maintenance model used in this type of industry was evidenced.

This methodology uses IoT equipment for the measurement, storage and processing of data regarding vibrations, electrical energy and thermography; using Machine Learning algorithms in order to obtain predictive analysis of the machines and determine the right moment to make interventions by the maintenance area.

Currently, maintenance models in UHT beverage production plants are based on preventive, predictive and corrective actions. By applying the circular maintenance methodology, it is possible to reduce corrective actions and environmental impact through savings in electrical energy consumption, prolonging the useful life of parts, increasing the availability of equipment and reusing waste in other industries.

Key Words: Predictive Maintenance, IoT, Machine Learning, Circular Economy, UHT.

ABREVIATURAS

Abreviatura	Descripción
IoT	Internet of Things
UHT	Ultra-High Temperture
TPM	Mantenimiento Total Productivo
RCM	Reliability Centered Maintenance
PMO	Planned Maintenance Optimization
WCW	World Class Maintenance
RCA	Análisis Causa Raíz
FMECA	Análisis de Modo de Falla y Efectos
LCC	Life cycle cost
KPI	key performance indicator
MTBF	Mid Time Between Failure
MTTR	Mid Time To Repair
JIPM	Japan Institute of Plant Maintenance
LTLT	Log Temperature Long Time
HTST	High Temperature Short Time
CIP	Cleaning in Place
AIC	Aseptic Intermediate Cleaning
VTIS	Sistema de Infusión de Tratamiento de Vapor
PLC	Controlador Lógico Programable
TT	Transmisor de Temperatura
PSL	Pressure Switch Level

TSL	Temperature System Level
CPU	Unidad Central de Procesamiento
TIC	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
CPM	Ciclos por Segundo
mm/s	Milímetros por segundo

SIMBOLOS

Símbolo	Termino	Unidad
h	Tiempo	Horas
min	Tiempo	Minutos
s	Tiempo	Segundo
%	Porcentaje	Porcentaje
°C	Temperatura	Grados Celsius
Ph	Potencial de Hidrogeno	Ph
A	Área	Pulgadas
V	Volumen	m/s
P	Densidad	g/cm ³
btu	British thermal unit	Btu
bar	Presión	Bar
psi	Presión	Psi
l	Litros	L
mm	Distancia	Mm
W	Potencial	W
Hz	Frecuencia	Hz
Cm	Distancia	Cm
G	Masa	G
Kg	Masa	Kg
Gl	Volumen	Gl
A	Corriente	Amperios
V	Tensión	Voltios

TABLA DE CONTENIDO

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	16
2. OBJETIVOS.....	18
3. METODOLOGÍA	19
3.1. FASE 1.....	19
3.2. FASE 2.....	20
3.3. FASE 3.....	20
4. ASPECTOS CONCEPTUALES	20
4.1. MANTENIMIENTO	21
4.2. TIPOS DE MANTENIMIENTO.....	25
4.3. INDICADORES DE MANTENIMIENTO.....	30
4.4. CICLO DE VIDA ÚTIL DE UN EQUIPO	34
4.4.1. Etapas del ciclo de vida de un activo	34
4.4.2. Costo del Ciclo de Vida Útil	37
4.5. IMPACTOS AMBIENTALES DEL MANTENIMIENTO EN PLANTAS UHT .	38
4.6. ECONOMÍA CIRCULAR.....	39
4.6.1. Beneficios de la Economía Circular.....	43
4.6. TRATAMIENTO TÉRMICO	49
4.7.1. Clases de Tratamiento Térmico	50
4.7. PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA INDUSTRIA	53
4.8. PROCESO UHT	56
4.9. TIPOS DE PLANTAS UHT	58
5. MODELOS DE MANTENIMIENTO USADOS EN PLANTAS DE PRODUCCION DE BEBIDAS UHT Y SUS IMPACTOS	62
5.1. MANTENIMIENTO CORRECTIVO DE PLANTA UHT – TRATAMIENTO DIRECTO CON INYECCIÓN DE VAPOR E INTERCAMBIADOR TUBULAR	62
5.2. MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE PLANTA UHT – TRATAMIENTO DIRECTO CON INYECCIÓN DE VAPOR E INTERCAMBIADOR TUBULAR	64
5.3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE PLANTA UHT – TRATAMIENTO DIRECTO CON INYECCIÓN DE VAPOR E INTERCAMBIADOR TUBULAR	75
6. EVALUACIÓN DEL MODELO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO FRENTE A LA APLICACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR	78
7. SISTEMA PROPUESTO: ECONOMÍA CIRCULAR APLICADA A MANTENIMIENTO	89
7.1. PRIMER PILAR - VIDA ÚTIL DE LAS PARTES.....	90

7.2. SEGUNDO PILAR - INDICADORES DE CONTROL	93
7.3. TERCER PILAR - MANEJO DE RESIDUOS – ECONOMÍA CIRCULAR APLICADO A MANTENIMIENTO.....	97
7.6. ANÁLISIS FINANCIERO	102
8. CONCLUSIONES	107
9. RECOMENDACIONES	109
10. BIBLIOGRAFÍA.....	110

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Etapas de la evolución del mantenimiento	22
Tabla 2. Tiempo vs Temperatura Destrucción de Bacterias.....	50
Tabla 3. Mantenimientos Correctivos - Planta Cundinamarca.....	63
Tabla 4. Mantenimientos Correctivos - Planta Antioquia.....	63
Tabla 5. Mantenimientos Correctivos - Planta Cauca.....	64
Tabla 6. Partes de cambio en mantenimientos homogeneizador preventivos.....	68
Tabla 7. Partes de cambio en mantenimientos pasteurizador UHT preventivos.	72
Tabla 8. Límites en Rango de Velocidad y Clases de Máquinas	75
Tabla 9. Condiciones de Clasificación.....	76
Tabla 10. Resultado Análisis de Vibraciones.....	78
Tabla 11. Fallas La planta UHT de tratamiento directo con inyección de vapor e intercambiador tubular.....	80
Tabla 12. Clasificación de Materiales Post Mantenimiento	81
Tabla 13. Porcentaje de Criticidad.....	82
Tabla 14. Consumo de Energía Eléctrica Antes y Después - Mantenimiento Preventivo 6000 Horas.	85
Tabla 15. Consumos de energía eléctrica antes y después de realizar el mantenimiento preventivo de 6000 horas.....	87
Tabla 16. Repuestos reutilizados	89
Tabla 17. 9R - Sistema de Economía Circular Aplicado a Mantenimiento.	96
Tabla 18. Registro de valores para residuos.	102
Tabla 19. Presupuesto de Inversión Inicial.....	105
Tabla 20. Costo Mantenimiento Homogeneizador.....	105
Tabla 21. Costo Mantenimiento Pasteurizador.....	106
Tabla 22. Ahorros con prolongación de horas de producción en los repuestos.	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de la Bañera.....	23
Figura 2. Características de los Indicadores.....	31
Figura 3. Economía Circular vs Economía Lineal.....	39
Figura 4. Diagrama de Economía Circular	40
Figura 5. 9R Economía Circular	42
Figura 6. Beneficios de la Economía Circular.....	44
Figura 7. Materia Reutilizable en Colombia.....	45
Figura 8. Porcentajes de Reutilización en Colombia.....	46
Figura 9. Parque Industrial Kalundborg.....	48
Figura 10. Perfil de Temperatura Leche en Tratamiento HTST.....	51
Figura 11. Perfil de Temperatura Nata en Tratamiento HTST.....	52
Figura 12. Calentamiento Indirecto.....	55
Figura 13. Planta UHT – Tratamiento directo con inyección de vapor y con intercambiador de placas	59
Figura 14. Planta UHT – Tratamiento indirecto con intercambiador de calor de placas.....	60
Figura 15. Planta UHT – Tratamiento directo con inyección de vapor e intercambiador tubular.....	61
Figura 16. Planta UHT – Tetra VTIS.....	62
Figura 17. Mantenimientos Correctivos - Planta Cundinamarca.....	63
Figura 18. Mantenimientos Correctivos - Planta Antioquia.....	63
Figura 19. Mantenimientos Correctivos - Planta Cauca.....	64
Figura 20. Área para almacenamiento de Lubricantes usados.....	73
Figura 21. Área para Almacenamiento de Chatarra	74
Figura 22. Área para Almacenamiento de Cartón.....	74
Figura 23. Residuos - Post Mantenimiento.....	81
Figura 24. Clasificación de Residuos.....	82
Figura 25. Consumos de Energía Eléctrica Antes y Después de trabajos de Mantenimiento.....	85
Figura 26. Consumos de Energía Eléctrica Antes y Después de trabajos de Mantenimiento.....	88
Figura 27. Estructura para la gestión de la vida útil de repuestos.....	93
Figura 28. Cadena de Suministro Integrada.....	97
Figura 29. Cadena de Reutilización Directa.....	98
Figura 30. Cadena de Reparación.....	98
Figura 31. Cadena de Restauración.....	99
Figura 32. Cadena de Remanufactura.....	100
Figura 33. Cadena de Canibalización.....	100
Figura 34. Cadena de Reciclaje.....	101

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Disponibilidad	31
Ecuación 2. Disponibilidad Total	32
Ecuación 3. MTBF	32
Ecuación 4. MTTR.....	33
Ecuación 5. MTTR.....	33
Ecuación 6. Intercambiado de Calor	55
Ecuación 7. Intensidad eléctrica.	93
Ecuación 8. Vibraciones.....	93
Ecuación 9. Temperatura.....	94
Ecuación 10. Residuos reutilizados.....	95

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Por el crecimiento industrial y la aparición de nuevas tecnologías el área de mantenimiento ha evolucionado, con el fin de dar respuesta a la alta demanda en producción de bebidas dentro de las plantas UHT (ultra alta temperatura); Las UHT están conformadas por un equipo de esterilización que permiten calentar el producto a más de 135°C con el fin de esterilizarlo y destruir todos los microorganismos, seguido de un homogeneizador que estandariza el producto eliminando cualquier inconsistencia en su textura. Este tipo de planta es utilizada en empresas que produzcan alimentos con un bajo nivel de acidez como lo tienen las leches blancas y saborizadas, cremas, sopas, salsas y alimentos para bebés.

Debido a la alta demanda mencionada anteriormente las horas de trabajo de los equipos aumenta y por consiguiente sus mantenimientos, estos a su vez generan residuos en su mayoría reutilizables por su composición ya que cuentan con materiales como el acero, acero inoxidable, cartón, plástico y lubricantes. Actualmente estos residuos son almacenados para las empresas recicladoras sin impactar de manera positiva la economía y el medio ambiente en las empresas productoras, lo anterior teniendo en cuenta que los residuos podrían ser reutilizados en otros procesos de la compañía.

La economía circular es una alternativa que sugiere hacer un mejor uso de los recursos y plantea la reincorporación de residuos a la cadena en el mismo sector productivo o dentro de otros formando ciclos o sistemas en cascada. Teniendo en cuenta lo anterior, en el desarrollo de este trabajo se busca la inclusión del modelo de economía circular en el área de mantenimiento por medio del planteamiento de

un sistema, con el fin de aprovechar de una manera adecuada los diferentes recursos que permitan alcanzar una producción sostenible, bien sea en la propia industria de bebidas o en otras industrias.

Este sistema se basa en prolongar la vida útil de las partes de los equipos UHT y el manejo de residuos de mantenimiento, llevando indicadores de control que permitan una visualización constante del funcionamiento del sistema.

FORMULACION DEL PROBLEMA

¿De qué forma se puede aplicar el modelo de economía circular a las actividades de mantenimiento en plantas de productos UHT?

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

Evaluar los impactos generados por mantenimiento y su optimización a partir del modelo de economía circular, enfocado en plantas de producción de bebidas UHT (Ultra High Temperature).

2.2. ESPECÍFICOS

Analizar los modelos de mantenimiento usados en plantas de producción de bebidas UHT e identificar sus impactos.

Evaluar la aplicación del modelo de economía circular en los modelos de mantenimiento que se desarrollan actualmente en plantas de producción de bebidas UHT.

Desarrollar un sistema que permita la aplicación del modelo de economía circular en los procesos de mantenimiento que se llevan a cabo actualmente en las plantas de producción de bebidas UHT.

3. METODOLOGÍA

El marco metodológico en el cual se orientó la presente investigación es de tipo descriptivo con un enfoque cualitativo, ya que el objetivo del trabajo es analizar de qué forma se puede utilizar el modelo de economía circular en los procesos de mantenimiento en plantas UHT. La población objeto de análisis para este trabajo fueron tres plantas de producción de bebidas UHT ubicadas en los departamentos de Cundinamarca, Caloto y Antioquia en Colombia.

Roberto Hernández Sampieri, plantea que el enfoque cualitativo comprende los fenómenos, explorándolos desde la perspectiva de los participantes en un ambiente natural en relación con el contexto y lo recomienda cuando el tema de estudio ha sido poco explorado [49]. En cuanto al tipo de diseño como se mencionó es descriptivo ya que busca especificar las propiedades importantes de personas, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis.

Para la descripción y cumplimiento de los objetivos se desarrollaron las siguientes fases:

3.1. FASE 1

En la primera fase se realizó una revisión documental en la cual se analizaron los diferentes tipos de mantenimiento, así como el modelo de economía circular donde a

partir de dicha revisión se determinaron los modelos de mantenimiento aplicados actualmente en plantas de producción de bebidas UHT, se realizó una caracterización de los equipos que intervienen en cada proceso.

3.2. FASE 2

En esta fase se realizó una identificación de residuos, materiales, tiempos, costos e impactos generados en los procesos de mantenimiento que se llevan a cabo en plantas de producción de bebidas UHT. Se desarrollaron matrices de control y registro de los procesos de mantenimiento, registrando de manera detallada insumos, costos, desperdicios, tiempos e impactos.

3.3. FASE 3

En esta última fase se desarrolló un Sistema de Economía Circular para procesos de mantenimiento en plantas de producción de bebidas UHT, priorizando los impactos críticos a nivel ambiental y económico mediante la prolongación de la vida útil de las piezas de cambio y el manejo de residuos de mantenimiento, llevando indicadores de control.

4. ASPECTOS CONCEPTUALES

4.1. MANTENIMIENTO

Mantenimiento es un conjunto de procesos técnicos y administrativos encaminados a mantener o llevar un equipo al estado de operación a través del tiempo y así poder desempeñar la función requerida [51].

Evolución del Mantenimiento

La aparición de los primeros departamentos de mantenimiento se da en el siglo XX, en Estados Unidos, donde el único tipo de mantenimiento que existía era el correctivo.

La evolución del mantenimiento en el transcurso de la historia se ha dividido en seis etapas, principalmente en los sectores de industria aeronáutica, manufactureras, ferroviarias, automotriz, naval, etc., siendo la aeronáutica el sector pionero donde se han desarrollado técnicas predictivas y software de monitorización. La imagen a continuación presenta los objetivos del mantenimiento que se contemplaban en cada una de las etapas.

Transición		Producción		Mantenimiento e Ingeniería de Fabricas	
Etapa	Desarrollo	Enfoque	Necesidad	Enfoque	Objetivo
1	Antes 1950	Producto	Generar producto	Acciones correctivas	Objetivo que pretende
2	1950 a 1959	Producción	Estructurar un sistema productivo	Acciones planeadas	Reparar fallos imprevistos
3	1960 a 1980	Productividad	Optimizar la producción	Establecer tácticas de mantenimiento	Prevenir, predecir y reparar fallo
4	1981 a 1995	Competitividad	Mejorar índices mundiales	Implementar una estrategia	medir costos, compararse y predecir índices

5	1996 a 2003	Innovación	Lean	Mantenimiento esbelto	
6	2013	Nuevas tecnologías	Industria 4.0 y de técnicas lean en las industrias.		

Tabla 1. Etapas de la evolución del mantenimiento [1]

Etapas del Mantenimiento

La primera etapa se desarrolló desde los años 1930 hasta 1950 aproximadamente en el transcurso de la segunda guerra mundial, donde las actividades de mantenimiento en industrias distintas a la aeronáutica se centraban solo en la reparación de las partes que se dañaban, o mantenimientos sencillos como lubricación y limpieza de piezas

En esta etapa se contrata mano de obra de las áreas mecánica, electrónica, electricidad y neumática con el fin de tener mano de obra capacitada para desempeñar las labores correctivas de mantenimiento.

Se desarrollan herramientas necesarias para la gestión de mantenimiento, aparecen las primeras órdenes de trabajo, se crean los almacenes de repuestos, esto con el fin de garantizar los trabajos para respaldar el área de producción la cual tiene como prioridad la elaboración de productos o generación de servicios.

Aparecen técnicas preventivas y predictivas como inspecciones, mediciones, valoración de condición de equipos, hojas de vida de equipos, control de vida útil, tribología, análisis de vibraciones, entre otras.

La segunda etapa posibilita distinguir los trabajos correctivos, preventivos, de modificación y de predicción. Esta etapa transcurrió entre los años 1950 y 1980, donde la prioridad era la disponibilidad de los equipos de producción. Se define como objetivo el tiempo máximo de operación de los equipos a un bajo costo, se

implementan mantenimientos preventivos con base en revisiones cíclicas según la variable de interés teniendo en cuenta el tipo de industria, sistemas para la planificación y control del trabajo, para este tipo de revisiones se implementan herramientas como la curva de la bañera, la cual establece que en los equipos, activos o sistemas pueden presentar tres tipos de fallos, los iniciales, los normales y de desgaste, los fallos iniciales son recurrentes pero que descienden rápidamente con el tiempo, luego la etapa de fallos normales, donde se presentan por causas aleatorias externas al equipo, y por último etapa de fallos por desgaste, donde se presentan fallos de crecimiento rápido, debido a desgastes del equipo, lo anterior se puede observar en la figura 1.



Figura 1. Curva de la Bañera [1].

El mantenimiento de segunda generación se basó en actividades correctivas y preventivas, esto dio paso al desarrollo de software de gestión de trabajos y de activos, inicia la generación de órdenes de mantenimiento con información relevante de las tareas a realizar, área, avería y repuestos.

Se implementan técnicas de predicción por análisis de síntomas y por estadísticas de fallas, se diseñan planes para recolección de datos en equipos críticos.

La tercera etapa se desarrolló entre 1989 a 1995, donde el mantenimiento se basa en disponibilidad, fiabilidad y costos, se inicia la inclusión de normas y reglamentos para equipos de presión y temperatura.

La cuarta etapa se desarrolló entre 1995 hasta 2003, se enfoca en la competitividad, capacitación al personal, medición de resultados, e implementación de estrategias, aparecen los análisis de riesgo y causa raíz (RCA), análisis de modo de falla, efecto y criticidad (AMFEC) se incluyen en las estrategias de mantenimiento, indicadores RAM (Reliability, Availability & Maintainability), RPN (Número de Riesgos Prioritarios) y FMECA(Análisis de Modo de Falla y Efectos), las empresas se interesan por conocer que tan bien el departamento de mantenimiento hace su trabajo, lo que lleva a establecer sistemas como Costo del ciclo de vida (LCC), se realizan benchmarking para hacer comparaciones entre empresas del mismo rubro.

Los departamentos de mantenimiento y producción inician a trabajar en conjunto, producción implementa modelos como Lean Manufacturing o producción ajustada a la demanda.

En la quinta etapa aparece el Lean Maintenance o mantenimiento esbelto, este concepto viene de la filosofía de producción Lean Manufacturing o Manufactura Esbelta, creada por los japoneses Eiji Toyoda y Taiichi Ohno, donde se busca reducir las actividades, esfuerzos, inversiones, inventarios de materiales y herramientas, espacios y horas. En el mantenimiento esbelto se buscan desarrollar las siguientes prácticas:

- Estandarizadas con el fin de estabilizar y prolongar la vida útil de los equipos y aumentar el intervalo de tiempo entre intervenciones.
- Trasladar las tareas de mantenimiento rutinario al personal de producción.

- Mejoras en herramientas de gestión de almacén, análisis, planificación e informes.
- Gestionar los proyectos desde mantenimiento en todas las fases del mismo.

Todo esto enfocado en la mejora continua y encaminada a optimizar los recursos de la compañía [52] [58].

En la sexta etapa evolutiva aparece el mantenimiento 4.0, este va de la mano con las nuevas tecnologías de comunicación e interconexión de plantas y equipos, donde los mismos equipos están en la capacidad de auto diagnosticarse y generar alertas, dando paso a tener un mantenimiento centrado en la previsión, este mantenimiento incluye machine learning o aprendizaje de máquina y Big data como técnicas de análisis de datos para poder prolongar los tiempos de intervención de mantenimiento de forma segura[52].

4.2. TIPOS DE MANTENIMIENTO

Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo es el mantenimiento que se realiza luego de que el equipo presenta una falla [51].

Mantenimiento Preventivo

Este tipo de mantenimiento tiene como finalidad evitar las fallas que se puedan llegar a presentar en el equipo o reducir las consecuencias de estas [51].

Mantenimiento Predictivo

Este tipo de mantenimiento tiene como finalidad evitar las fallas que se puedan llegar a presentar en el equipo o reducir las consecuencias de estas, con base a una evaluación de la condición de una o más características técnicas y operativas del equipo [51].

Mantenimiento Proactivo

Este tipo de mantenimiento se utiliza para evitar fallas o identificar defectos que podrían conducir a una falla, incluye acciones preventivas, predictivas y correctivas que se identifiquen de las dos anteriores [51].

Mantenimiento Programado

Son las actividades de mantenimiento planeado a las cuales se le asignan recursos y fecha de ejecución [51].

Mantenimiento en Operación

Este tipo de mantenimiento se puede realizar con el equipo funcionando, se puede realizar en caliente [51].

Mantenimiento no Programado

Intervenciones sobre los equipos sin una programación previa. Generalmente, hacen parte del Mantenimiento Correctivo o Reactivo [51].

TPM (Mantenimiento Productivo Total)

Este modelo de mantenimiento fue creado en Japón por el Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM), con el fin de eliminar las fallas de equipos, ajustes de máquina, averías menores, velocidad de producción reducida, defectos en el proceso, pérdidas de tiempo, para poder garantizar la producción Just in Time o justo a tiempo donde se prioriza la eliminación de los desperdicios.

El TPM se basa en los siguientes principios:

- La participación de todo el personal de la compañía desde los altos mandos hasta piso de planta, esto fortalecerá el éxito del modelo.
- Cultura empresarial a maximizar el alcance de metas propuestas en los sistemas de gestión y producción de los equipos y sistemas.
- Implantar un sistema de gestión con el fin de eliminar las pérdidas antes de que se generen.
- Planes de mantenimientos preventivos para evitar correctivos, soportados por los departamentos de mantenimiento y el mantenimiento autónomo.
- Perseguir una mejora continua por medio de los sistemas de gestión de las áreas de producción, ingeniería, ventas, y alta gerencia.

El resultado final que se llega a alcanzar mediante la implementación de este modelo de mantenimiento es tener equipos e instalaciones más eficientes, reducción de costos, aumento en la calidad, reducción de tiempos, y sistemas de producción con una mayor flexibilidad, esto permite a las empresas ser más competitivas [5] [6].

Mantenimiento Autónomo

Este tipo de mantenimiento hace parte del TPM, es ejecutado por los operarios de los equipos ya que ellos son las personas que más interactúan con la maquina, se desarrollan tareas de limpieza, lubricación, reparaciones menores y análisis de mejoras en el equipo, este se divide en siete pasos para su adecuada ejecución:

Limpieza inicial

La limpieza de los equipos es un hábito que se debe desarrollar en los operadores, ya que la limpieza y el orden es el punto inicial para desarrollar cualquier actividad. Inicialmente es difícil ya que las personas se resisten al cambio y habitualmente se acostumbra a trabajar de forma desordenada y con suciedad y más cuando hay personas dedicadas a realizar limpieza dentro de las instalaciones.

Limpieza del equipo

Lo más difícil para habituar a las personas será la limpieza inicial, se debe crear la necesidad para que inconscientemente el operario realice las labores de limpieza automáticamente y que este desee mantener el equipo limpio, una vez dado este paso se solicita al personal que proponga soluciones para contrarrestar el desorden, suciedad, etc.

Estándares de limpieza y lubricación

En los pasos anteriores los operarios de los equipos además de realizar limpieza y orden identifican las condiciones de las máquinas, esto con el fin de prevenir el deterioro con la ayuda de la lubricación reajuste de partes y limpieza.

Inspección general

En esta etapa se busca identificar los modos de falla del equipo mediante una inspección visual, esto después de realizar las pertinentes capacitaciones al personal desarrollando nuevas habilidades y destrezas que permitan realizar un trabajo de calidad.

Inspección autónoma

En este paso se evalúan los resultados de los anteriores pasos, con el fin de eliminar inconsistencias y garantizar el mantenimiento autónomo, estas inspecciones se realizan con el equipo en paro, en marcha y con las condiciones habituales de operación. Estas labores dan paso a la buena ejecución de los planes de mantenimiento preventivo, mejoras de diseño, nuevos procedimientos de inspección, el resultado final de esta etapa es la elaboración de la acción correctiva.

Término de la implantación del mantenimiento autónomo

En este último paso se tienen operarios autónomos, con alto conocimiento en los equipos lo que los hacen unos colaboradores confiables ya que pueden realizar los mantenimientos autónoma del equipo [7].

4.3. INDICADORES DE MANTENIMIENTO

Los indicadores son importantes en la gestión de mantenimiento ya que permiten evaluar el comportamiento operacional de los equipos, para definirlos se puede utilizar las Seis 6 M por sus siglas en inglés (método, maquinaria, materia prima, mano de obra, medición y management), los principales requerimientos que deben tener los indicadores son:

- Deben ser de fácil medición y alto aporte de información.
- Los indicadores deben tener en cuenta a clientes internos – producción, calidad.
- Contemplar la medición de tiempos de proceso.
- Realizar benchmarking de los indicadores de la competencia.
- Divulgar y promover una cultura de medición en su equipo de trabajo.
- Utilizar solamente indicadores de interés para el área de mantenimiento.
- Involucrar a todo el equipo de mantenimiento en la definición de los KPIs.
- Analizar la eficiencia de los indicadores.
- Usar indicadores precisos, los que no cumplan con este criterio elimínelos o modifíquelos [8].

La siguiente figura refleja un resumen de los componentes de los indicadores.



Figura 2. Características de los Indicadores [2].

Indicadores de Mantenimiento Básicos

- **Disponibilidad**

Es el indicador más importante del área de mantenimiento ya que mide el porcentaje del tiempo en que un activo o sistema está en óptimas condiciones para ser operado, es el resultado de dividir el número de horas donde ha estado habilitado para producción entre el número total de horas de un periodo.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Horas Totales} - \text{Horas paradas por Mantenimiento}}{\text{Horas Totales}}$$

Ecuación 1. Disponibilidad [9].

- **Disponibilidad Total**

La disponibilidad total es la media de la disponibilidad de todos los equipos de la planta, su cálculo se realiza a partir de la sumatoria los equipos dividido en el número de equipos significativo, este indicador permite determinar la disponibilidad de la planta.

$$\text{Disponibilidad Total} = \frac{\sum \text{Disponibilidad de Equipo}}{\text{Nº de Equipos Significativos}}$$

Ecuación 2. Disponibilidad Total [9].

- **Tiempo Promedio entre Fallos - TMEF**

Este indicador muestra la frecuencia de las fallas en los equipos, se utiliza para tomar decisiones en los planes de mantenimiento preventivo y correctivo y su cálculo proviene del resultado de la división del número de horas total de un periodo sobre el número de averías.

$$\text{MTBF} = \frac{\text{Nº horas total periodo de tiempo analizado}}{\text{Nº de averías}}$$

Ecuación 3. MTBF [9].

- **Tiempo Promedio para Reparar - TPPR**

Este indicador permite conocer el tiempo para la solución de una avería y así poder clasificar su importancia, se obtiene del resultado de dividir el tiempo de paro entre avería entre la cantidad de averías en un periodo determinado.

$$\text{MTTR} = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ horas paro por avería}}{\text{N}^{\circ} \text{ de averías}}$$

Ecuación 4. MTTR [9].

- **Disponibilidad por Avería**

Este indicador permite identificar la avería con mayor tiempo de espera para su solución, reflejando la afectación en la disponibilidad del equipo. Se obtiene del resultado al restar el tiempo medido entre fallas con el tiempo medido para reparación y el producto se divide en el tiempo medido entre fallas.

$$\text{Disponibilidad por avería} = \frac{\text{MTBF} - \text{MTTR}}{\text{MTBF}}$$

Ecuación 5. MTTR [9].

- **Confiabilidad**

Es la probabilidad de que un equipo cumpla una misión específica bajo condiciones de uso determinadas en un período determinado. El estudio de confiabilidad es el estudio de fallos de un equipo o componente. Si se tiene un equipo sin fallo, se dice que el equipo es ciento por ciento confiable o que tiene una probabilidad de supervivencia igual a uno. Al realizar un análisis de confiabilidad a un equipo o

sistema, obtenemos información valiosa acerca de la condición de este, probabilidad de fallo, tiempo promedio para fallo, etapa de la vida en que se encuentra el equipo [53].

4.4. CICLO DE VIDA ÚTIL DE UN EQUIPO

El ciclo de vida útil de un equipo nace desde la planeación del proyecto, donde se estima un tiempo para su funcionamiento; los diseñadores tienen claro que en algún momento el activo no será confiable ya sea por degradación debido a una ausencia de mantenimiento, por suspensión de repuestos de fábrica o porque el mantenimiento supera el costo del equipo.

Teniendo en cuenta lo anterior las partes mecánicas rotativas y los intercambiadores de calor con un adecuado mantenimiento pueden alcanzar una vida útil de 15 años y en cuanto a los equipos de instrumentación y control su servicio puede llegar hasta 10 años.

La economía circular permite el alargamiento de la vida útil de los equipos, mediante diferentes estrategias dentro de las que se encuentran la aplicación de técnicas de predicción y actividades de recuperación.

4.4.1. Etapas del ciclo de vida de un activo

El ciclo de vida de un activo inicia con la concepción del proyecto y finaliza con su descarte o reposición, es importante diseñar cada una de las etapas contemplando

el modelo de economía circular en cada una de las etapas que a continuación se presentan:

- **Pre-proyecto**

En esta etapa se plantea la concepción, necesidades, costos, vida estimada del activo y diseño del proyecto.

- **Estudio piloto**

En esta etapa se realizan estudios previos a la ejecución o adquisición del activo, donde se determinan y seleccionan materiales, tecnologías y dispositivos óptimos para satisfacer la necesidad del proyecto.

- **Ingeniería**

Se realiza el cronograma de actividades y la asignación de tareas y responsables.

- **Diseño de los procesos**

Se detalla el grupo de procesos por el que el activo pasara en todo su ciclo de vida útil.

- **Puesta en marcha de acuerdo a las etapas planeadas**

Con base en lo previamente planteado se debe ejecutar el proyecto pasando por cada una de las etapas, definición, instalación, pruebas, puesta en marcha y operación, conservación, optimización, seguimiento y terminación del ciclo de vida del activo mediante el plan de trabajo definido.

- **Operación de las instalaciones**

En la etapa de operación del activo se reciben los beneficios del proyecto e inicia el retorno de inversión, es la etapa donde arranca la producción.

- **Mantenimiento**

Una vez el activo está en funcionamiento se deben realizar tareas de mantenimiento preventivos y predictivos para garantizar el continuo funcionamiento y garantizar la producción.

- **Retroalimentación**

Luego de un tiempo determinado de funcionamiento del activo se realiza un estudio que permita conocer si se cumplió con las expectativas planteadas en la planeación del proyecto y así determinar los cambios con respecto a lo planificado inicialmente.

- **Análisis**

Para este análisis se cuenta con la información de costos de mantenimiento, números de fallas y aplicación de la herramienta de análisis causa raíz durante todo el ciclo de vida del activo, con el fin de determinar el momento en que finaliza el ciclo de vida del equipo.

- **Mejoras**

Partiendo de la fase anterior por medio del análisis se puede determinar que mejoras requiere el activo para incrementar la confiabilidad y productividad y así cumplir con los objetivos de la empresa.

- **Descarte reciclaje o venta**

Este es el último paso del ciclo de vida del activo, la empresa se deshace del activo cuando ya no cumple con sus funciones [10].

4.4.2. Costo del Ciclo de Vida Útil

El costo del ciclo de vida permite conocer los costos del activo desde su adquisición hasta dar de baja, este puede calcularse aplicando la siguiente formula:

$$LCC = Ca + Cin + Co + Ce + Cm + Ctp + Cenv + Cd$$

Ca = Costo de adquisición

Cin = Costo de Instalación

Co = Costo de Operación

Ce = Costo de Energía

Cm = Costo de Mantenimiento

Cenv = Costos Ambientales

Cdb = Costo de Dar de Baja

Con la aplicación del modelo de economía circular al mantenimiento se impactan positivamente los costos de mantenimiento ya que permite alargar la vida útil de las partes, de igual forma los costos de operación se podrán disminuir ya que con las técnicas predictivas se pueden anticipar las fallas y garantizar la continua operación de los equipos. Así mismo disminuirán los costos ambientales mediante la reutilización de partes y fluidos de las máquinas en otras industrias [11].

4.5. IMPACTOS AMBIENTALES DEL MANTENIMIENTO EN PLANTAS UHT

Los impactos ambientales se clasifican en cuatro grupos principalmente por su efecto en el tiempo:

Irreversible: Este impacto en el medio ambiente no se puede revertir, el entorno al que se exponga no volverá a su estado original, como ejemplo se tiene una explotación minera a cielo abierto.

Temporal: Este impacto ambiental no es de la misma magnitud que el anterior, ya que el medio ambiente puede volver a su estado original antes del impacto en un plazo corto.

Reversible: El medio ambiente expuesto a este impacto puede recuperarse a su estado original o a un estado próximo en un periodo corto, mediano o largo según sea el daño ocasionado.

Persistentes: En esta clase de impacto el daño ocasionado al medio ambiente es de largo plazo y constante en el tiempo, un ejemplo es un derrame de químicos.

En las plantas de productos UHT los residuos generados por las labores de mantenimiento son residuos reciclables o reutilizables tales como cartón, plástico, acero, acero inoxidable y aceites, los cuales se llevan a procesos de filtración y laboratorios donde se determinan las características de estos aceites y luego pueden ser reutilizados en otras máquinas o industrias [12].

4.6. ECONOMÍA CIRCULAR

La economía circular es el modelo opuesto al actual modelo de economía lineal donde se adquieren, utilizan y se desechan los productos, la economía circular busca reincorporar los residuos a la cadena de valor de otras industrias o procesos, inicia desde el diseño de los productos, procesos y servicios, genera beneficios en la reducción de costos, y obteniendo impactos positivos en el medio ambiente [13].

El modelo de economía circular se inicia con el concepto de desarrollo sostenible en la cumbre de Rio de Janeiro en el año 1992, el cual lo ratificaron 180 países. El modelo de economía circular inicialmente se conoció como economía de la cuna a la cuna” o “economía de bucle cerrado”, hasta llegar a adoptar el nombre actual, este modelo busca transformar la economía tradicional o lineal, la cual se basa en producir, usar y tirar pasando a una economía donde se reutilizan los residuos en procesos o productos de una industria, por otra donde se aprovechen, esto lleva a conseguir reducciones en el impacto ambiental y aumentar la sostenibilidad de las industrias, en la figura a continuación se observa el concepto de economía lineal donde inicia el ciclo de un producto y finaliza en la basura versus la economía circular donde el ciclo del producto inicia se usa y posteriormente se reutiliza.

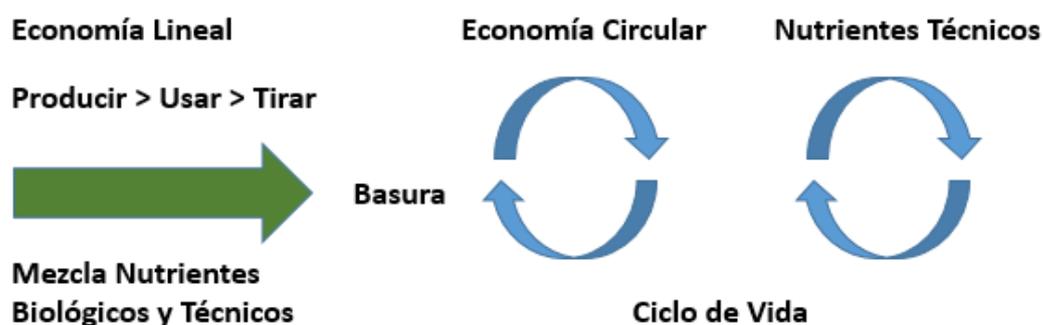


Figura 3. Economía Circular vs Economía Lineal [14, p. 3].

En la siguiente figura se muestra una descripción del modelo de economía circular, donde se aprecia que el ciclo inicia en el diseño y fabricación, pasa a envasado y embalaje continúa con una distribución y transporte hasta convertirse en un desecho y pasar a la etapa de reutilización o reparación.

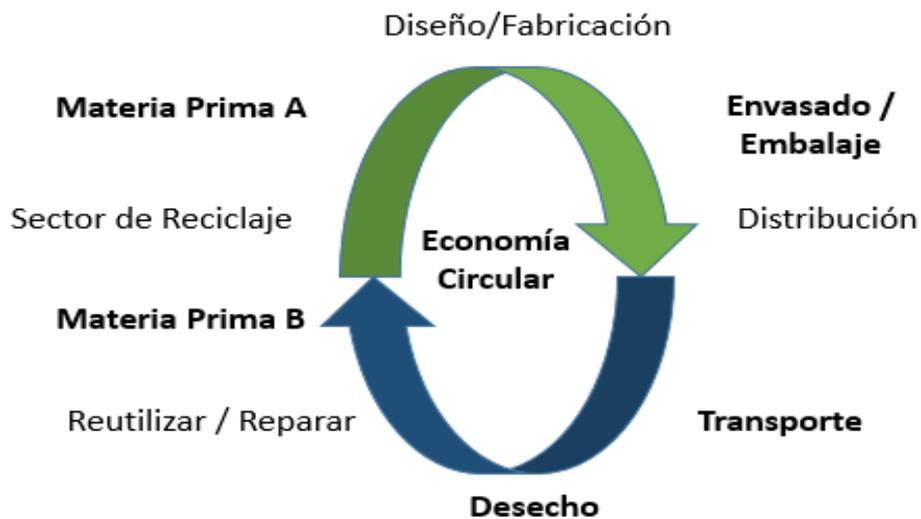


Figura 4. Diagrama de Economía Circular [14, p. 3].

En este modelo los productos deben ir diseñados desde su concepción para que puedan reutilizados al final de su vida útil, se clasifican en dos grupos:

Biológicos: Son todos aquellos materiales diseñados para reincorporarse de manera segura a la biosfera.

Técnicos: Son todos aquellos materiales que se diseñan para ser reutilizados con un alto grado de calidad al reincorporarse.

No es posible basar un sistema en partes con reutilización biológica y así tener un impacto cero en el medio ambiente, pero si se puede implementar estándares de

reutilización en las partes técnicas y al final del ciclo de vida reincorporarlas nuevamente [60].

De acuerdo con los planteamientos establecidos por MacArthur [54] la economía circular busca aumentar el tiempo de permanencia de tanto de materiales como de productos o de sus partes en procesos circulares, en donde estos productos o materiales puedan ser reincorporados a la cadena cuando estos culminen su vida útil.

De acuerdo con lo anterior se establece que la economía circular es regeneradora, lo que significa que los productos y procesos deben ser diseñados pensando en sistemas circulares.

Los procesos de mantenimiento no son ajenos a esta circularidad, buscando minimizar los residuos generados en el proceso, pero buscando también el mejor aprovechamiento de los recursos utilizados en el mismo.

El ministerio de ambiente y desarrollo sostenible en el año 2019 promulga la estrategia nacional de economía circular, [55] en la cual se establecen cinco tipos de estrategias innovadoras que buscan ser iniciativas para la transformación hacia una economía circular, estas iniciativas son:

1. **Modelos de valoración de residuos**, se busca la utilización de residuos que fueron generados en los procesos productivos para que se puedan aprovechar y utilizar en actividades y aplicaciones diferentes.

2. **Modelos Circulares**, con esta iniciativa se pretende que los materiales residuales se utilicen en el mismo proceso o actividad productiva.

3. **Modelos de extender la vida útil**, esta iniciativa tiene por objetivo el rediseño de productos y procesos, minimizando impactos ambientales y aprovechando mejor los recursos.

4. **Modelos de productos como servicios**, se fomenta la colaboración de productos y servicios entre diferentes usuarios.

5. **Modelos de plataforma**, se busca la optimización de los procesos por medio de uso de herramientas tecnológicas.

Estas iniciativas van acompañadas de nueve estrategias conocidas como las 9R de economía circular, las cuales se definen en la figura a continuación según L. Jiménez y E. Pérez [56].

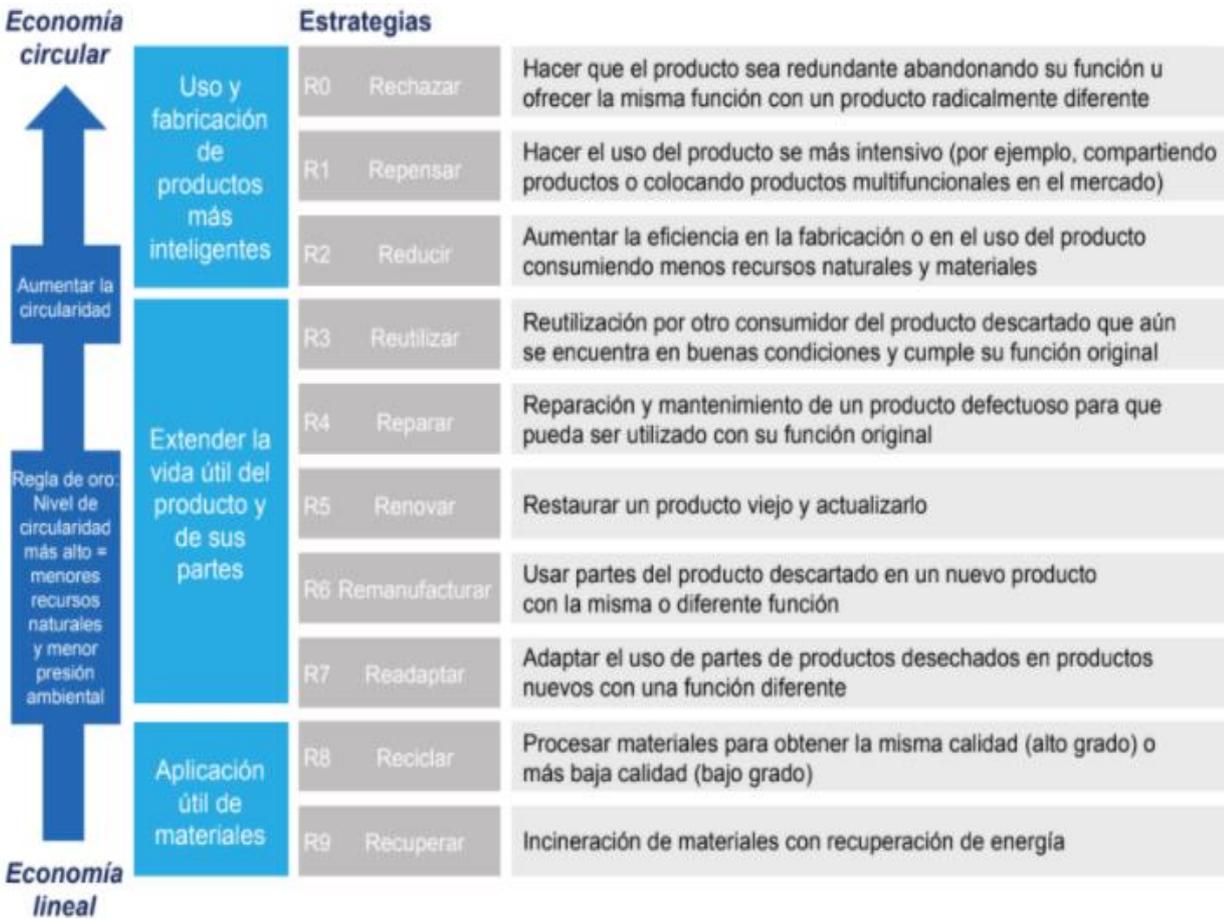


Figura 5. 9R Economía Circular [56].

En esta figura se describe cada una de las 9R que plantea la economía circular como una estrategia de circularidad para reducir el consumo de recursos naturales, materiales y minimizar la producción de residuos [56].

4.6.1. Beneficios de la Economía Circular

La economía circular al ser un modelo regenerativo tiene beneficios económicos, sociales y ambientales. El beneficio económico se obtiene al optimizar la entrada en el ciclo de generación de un producto o servicio y la reutilización a la salida de este, de igual manera al reutilizar materiales, agua y energía se genera nuevos mercados con requerimientos ambientales y sociales específicos lo cual lleva a alcanzar un beneficio económico. Por otro lado, los beneficios ambientales aparecen con la reducción del uso de materias primas, energía y agua, reduciendo la huella de carbón con lo que aumenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas.

Los beneficios sociales de la economía circular aparecen con la necesidad de prolongar el número de veces u horas de uso de los materiales, la utilización adecuada del agua y energía, lo cual conduce a la generación de nuevos empleos, aparición de nuevas empresas y lleva a las empresas existentes a investigar y desarrollar soluciones que se adapten a las necesidades demandadas por el modelo [61].

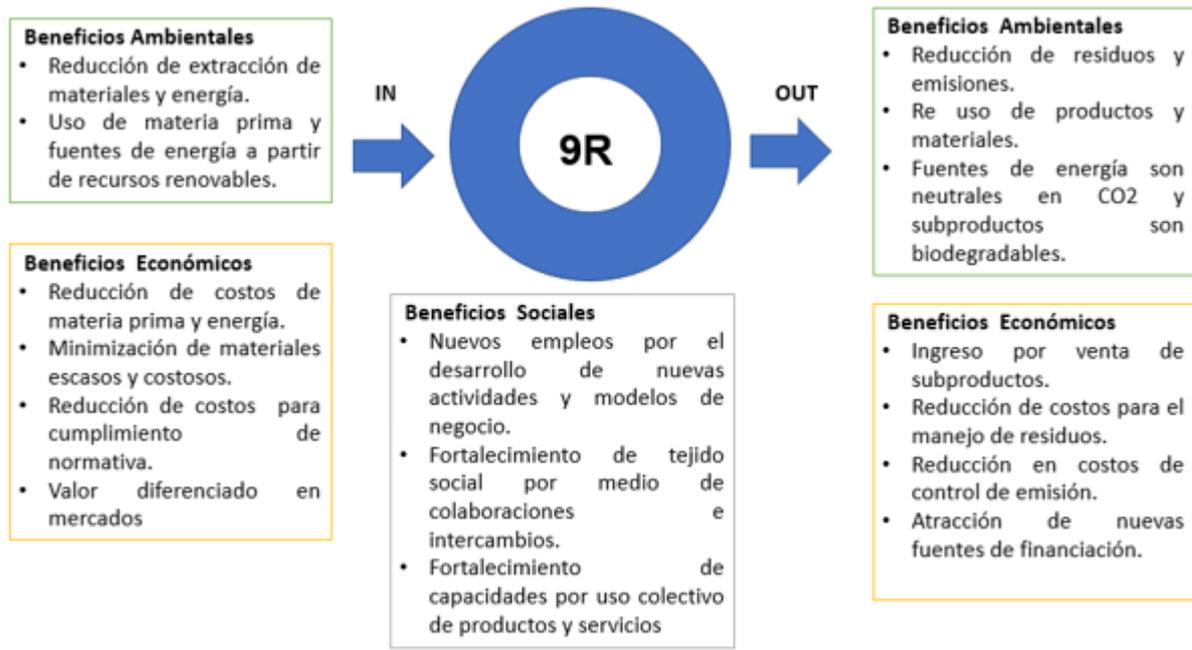


Figura 6. Beneficios de la Economía Circular [61].

ECONOMIA CIRCULAR EN COLOMBIA

En el plan nacional de desarrollo 2018 a 2022 se incluye la economía circular a partir de la lógica producir conservando y conservar produciendo, promoviendo el uso de materiales, agua y energía, priorizando la recuperación de los ecosistemas y la reutilización de materiales. Como objetivo del plan nacional esta el crecimiento verde impactando la reutilización en un 17,9% y una reducción de los gases de efecto invernadero en un 20% para el 2030.

La estrategia busca llegar a empresas que se desarrollen en los sectores de agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca; explotación de minas y canteras, industrias manufactureras, suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado; distribución de agua; evacuación y tratamiento de aguas residuales, gestión de desechos y actividades de saneamiento; construcción, comercio, transporte,

alojamiento y servicios de comida, actividades financieras y de seguros, actividades de atención a la salud, entre otras [61].

El potencial del país en la generación de materias reutilizables se representa en la imagen a continuación:

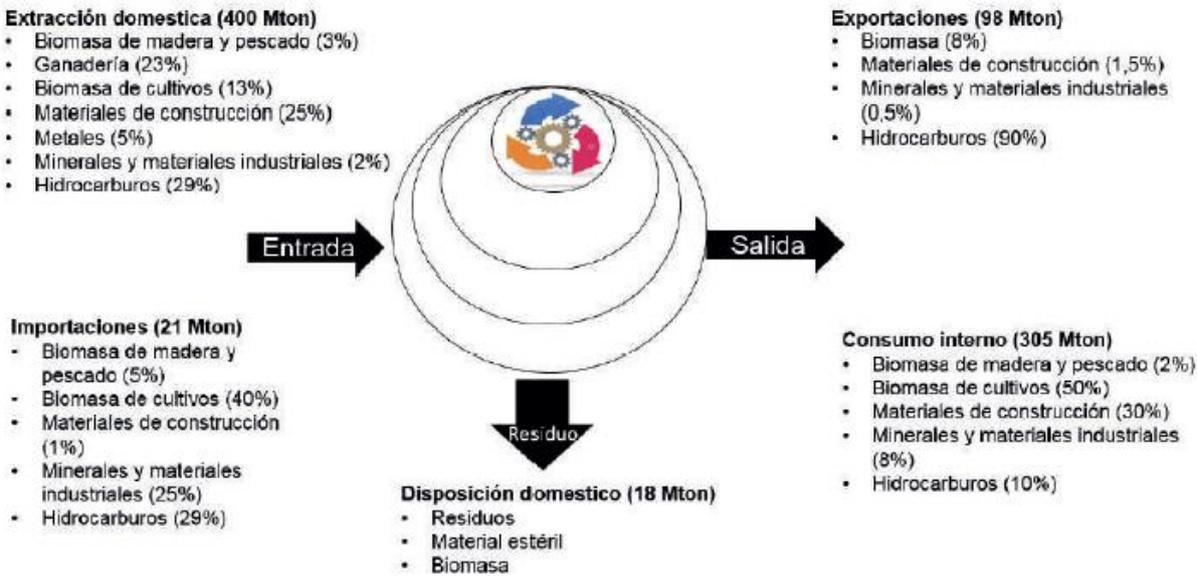


Figura 7. Materia Reutilizable en Colombia [61].

Profundizando un poco en la imagen a continuación se ve los porcentajes de reutilización y la distancia al máximo potencial.

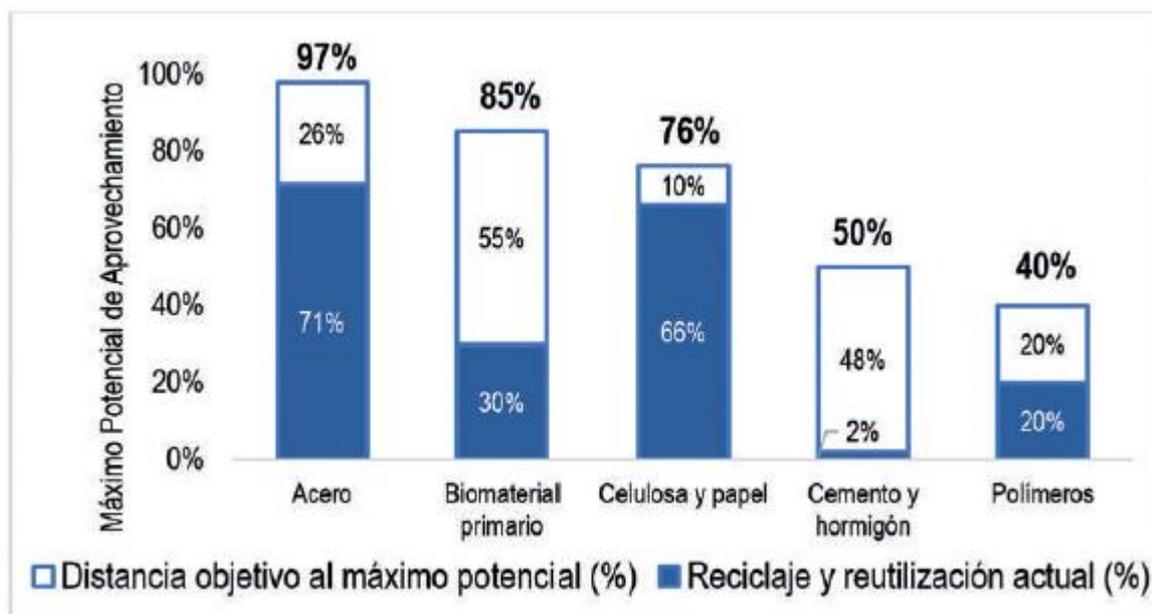


Figura 8. Porcentajes de Reutilización en Colombia [61].

A partir de estos resultados se definen seis líneas de acción:

Primera: Materiales industriales y productos de consumo masivo, esta línea se enfoca en los materiales empleados en procesos industriales, se encuentran incluidos en el mecanismo de responsabilidad extendida del fabricante, el cual rige desde 2007 en Colombia, siendo los residuos eléctricos y electrónicos, los de mayor prioridad.

Segunda: Línea de acción de Materiales de envase y empaque, se enfoca principalmente en las industrias de alimentos y bebidas, farmacéutica y cosméticos, en los empaques fabricados a partir de plástico, papel, cartón, metales, vidrio y materiales compuestos que alojan sus productos.

Tercera: Línea de acción de flujo de biomasa, se concentra en el sector agroalimentario ya que es el principal generador de biomasa residual.

Cuarta: Línea de acción de fuentes y flujos de energía, se emplean recursos naturales como el agua y combustibles fósiles para generación de energía, esta línea de acción busca la optimización de la generación energética mediante la utilización energías renovables, implementación de nuevas tecnologías, mejoras de rendimientos en procesos existentes y así disminuir el uso de los recursos.

Quinta: Línea de acción de flujo de agua, se enfoca en las fuentes de agua superficial, subterránea y lluvia, siendo los sectores de mayor consumo el agrícola, energético, doméstico y alimentos.

Sexta: Flujo de materiales de construcción, esta línea se enfoca en materiales a base de arcillas, cemento, madera, plásticos, vidrio, yeso, entre otros materiales, ya que con el crecimiento del sector de la construcción en el país ha surgido la necesidad de desarrollar estrategias para su disposición final [61].

Este paradigma de producción y sustentabilidad está siendo implementado por empresas como Coca-Cola, Renault, H&M, en las cuales se han hecho cambios en sus productos y en la forma de generar la energía consumida en sus procesos, para poder adoptar este modelo.

El parque industrial Kalundborg en Dinamarca es una muestra de economía circular, se compone por una refinería de petróleo, central eléctrica, empresa de paneles, una farmacéutica, una planta de producción de ácido sulfúrico y los edificios del pueblo principalmente.

La central eléctrica proporciona vapor a la refinería y a la farmacéutica, el calor que se obtiene de los generadores se envía a las casas, invernaderos y granjas. La refinería por su parte entrega gas y agua para enfriamiento a la central eléctrica, el azufre producido se lleva a la planta de producción de este ácido. Por otro lado, la central eléctrica ASNAES entrega sulfato de calcio y la refinería STATOIL proporciona gas a la empresa de paneles GYPROC, la farmacéutica NOVODISK envía lodos biológicos a las granjas para ser utilizado como fertilizante, adicional a esto comparten aguas subterráneas, aguas superficiales, aguas residuales, como se puede observar a continuación:

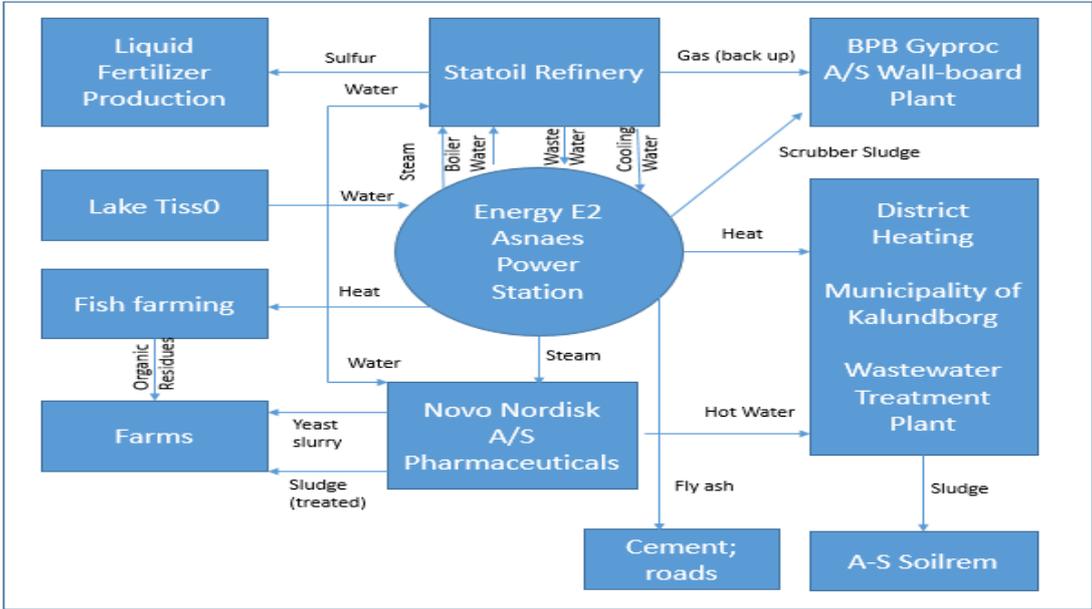


Figura 9. Parque Industrial Kalundborg [15].

En Kalundborg se han dado ahorros aproximadamente de 3 millones de metros cúbicos de agua, 20.000 toneladas de aceite, 80.000 toneladas de ceniza de carbón, y 200.000 toneladas de yeso estos datos corresponden al año 2007.

4.6. TRATAMIENTO TÉRMICO

El tratamiento térmico se utiliza para la destrucción de microorganismos tales como bacilo de tuberculosis (B.T), sin cambiar drásticamente las propiedades físicas y químicas del producto.

Kay y Graham a mediados de los años 30 dieron a conocer al mundo la enzima fosfatasa, la cual está presente en la leche cruda cuando se pasteuriza la leche esta enzima desaparece, se puede utilizar como indicador de la eficiencia del proceso térmico, el B.T es la bacteria más resistente presente en la leche, este puede ser destruido sometiendo el producto a condiciones controladas de temperatura a 65 °C por 30 minutos, este es referente en la leche ya que si el tratamiento térmico lo destruye, destruirá los demás microorganismos presentes.

En los tratamientos térmicos la combinación de tiempo y temperatura es muy importante ya que esto asegura la destrucción de las bacterias en el producto, en la siguiente tabla se observa la temperatura de destrucción según la bacteria.

Tiempo	Temperatura	Bacteria
1 s	70 °C	Bacteria Coli
	73 °C	Bacteria Tifus
	76 °C	Bacilo Tuberculosis
	90 °C	Micrococos

Tabla 2. Tiempo vs Temperatura Destrucción de Bacterias [16].

Las bacterias Coli cuando son sometidas a 70°C por 1 segundo son destruidas, pero si la temperatura es de 65°C se deberá mantener por 10 segundos, para conseguir el mismo resultado en los bacilos de la tuberculosis se debe mantener a 70°C por 20 segundos, y a 65°C por 2 minutos para garantizar su eliminación.

4.7.1. Clases de Tratamiento Térmico

- **Termización**

Este proceso de calentamiento consiste en llevar la leche hasta 63 a 65°C durante 15 segundos, con el fin de inhibir el crecimiento bacteriano, luego de este paso el producto se enfría de 2 a 4°C y se almacena para su procesamiento.

- **Pasteurización LTLT**

Es un método de pasteurización donde se calentaba el producto a 63°C en tanques abiertos durante 30 minutos, se conoce como método de baja temperatura.

- **Pasteurización HTST**

Es la combinación de tiempo y temperatura el cual varía según el tipo de producto, a continuación, se presentan las temperaturas de termización a las que se debe someter cada uno de los productos, donde la eliminación de la fosfatasa indica que está pasteurizado.

Para la leche el tratamiento térmico HTST se somete a temperatura de 72 a 85°C por un tiempo de 15 a 20 segundos, previamente al enfriamiento, bajo estas condiciones se destruye la enzima fosfatasa de esta forma se puede testear la efectividad del proceso, a continuación, se presenta el perfil de temperatura de la leche:

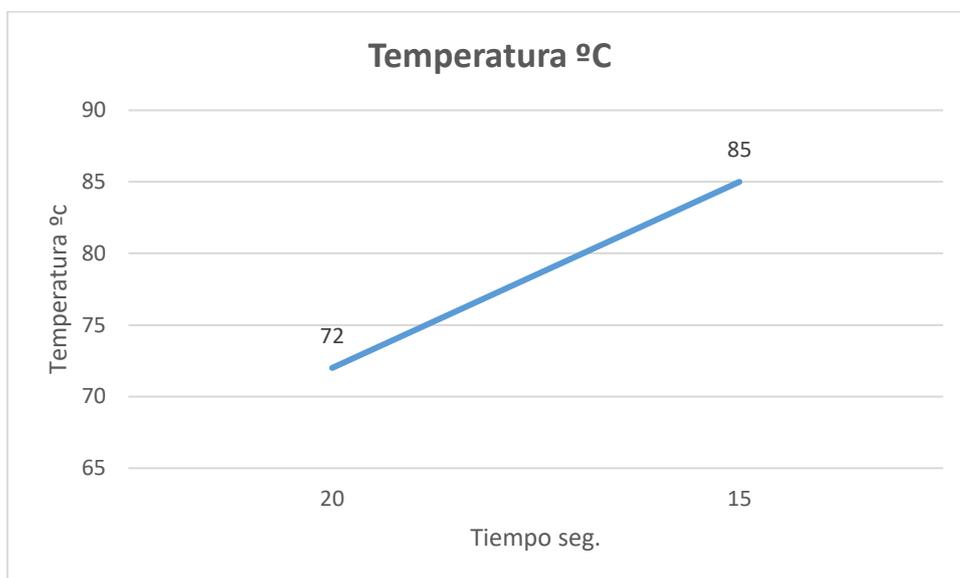


Figura 10. Perfil de Temperatura Leche en Tratamiento HTST.

Por otro lado la nata y productos fermentados se someten a una temperatura de 80°C durante 5 minutos, pero ya no se puede usar la prueba de fosfatasa para verificar el resultado, ya que en productos con un porcentaje superior a 8% esta

enzima tiende a aparecer de nuevo, por el contrario se usa la prueba de peroxidasa, esta prueba consiste en adicionar dos gotas de peróxido de hidrógeno, 5 ml de fenilendiamina al 1,4 en un tubo de ensayo con 5 ml de muestra de leche, si pasados 30 segundos se aprecia una coloración azul significa que hay presencia de peroxidasa lo que indica que no está bien procesado el producto.

En la figura 8 se presenta el perfil de temperatura de la nata y productos fermentados.

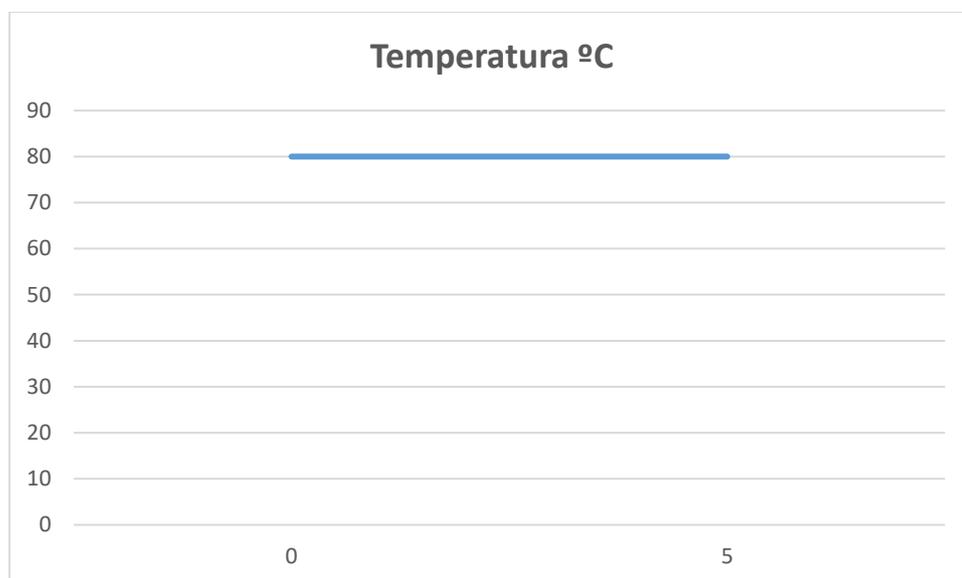


Figura 11. Perfil de Temperatura Nata en Tratamiento HTST.

- **Tratamiento a Temperaturas Ultra-Altas (UHT)**

Este proceso es apto para alimentos con un PH superior a 4,6, como puede ser leche, leches saborizadas, crema de leche, leche de soya, etc. A diferencia de los productos derivados de la leche aplica para la esterilización de alimentos preparados como postres, sopas, salsas y alimentos para bebe.

El objetivo de este tratamiento es aumentar la destrucción de microorganismos reduciendo las alteraciones químicas y físicas del producto en la medida de lo posible [17].

El método de pasteurización fue desarrollado por los franceses Louis Pasteur y Claud Bernard (1822-1895), el proceso de ultra alta temperatura consiste en llevar el producto a temperaturas entre 138 a 140 grados por al menos 2 segundos [18].

Cuando el producto es sometido a este ambiente se garantiza la eliminación de los microorganismos, este proceso es continuo hasta su envasado aséptico donde se garantiza la eliminación de riesgos de reinfeción. Existen dos métodos de UHT:

- Calentamiento indirecto y enfriamiento mediante un intercambiador de calor.
- Calentamiento directo donde el vapor se pone en contacto directamente con el producto y luego se enfría.

4.7. PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA INDUSTRIA

Los procesos de transferencia de calor más utilizado en la industria de alimentos son sin duda el calentamiento y enfriamiento, se utiliza vapor para generar calor, agua a temperatura ambiente y helada (0 a 4°C) para generar frío. La regeneración en estos equipos juega un papel muy importante ya que mediante la transferencia de calor aprovecha la temperatura del producto para calentar o enfriar el mismo en distintas etapas de la máquina.

Dentro de estos procesos se pueden encontrar los siguientes:

- **Regeneración**

La regeneración se utiliza en equipos de proceso donde es necesario calentar el producto para luego enfriarlo, por ejemplo la industria de la leche, donde la materia prima se calienta desde 4°C hasta 72°C (temperatura de pasteurización), para luego enfriarse hasta los 4°C, la regeneración consiste en utilizar el calor del producto que se encuentra a 72°C que va saliendo para calentar el producto que va ingresando al equipo, de esta forma se puede recuperar 94-95% del contenido calorífico del producto.

- **Calentamiento Directo**

Este método consiste en inyectar el medio de calentamiento directamente sobre el producto, se utiliza para calentar productos líquidos donde se introduce vapor en la misma línea del producto, este método tiene como ventaja principal una transferencia de energía rápida, pero tiene riesgo de introducir suciedad del vapor al producto.

- **Calentamiento Indirecto**

Este método es muy utilizado en la industria ya que el producto no entra en contacto con el fluido de calentamiento, el calor se transfiere por medio de una pared por donde circula agua caliente y por la otra circula el producto, a continuación, se observa la imagen del perfil de temperatura en el calentamiento indirecto.

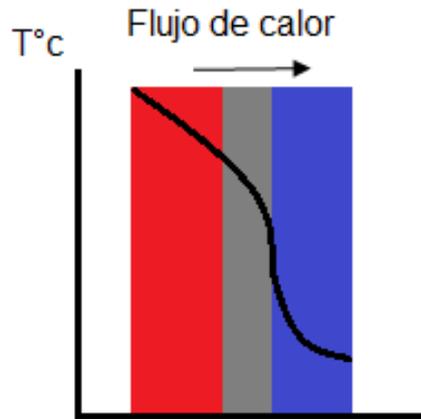


Figura 12. Calentamiento Indirecto [16].

En el calentamiento indirecto el principal equipo es el intercambiador de calor, su dimensionamiento se realiza con base a las siguientes variables.

Velocidad de flujo: Es el caudal de funcionamiento o de trabajo del equipo.

Propiedades físicas del fluido: La densidad y el calor específico depende del producto, el calor específico indica cuanta cantidad de energía debe suministrársele al fluido para incrementar 1°C.

Programa de temperatura: Es el calentamiento del fluido desde una temperatura de entrada hasta una deseada a la salida.

Con estos datos se calcula el área que debe tener el intercambiador de calor.

$$A = \frac{V * p * C_p * \Delta t}{\Delta t_m * K}$$

Ecuación 6. Intercambiado de Calor [16].

A = área de transferencia de calor

V = caudal de producto

P = densidad del producto

C_p = calor específico del producto

Δt = cambio de temperatura del producto

Δt_m = diferencia de temperatura media logarítmica

K = Coeficiente de transmisión de calor

4.8. PROCESO UHT

El proceso de UHT consiste en llevar el producto a una temperatura de 135 a 140 °C por un corto tiempo con el fin de eliminar microorganismos y así poder conservarlo por periodos entre 2 a 3 meses, luego de pasar por este tratamiento el producto se envasa en un recipiente esterilizado, donde se garanticen condiciones asépticas de conservación, los productos que se someten a este tratamiento son, leche líquida, natas, batidos, yogures, mantequillas, natillas, pudines, base de helado, una vez el producto termina esta etapa se debe almacenar en un empaque aséptico para garantizar la conservación del mismo.

El pionero en el Sistema de Procesamiento y Embazado Aséptico fue Louis Pasteur, pero hasta el año 1960 se llevó a la parte comercial la tecnología para procesar y envasar de forma aséptica, en la actualidad las plantas UHT son capaces de procesar bebidas y alimentos con alteraciones mínimas en su sabor, textura y componentes nutricionales gracias a los fuertes avances tecnológicos en este segmento.

Las plantas de procesamiento de productos UHT, son de diseño flexible para la producción a base de materias primas de baja acidez ($pH > 4.5$) como de alta acidez

(PH < 4.5). Estas plantas cuentan con un grado alto de automatización y se dividen pre-esterilización, producción, limpieza intermedia aséptica y CIP, para estas etapas se crean rutinas de control para garantizar que el operario no pueda saltarse una de las cuatro etapas, y así garantizar la calidad del producto final.

Durante los procesos UHT se desarrollan las siguientes etapas de limpieza y desinfección según la necesidad y lo establecido por las diferentes empresas productoras.

- **CIP**

Esta etapa de limpieza se realiza al final de cada ciclo de producción, y esta compuesta por los siguientes pasos pre-enjuague con agua, limpieza con soda cáustica, limpieza con agua caliente a 100 °C, limpieza con ácido nítrico, limpieza con agua para el enjuague final, estos pasos se controlan por medio de un PLC (controlador lógico programable), donde se tienen recetas configuradas para tiempos, flujos, concentraciones y temperaturas según las características fisicoquímicas del producto.

- **Pre-esterilización**

Esta etapa se realiza antes de iniciar la producción, se esterilizan las máquinas con el fin de evitar la reinfeción del equipo, este proceso se hace mediante agua a temperatura de ultrapasteurización y se mantiene por 30 minutos en el equipo, para su posterior enfriamiento.

- **Limpieza aséptica intermedia**

Este proceso de AIC (Aseptic Intermediate Cleaning) se utiliza cuando se lleva un tiempo de producción largo donde el equipo comienza a ensuciarse y es necesario lavar pero sin perder la condición aséptica, de esta forma se pueden alargar los tiempos de producción y se reducen los tiempos muertos.

4.9. TIPOS DE PLANTAS UHT

- **Planta UHT - tratamiento directo con inyección de vapor y con intercambiador de calor de placas**

El producto ingresa al sistema a una temperatura de 4°C, pasa por el tanque pulmón 1a el cual garantiza suministro a la bomba de alimentación 2, hasta la sección de precalentamiento del intercambiador de calor de placas 3, donde el producto alcanza una temperatura de 80°C, la presión del fluido aumenta mediante la bomba 4 hasta alcanzar 4 bar, es necesario incrementar la presión antes del siguiente paso de lo contrario el producto entraría a la fase de ebullición, el producto se desplaza hasta el inyector de vapor donde la temperatura aumenta hasta 140°C, a continuación el fluido pasa al tubo de retención 6 donde mantiene la misma temperatura por un tiempo determinado para luego ser enfriado rápidamente en la cámara de expansión 7, esta cámara cuenta con un condensador y una bomba 8 de vacío, el vacío se controla de tal forma que el vapor que se extrae al producto es el mismo que previamente se inyectó para su calentamiento, la bomba 9 envía el producto hasta el

homogeneizador 10, luego el producto se enfría a 20°C mediante un intercambiador de pacas 3, para luego pasar a la envasadora y terminar el ciclo de producción.

En la figura 10 a continuación se presenta el recorrido del producto por la planta:

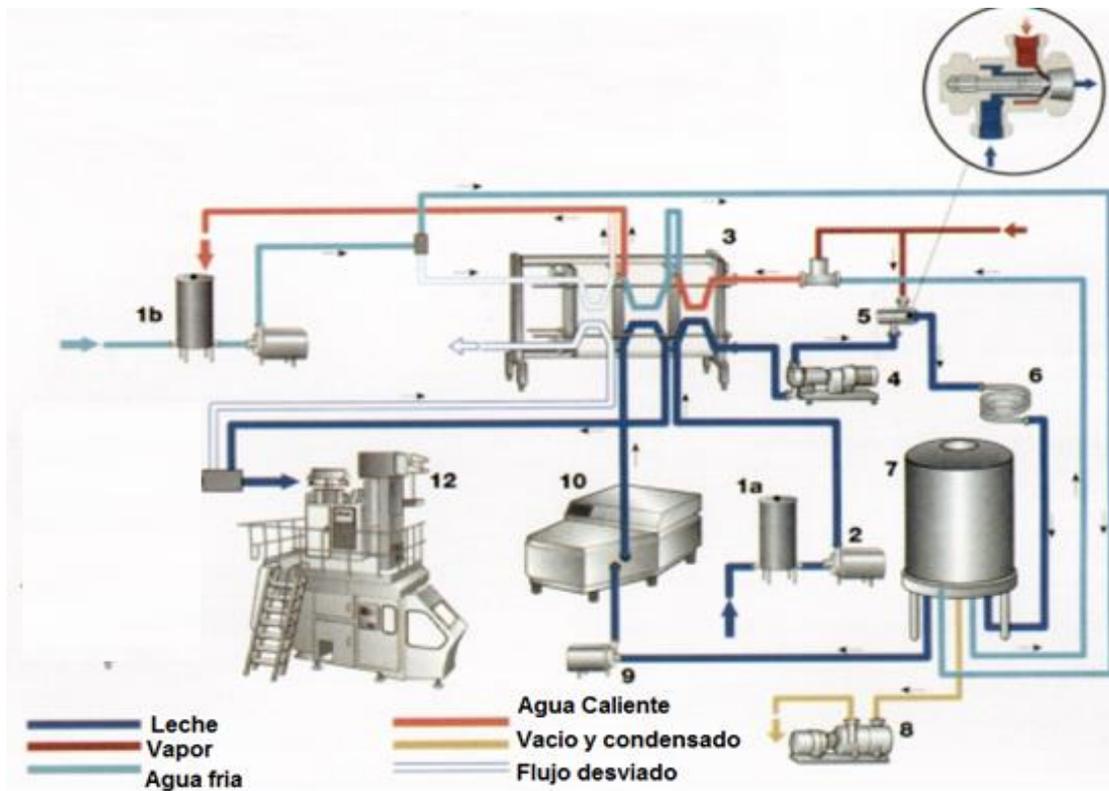


Figura 13. Planta UHT – Tratamiento directo con inyección de vapor y con intercambiador de placas [16].

- **Planta UHT - tratamiento indirecto con intercambiador de calor de placas**

Estas plantas son aptas para procesamiento de hasta 30000 litros/hora, a continuación, se presenta el recorrido del producto a través de la planta.

El producto ingresa a baja temperatura y se bombea desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque pulmón 1, luego mediante la bomba de alimentación 2 pasa el producto a la etapa de regeneración del intercambiador de calor 3 para que el producto se caliente hasta 75°C, el producto pasa al

homogeneizador donde a una presión de 180 a 250 bar se estandariza, entonces el producto sube hasta temperaturas UHT 135°C a 140°C, el medio de calentamiento es agua caliente en circuito cerrado don la temperatura se regula mediante la inyección de vapor 5, el producto se mantiene a esta temperatura por aproximadamente 4 segundos en el tubo de retención 6, la etapa de enfriamiento se hace mediante regeneración pasando inicialmente en el lado frio del agua de calentamiento y luego frente al producto frio entrante, finalmente pasa al embazado.

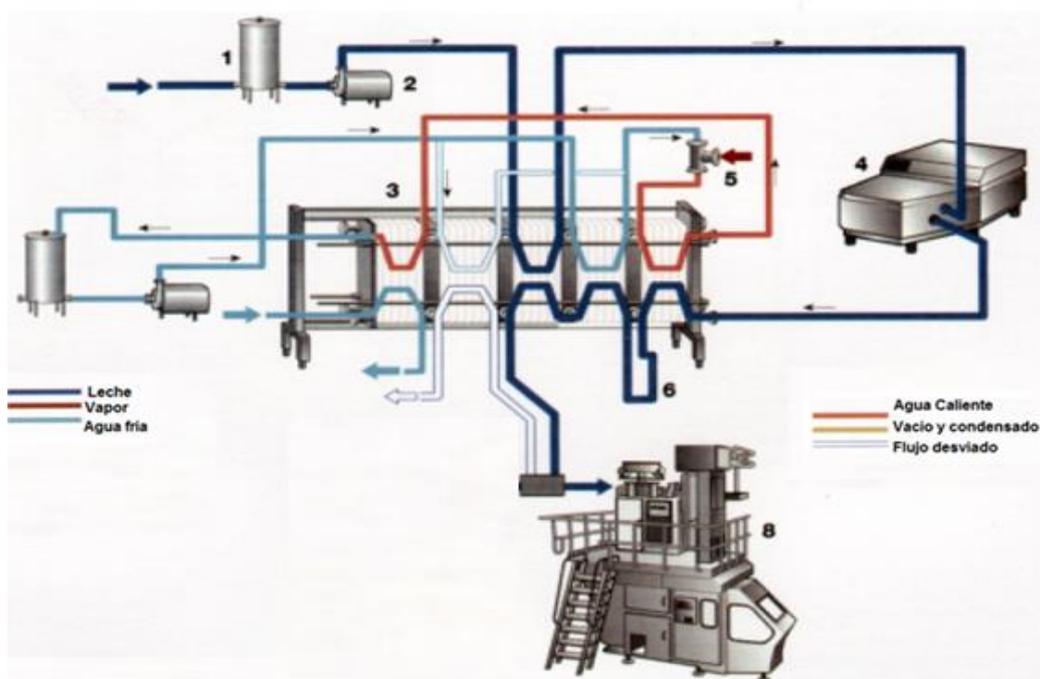


Figura 14. Planta UHT – Tratamiento indirecto con intercambiador de calor de placas [16].

- **Planta UHT – tratamiento directo con inyección de vapor e intercambiador tubular**

Las plantas con tratamiento directo con inyección de vapor e intercambiador tubular son ideales para productos de media o baja viscosidad con partículas o fibras o sin ellas. Luego del proceso de pre esterilización de la planta, la leche ingresa a 4°C al intercambiador de calos tubular (3), donde el producto adquiere una temperatura de

95°C en las secciones 3a y 3c, luego de pasar por la retención 4a, entonces el producto pasa a 3d hasta entrar a la válvula de inyección de vapor 5 donde el producto aumenta la temperatura hasta los 140°C a 150°C, la leche se mantiene a esta temperatura por el tiempo que tarda en pasar la retención 4b antes de ser enfriado, después del proceso de calentamiento el producto pasa a ser enfriado inicia en el intercambiador 3e donde la energía calorífica del producto se usa para el calentamiento regenerativo luego el vapor inyectado se evapora en la campana de vacío 6, para pasar al homogeneizador 8, el producto se enfría mediante la regeneración 3f hasta aproximadamente 20°C para ser envasado.

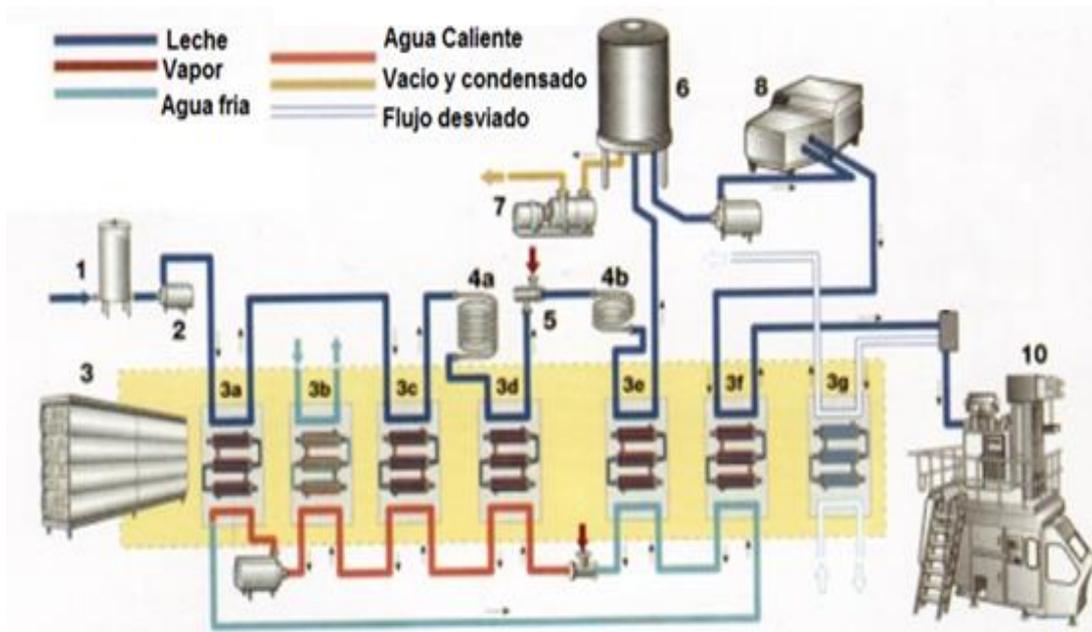


Figura 15. Planta UHT – Tratamiento directo con inyección de vapor e intercambiador tubular [16].



Figura 16. Planta UHT – Tetra VTIS [19].

5. MODELOS DE MANTENIMIENTO USADOS EN PLANTAS DE PRODUCCION DE BEBIDAS UHT Y SUS IMPACTOS

En este tipo de plantas de producción se utilizan las estrategias de mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo que se describen a continuación.

5.1. MANTENIMIENTO CORRECTIVO DE PLANTA UHT – TRATAMIENTO DIRECTO CON INYECCIÓN DE VAPOR E INTERCAMBIADOR TUBULAR

Los mantenimientos correctivos presentados en las plantas de Cundinamarca, Antioquia y Caloto están enmarcados principalmente por fallas eléctricas, esto debido a la calidad de la energía presente en las plantas, a continuación, se

presentan el tipo y cantidad de fallas que han requerido corrección desde enero a septiembre de 2020 en las tres plantas:

Cundinamarca	
Tipo de Correctivo	Cantidad
Eléctricos	11
Mecánicos	9
Instrumentación	7
Control	4

Tabla 3. Mantenimientos Correctivos - Planta Cundinamarca.

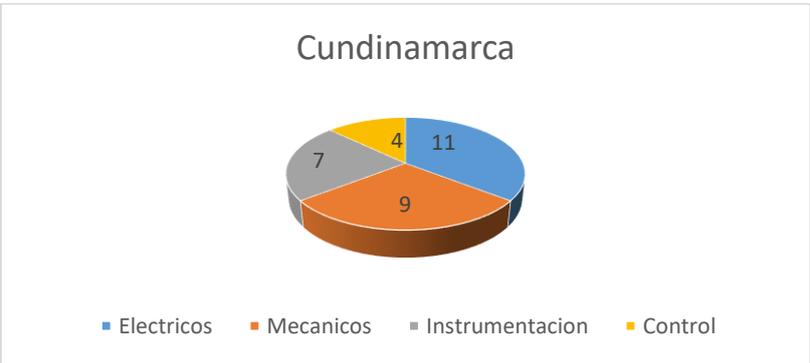


Figura 17. Mantenimientos Correctivos - Planta Cundinamarca.

Planta ubicada en Antioquia:

Antioquia	
Tipo de Correctivo	Cantidad
Eléctricos	9
Mecánicos	7
Instrumentación	3
Control	2

Tabla 4. Mantenimientos Correctivos - Planta Antioquia.

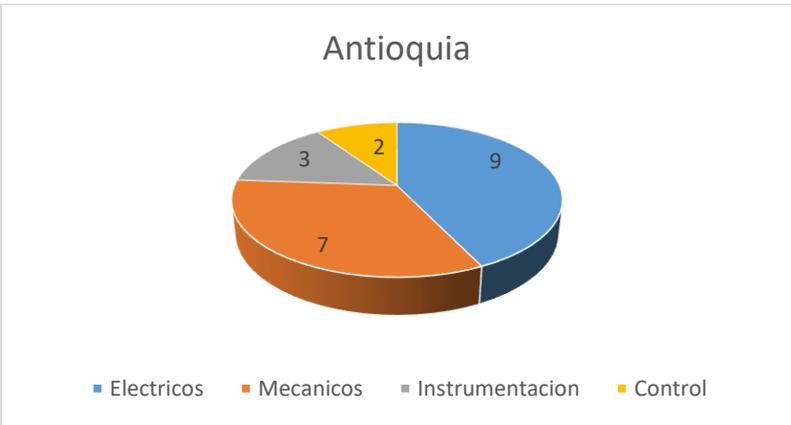


Figura 18. Mantenimientos Correctivos - Planta Antioquia.

Planta ubicada en Cauca:

Cauca	
Tipo de Correctivo	Cantidad
Eléctricos	13
Mecánicos	5
Instrumentación	5
Control	3

Tabla 5. Mantenimientos Correctivos - Planta Cauca.

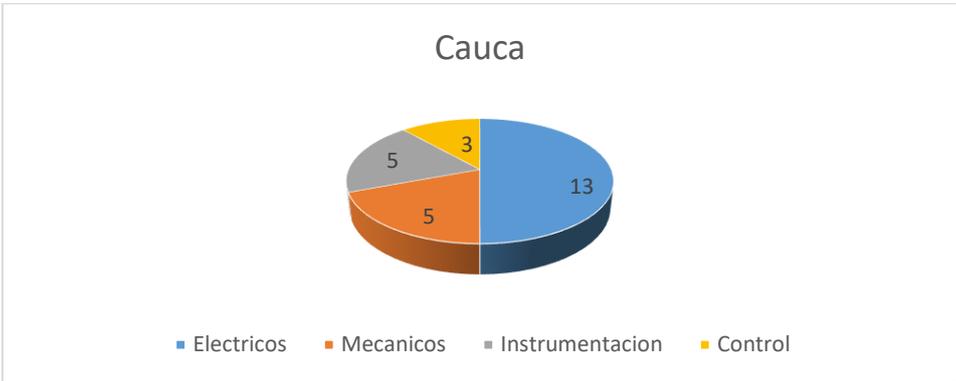


Figura 19. Mantenimientos Correctivos - Planta Cauca.

5.2. MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE PLANTA UHT – TRATAMIENTO DIRECTO CON INYECCIÓN DE VAPOR E INTERCAMBIADOR TUBULAR

Los mantenimientos preventivos de la planta UHT de tratamiento directo con inyección de vapor e intercambiador tubular se dividen en 3000, 6000, 18000 horas, a continuación, se presentan los repuestos de cambios en estos trabajos los cuales serán clasificados posteriormente según su material de fabricación.

Repuestos de cambio Homogeneizador mantenimiento preventivo

CANT	EQUIPO	TIPO	TAREA	HORAS	MATERIAL
1	SPARE PARTS				
3	CRANKCASE	Bellows M25	Cambio	3000	Caucho
3		Screw	Cambio	3000	Acero Inoxidable
3		SHIM 0.1	Cambio	3000	Acero Inoxidable
3		SHIM 0.2	Cambio	3000	Acero Inoxidable
3		SHIM 0.3	Cambio	3000	Acero Inoxidable
1	SPARE PARTS WETEND				
3		PISTON 45-CR - 9	Cambio	3000	Acero Inoxidable
3		SUPPORT RING 45 V-TYP US-3 - 10	Cambio	3000	Acero Inoxidable
3		PISTON SEAL 45-V - 11	Cambio	3000	Teflón / Corcho
3		PISTON SEAL 45 x 63 x 11 - 12	Cambio	3000	Caucho / Acero
3		COMPRESSION RING 45-V US-3A – 13	Cambio	3000	Bronce
6		GUIDE BAND 45 - 14	Cambio	3000	Teflón
6		O-RING 75 x 5 - 16	Cambio	3000	Caucho
3		O-RING 62 x 4 - 17	Cambio	3000	Caucho
6		SUPPORT RING 85 - 18	Cambio	3000	Caucho
3		SUPPORT RING 74 - 55	Cambio	3000	Teflón

6		VALVE SPRING 65 - 25	Cambio	3000	Acero Inoxidable
15		VALVE SEALING 55 x 65 x 8 - 27	Cambio	3000	Caucho
15		SUPPORT RING 65 - 58	Cambio	3000	Teflón
1	SPARE PARTS				
1	HOMOGENISING HEAD	O-RING 62.87 x 5.33 - 6	Cambio	3000	Caucho
4		GUIDE BAND 75 - 8	Cambio	3000	Teflón
2		SEALING RING 6 x 10 - 11	Cambio	3000	Bronce
2		Forcer shaft	Cambio	3000	Acero Inoxidable
2		Forcer disc 45/55 - 17	Cambio	3000	Acero Inoxidable
2		O-ring 40.87x3.53 Foodgrade - 43	Cambio	3000	Caucho
2		O-ring 16.3x2.4 Foodgrade	Cambio	3000	Caucho
2		Screw ARC/SMO/SRC - 10	Cambio	3000	Acero Inoxidable
2		SEAT 45/54 - 18	Cambio	3000	Acero Inoxidable
2		O-ring 24.99x3.53, EPDM ,ALEX 20 - 21	Cambio	3000	Caucho
5		O-ring 69.44x3.53 AL113 3030-70 EPDM - 22	Cambio	3000	Caucho
2		Support ring axial 3.53 x 32.2 - 24	Cambio	3000	Teflón
4		GUIDE BAND 32 - 26	Cambio	3000	Teflón
2		O-ring 31.34x3.53 AL113 3030-70 EPDM - 27	Cambio	3000	Caucho
3		SUPPORT RING RADIAL 3.53	Cambio	3000	Teflón

		x 79.8 - 28			
2		SUPPORT RING AXIAL 5.33 x 75 - 29	Cambio	3000	Teflón
1		O-ring 40.87x3.53 AL113 3030-70 EPDM - 43	Cambio	3000	Caucho
1		O-ring 25-5	Cambio	3000	Caucho
1		Support ring 35*23.8*3	Cambio	3000	Teflón
1	SPARE PARTS				
1	GEAR BOX TV111	Bearing NJ 312	Cambio	6000	Acero Inoxidable
2		Bearing 6026 SKF	Cambio	6000	Acero Inoxidable
1		Seal Ring	Cambio	6000	Acero / Caucho
3		V-Belt SPC 2650 MC	Cambio	6000	Caucho / Lona
2		Seal Ring	Cambio	6000	Acero / Caucho
1	SPARE PARTS				
1	CRANK CASE MAYOR	Sealing ring 18 x 22 Din 7603 - 23	Cambio	6000	Caucho
1		Gasket - 30	Cambio	6000	Corcho
3		seal 21x26x1.5 - 31	Cambio	6000	Acero
3		o-ring 119.3x5.7 - 32	Cambio	6000	Caucho
1		o-ring 205x4 - 33	Cambio	6000	Caucho
1		o-ring 312x4 - 34	Cambio	6000	Caucho
1		o-ring 105x4 - 35	Cambio	6000	Caucho
1		CIRCLIP 270 x 5 DIN 472 - 40	Cambio	6000	Acero / Caucho
1		CIRCLIP 215 x 5 DIN 472 - 41	Cambio	6000	Acero /

					Caucho
50		Aceite Mobil 600 w 220	Cambio	6000	
1	SPARE PARTS				
1	CRANK CASE MAYOR	Roller Bearing Right Alex 25 - 42	Cambio	18000	Acero
1		Roller Bearing Left Alex 25 - 43	Cambio	18000	Acero
1		Sealing Box 150x180x15 - 44	Cambio	18000	Acero / Caucho
3		Plain Bearing - 85	Cambio	18000	Aluminio
6		Lock Nut - 86	Cambio	18000	Acero
6		Screws M6 x 12 mm - 87	Revise	18000	Acero
3,75		Cambio de aceite Bomba hidráulica - DTOil 25	Cambio	18000	

Tabla 6. Partes de cambio en mantenimientos homogeneizador preventivos [20].

Repuestos de cambio Pasteurizador UHT mantenimiento preventivo

Cant	EQUIPO	TIPO	TAREA	HORAS	MATERIAL
1	Seat valve	YQ/T W38 AISI316L SS/SS Act.108 A/A Empty Giotto Top	Cambio	3000	
1		Anillo de sellado 157	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 156	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 47	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 57	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 55	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 226	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 14	Cambio	3000	Caucho PDEM
1	Seat valve	YQ/T W38 AISI316L	Cambio	3000	

		SS/SS Act.108 A/A			
		Empty Giotto Top			
1		Anillo de sellado 157	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 156	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 47	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 57	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 55	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 226	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 14	Cambio	3000	Caucho PDEM
1	Seat valve	YQ/T W38 AISI316L	Cambio		
		SS/SS Act.108 A/A		3000	
		Empty Giotto Top			
1		Anillo de sellado 157	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 156	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 47	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 57	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 55	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 226	Cambio	3000	Caucho PDEM
1		Anillo de sellado 14	Cambio	3000	Caucho PDEM
1	Butterfly valve	LKB-W-63.5-316L-EPDM-	Cambio		
		P85-NC		3000	
1		Arbusto 3	Cambio	3000	Teflón
1		Arbusto 4	Cambio	3000	Teflón
1		Anillo de Sellado 5	Cambio	3000	Teflón
1	Centrifugal pump	CRN8-40 W2" 1,5kW	Cambio		
		50Hz WC/WC EPDM		6000	
1		Oring	Cambio	6000	Caucho EPDM
1		Sellos	Cambio	6000	Carbón
1	Seat valve	SRC-W-38-20-200 EPDM	Cambio	6000	

		NC			
1		Tapón de la válvula 3	Cambio	6000	Acero / Caucho
1		Pasador 4	Cambio	6000	Acero Inoxidable
1		Empaquetadura 5	Cambio	6000	Acero Inoxidable
1	Seat valve	SRC-W-38-30-200 EPDM NC	Cambio	6000	
1		Tapón de la válvula 3	Cambio	6000	Acero / Caucho
1		Pasador 4	Cambio	6000	Acero Inoxidable
1		Empaquetadura 5	Cambio	6000	Acero Inoxidable
1	Centrifugal pump	CRN8-40 W2" 1,5kW 50Hz WC/WC EPDM	Cambio	18000	
1		Oring	Cambio	18000	Caucho – EPDM
1		Sellos	Cambio	18000	Acero Inoxidable / Carbón
1	Regulating valve	Samson 3347/3372 120cm2 WN1.4404 W38 SMS PN16 Kvs=16 SS/SS NO	Cambio	18000	Acero al carbón
1	Regulating valve	Samson 3321/3372 120cm2 GG DIN DN32 PN16 Kvs=16 SS/SS NC	Cambio	18000	Acero al carbón
1	Regulating valve	Camflex II 35-35202/78- 4G/4700P DN40 Kvs=26 NC	Cambio	18000	Acero al carbón
1	Seat valve	SRC-W-38-20-200 EPDM NC	Cambio	18000	
1		Tapón de la válvula 3	Cambio	18000	Acero / Caucho
1		Pasador 4	Cambio	18000	Acero Inoxidable
1		Empaquetadura 5	Cambio	18000	Acero Inoxidable
1	Seat valve	SRC-W-38-30-200 EPDM	Cambio	18000	

		NC			
1		Tapón de la válvula 3	Cambio	18000	Acero / Caucho
1		Pasador 4	Cambio	18000	Acero Inoxidable
1		Empaquetadura 5	Cambio	18000	Acero Inoxidable
1	Seat valve	SRC-W-38-20-200 EPDM NC	Cambio	18000	
1		Tapón de la válvula 3	Cambio	18000	Acero / Caucho
1		Pasador 4	Cambio	18000	Acero Inoxidable
1		Empaquetadura 5	Cambio	18000	Acero Inoxidable
1	Regulating valve	Samson 3347/3372 120cm2 WN1.4404 W38 SMS PN16 Kvs=16 SS/SS NO	Cambio	18000	
1		Diaphragm 1	Cambio	18000	Caucho
1		Seal 2	Cambio	18000	Acero inoxidable
1	Regulating valve	Buerkert 2632/F80-1067 W DN25 PN16 Kvs14.5 SS/PTFE NC	Cambio	18000	Acero inoxidable / Teflón
1	Regulating valve	Samson 3321/3372 120cm2 GG DIN DN32 PN16 Kvs=16 SS/SS NC	Cambio	18000	
1		PTFE-Ring-V-Packing 1	Cambio	18000	Polímero PTFE
1		Spring for Packing 2	Cambio	18000	Acero
1		Gasket 3	Cambio	18000	Teflón
1		Plug 4	Cambio	18000	Acero Inoxidable
1		Seat 5	Cambio	18000	Acero Inoxidable
1	Regulating valve	Samson 3321/3372 120cm2 GG DIN DN32 PN16 Kvs=16 SS/SS NC	Cambio	18000	

1		PTFE-Ring-V-Packing 1	Cambio	18000	Teflón / Caucho
1		Spring for Packing 2	Cambio	18000	Acero
1		Gasket 3	Cambio	18000	Caucho
1		Plug 4	Cambio	18000	Acero
1		Seat 5	Cambio	18000	Acero

Tabla 7. Partes de cambio en mantenimientos pasteurizador UHT preventivos [20].

Al desarrollar los cambios de repuestos mencionados en las tablas anteriores durante los mantenimientos preventivos, se generan residuos que deben tener un proceso de disposición teniendo en cuenta que no seguirán siendo utilizados en los equipos durante el proceso de producción.

- **Proceso actual de disposición final de residuos**

El proceso actual de disposición final de los residuos luego de los trabajos de mantenimiento consiste en la separación, clasificación y almacenamiento según material en una bodega dedicada para este fin, la imagen a continuación nos muestra cómo se almacenan:



Figura 20. Área para almacenamiento de Lubricantes usados.

En la imagen a continuación se observa cómo se almacenan los residuos del área de mantenimiento, estos se almacenan en contenedores.





Figura 21. Área para Almacenamiento de Chatarra

En la imagen a continuación se puede ver el área donde se almacena el cartón y el papel producido por mantenimiento y demás áreas de la planta.



Figura 22. Área para Almacenamiento de Cartón.

El siguiente paso lo ejecutan las empresas contratistas Reciclar S.A.S (cartón, papel y lámina) y lubricantes (Lubricar S.A.S). La empresa Reciclar S.A realiza el reciclaje de materiales de papel, cartón, chatarra y plástico, y Lubricantes S.A.S transporta los lubricantes hasta sus instalaciones para someterlos a un proceso de filtración y pruebas de caracterización de lubricantes y así conocer las nuevas propiedades, luego de este proceso para ser puestos en comercialización nuevamente.

5.3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE PLANTA UHT – TRATAMIENTO DIRECTO CON INYECCIÓN DE VAPOR E INTERCAMBIADOR TUBULAR

Como plan de trabajo predictivo se realiza un análisis de vibraciones en el equipo de ultra pasteurización con una frecuencia anual, el cual consiste en realizar medición en los motores principales del equipo con el fin de observar las condiciones de funcionamiento con base a los valores de vibraciones observados, y teniendo de referencia la siguiente tabla se determina el estado del equipo.

PICO In/seg	RMS mm/seg	Clase I Máquinas Pequeñas (< 20 Hp)	Clase II Máquinas Medianas (20<100 Hp)	Clase III Máquinas Grandes Soportes Rígidos (>100 Hp)	Clase IV Máquinas Grandes Soportes Flexibles (>100 Hp)
0,01	0,28		BUENO		
0,02	0,45				
0,03	0,71				
0,04	1,12		SATISFACTORIO		
0,07	1,80				
0,11	2,80		ALERTA		
0,18	4,50				
0,28	7,10		EMERGENCIA		
0,44	11,2				
0,70	18,0				
0,71	28,0				
1,10	45,0				

Tabla 8.Limites en Rango de Velocidad y Clases de Máquinas [57].

Según los datos obtenidos se clasifican en los siguientes tipos de condiciones:

Condición de Operación	Condición
Normal	El equipo está en un nivel adecuado de vibración
Observación	Se identifica una condición que al momento no genera preocupación
Alerta	Se aprecia una actividad de amplitud moderada
Emergencia	Se debe realizar una parada y atención inmediata del equipo

Tabla 9. Condiciones de Clasificación [57].

Los resultados obtenidos del análisis de vibraciones son los siguientes:

MÁQUINA	TAG	ESTATUS	DIAGNOSTICO	OBSERVACION
VTIS	MOTOR M6 Homogeneizador	ALERTA	Se observa importante vibración a una frecuencia de 3488 cpm en dirección vertical lado acople del motor con valores globales de hasta 10.06 mm/s rms, esta condición puede estar asociada a soltura de los pernos de anclaje de la base del motor o puede ser transmitida por la tubería.	Se recomienda revisar el sistema de anclaje del equipo y revisar sistema de tuberías y accesorios con el fin de determinar la condición actual del equipo continuar con el monitoreo según cronograma.

VTIS	MOTOR M9 Bomba de Lavado	ALERTA	Transmisión de vibración	Se observa importante vibración a una frecuencia de 675cpm. No se sabe que pueda originar este comportamiento; sin embargo en campo se evidenció que el sistema de tuberías presentaba elevada vibración que se transmitía al equipo. Se recomienda revisar la condición de operación del sistema de tuberías, tales como apertura de válvulas, accesorios, presiones de bombeo etc. hacer seguimiento para evaluar comportamiento.
VTIS	MOTOR M8 Bomba de producto	NORMAL		Niveles de vibración tolerables en todas las variables y direcciones con valores bajos.
VTIS	MOTOR M5 Bomba de campana de expansión	NORMAL		Niveles de vibración tolerables en todas las variables y direcciones con valores bajos y permisibles dentro de rangos, los cuales no generan alerta. Seguimiento de acuerdo al cronograma predictivo para establecer línea de tendencia histórica.

VTIS	MOTOR M4 Bomba de producto 1	NORMAL		Niveles de vibración tolerables en todas las variables y direcciones con valores, los cuales no generan alerta. Seguimiento de acuerdo al cronograma predictivo para establecer línea de tendencia histórica.
------	------------------------------------	--------	--	---

Tabla 10.Resultado Análisis de Vibraciones.

El motor del homogeneizador presenta vibraciones de 10.06 mm/s a 3488 ciclos por segundo en dirección vertical en la parte del acople del motor y considerando el homogeneizador una máquina clase III (>100 Hp) entra en una clasificación de alerta según la tabla.

La bomba M9 de lavado presenta vibración a 675cpm, estas pueden estar asociadas a las vibraciones de la tubería de producto, los demás equipos se encuentran en los rangos de frecuencias adecuados.

6. EVALUACIÓN DEL MODELO DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO FRENTE A LA APLICACIÓN DE ECONOMÍA CIRCULAR

Para desarrollar el análisis de los mantenimientos que se llevan a cabo en las plantas UHT y la aplicación o no de economía circular, es necesario revisar los

planes anuales y evidenciar las fallas en producción, los residuos post-mantenimiento y las estrategias predictivas aplicadas.

La planta UHT de tratamiento directo con inyección de vapor e intercambiador tubular, puede presentar fallas durante el tiempo de producción las cuales se presentan en la siguiente tabla con su respectiva descripción.

ALARMA	FALLO
Temperatura de esterilización	TT71 o TT42 indica una caída de temperatura durante la esterilización de la planta. El programa retrocede a
Temperatura de producción	Si TT 42 indica una caída de temperatura durante la producción, la producción se detendrá inmediatamente, el producto va al rechazo y se inicia la secuencia de p/arada.
Temperatura de CIP	Temperatura demasiado baja en el tubo de retención durante los pasos de circulación en CIP. El temporizador de CIP se para y continúa desde donde se paró una vez <u>desaparecida la alarma</u>
Fallo de nivel en el depósito de compensación	Si el nivel es bajo más 30 seg. La máquina pasará a parada total. Si el nivel bajo aparece durante producción, el programa pasa a vaciado.
Fallo de motor	Falta la realimentación de un motor. Si el fallo es causado por M2 o el homogeneizador M6, la planta se parará inmediatamente. Si el fallo es causado por M9 o bomba de <u>agua caliente M10, la válvula de vapor V44 se cierra.</u>
Cáustico	Falta la realimentación de un motor M12. Se ha excedido el tiempo para regulación, dosificación o circulación de <u>cáustico del colector de lote CIP o nivel alto en CIP.</u>
Ácido	Falta la realimentación de un motor M13. Se ha excedido el tiempo para regulación, dosificación o circulación de <u>ácido del colector de lote CIP o nivel alto CIP.</u>
Presión de agua	Presión en el circuito de agua caliente demasiado baja. La

	válvula V66 se abre.
Presión del agua de enfriamiento	Presión en el circuito de agua de enfriamiento demasiado baja PSL10
Presión de aire en el panel	Presión de aire de entrada demasiado baja.
Presión de vapor	Válvula de vapor abierta mucho más de un minuto.
Nivel de aceite en el homogeneizador	Nivel de aceite demasiado alto o bajo en el homogeneizador
Temperatura de aceite del homogeneizador	Temperatura de aceite demasiado alta en el homogeneizador.
Fallo de caudal	El caudal de producto se desvía de un límite prefijado del punto de referencia real
Falla de nivel en la vasija de vacío	Nivel demasiado alto o bajo en la vasija de vacío.
Enfriador de aire del armario	Fallo del enfriador de aire.
Fallo de batería del PLC	El voltaje de la batería interna de la CPU es bajo.
Fallo de conductividad	Conductividad demasiado alta o baja de ácido/cáustico durante CIP.
Temperatura baja TSL 46	Temperatura demasiado baja de la barrera de vapor V51.
Temperatura baja TSL 47	Temperatura demasiado baja de la barrera de vapor V47.

Tabla 11. Fallas La planta UHT de tratamiento directo con inyección de vapor e intercambiador tubular [21].

Al realizar los mantenimientos preventivos se generan diferentes residuos los cuales se clasifican según su material y se muestran en la siguiente tabla.

Clasificación de residuos post-mantenimiento preventivo según su material

MATERIA	UN	Lts
Acero	21	
Acero Inoxidable	48	
Acero / Caucho	11	
Aluminio	3	
Bronce	5	

Caucho	80	
Caucho / Acero	3	
Caucho / Lona	3	
Corcho	1	
Teflón	44	
Teflón / Corcho	3	
Teflón / Caucho	1	
Acero Inoxidable / Carbón	1	
Acero inoxidable / Teflón	1	
Carbón	1	
Polímero	1	
Aceite		53,78

Tabla 12. Clasificación de Materiales Post Mantenimiento [20].



Figura 23. Residuos - Post Mantenimiento [20].

Como se evidencia en la tabla y gráfica anterior los residuos que se generan en mayor proporción son el acero y acero inoxidable respectivamente, lo anterior puede estar relacionado al tipo de industria.

Clasificación de residuos Post-mantenimiento preventivo según su peligrosidad

PELIGROSO	NO PELIGROSO
52,0%	48,0%

Tabla 13. Porcentaje de Criticidad [18] [23].



Figura 24. Clasificación de Residuos.

Los residuos peligrosos son aquellos que están contaminados con grasas y lubricantes y deben tener un proceso agregado de limpieza para poder evaluar su reutilización. Como se evidencia en la gráfica anterior son los de mayor porcentaje, teniendo en cuenta que durante su funcionamiento y mantenimiento están en contacto con estos líquidos.

A parte de los residuos mencionados con anterioridad los mantenimientos de las máquinas de esterilización y homogeneización generan residuos de cartón, y plásticos provenientes de los empaques de los nuevos repuestos. La disposición de estos residuos se hace en contenedores donde se clasifican según su material de construcción y si están contaminados con algunas sustancias.

Los aceites utilizados en las máquinas se disponen en canecas de 55 galones para que un tercero los lleva a filtración y mediante pruebas de laboratorio se puede

determinar las nuevas condiciones de los lubricantes para una posible reutilización en otras máquinas.

Beneficios del mantenimiento frente al consumo de energía eléctrica

Mediante la ejecución del plan anual de mantenimiento predictivo aparece la necesidad de realizar ajustes en el sistema de anclaje del motor en el homogeneizador y separación de tubería y revisión de accesorios en el equipo M9 bomba de lavado, adicional se ejecuta el plan de mantenimiento preventivo de 6000 horas, mediante la recopilación de datos de medición de energía eléctrica que se presentan a continuación.

Fecha	KWH
01/01/2020	590,45
02/01/2020	595,5
03/01/2020	597,33
04/01/2020	603,01
05/01/2020	605,02
06/01/2020	602,05
07/01/2020	601,08
08/01/2020	602,18
09/01/2020	593,07
10/01/2020	602,96
11/01/2020	602,79
12/01/2020	601,64
13/01/2020	601,03
14/01/2020	601,35

15/01/2020	603,14
16/01/2020	608,99
17/01/2020	604,78
18/01/2020	604,04
19/01/2020	605,92
23/01/2020	580,01
24/01/2020	582,01
25/01/2020	581,06
26/01/2020	581,04
27/01/2020	581,02
28/01/2020	582,01
29/01/2020	581,01
30/01/2020	582,02
31/01/2020	581,08
01/02/2020	582,06
02/02/2020	581,03
03/02/2020	582,33
04/02/2020	582,38
05/02/2020	582,39
06/02/2020	582,32
07/02/2020	581,31
08/02/2020	581,31
09/02/2020	582,30
10/02/2020	583,32
11/02/2020	582,42
12/02/2020	582,91
13/02/2020	582,76
14/02/2020	581,23
15/02/2020	581,90

16/02/2020	581,80
17/02/2020	581,78
18/02/2020	582,39

Tabla 14. Consumo de Energía Eléctrica Antes y Después - Mantenimiento Preventivo 6000 Horas.

En la figura a continuación se observa el cambio en la tendencia de consumo de energía eléctrica, donde el punto de corte está en la fecha del 19 al 23 de febrero, cabe resaltar la importancia del cambio de las piezas móviles y el desarrollo de los mantenimientos predictivos a tiempo en las máquinas ya que con el desgaste de estas el consumo de energía eléctrica aumenta significativamente, en el caso de la máquina en estudio el aumento fue de 19,5%.

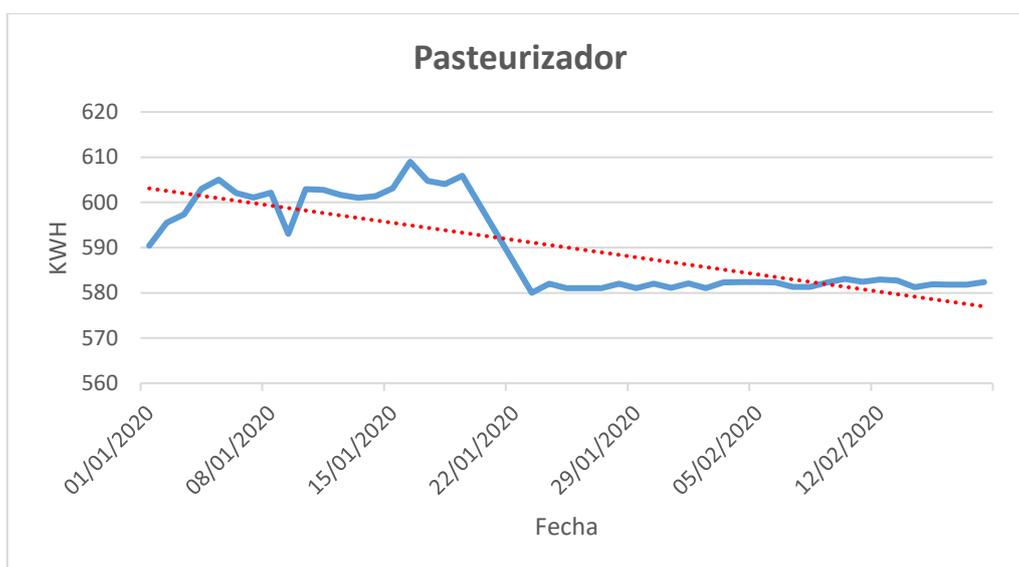


Figura 25. Consumos de Energía Eléctrica Antes y Después de trabajos de Mantenimiento.

La tabla a continuación muestra los consumos de energía eléctrica antes y después de realizar trabajos de mantenimiento preventivo de 6000 horas y correcciones del plan predictivo al homogeneizador del equipo VTIS:

Fecha	KWH
01/01/2020	720.3
02/01/2020	721.4
03/01/2020	721.8
04/01/2020	722.9
05/01/2020	722.7
06/01/2020	722.6
07/01/2020	722.8
08/01/2020	722.9
09/01/2020	722.9
10/01/2020	722.9
11/01/2020	722.9
12/01/2020	742.2
13/01/2020	742.2
14/01/2020	742.2
15/01/2020	742.2
16/01/2020	743.0
17/01/2020	743.0
18/01/2020	743.2
19/01/2020	743.2
23/01/2020	710.0
24/01/2020	710.4
25/01/2020	710.4
26/01/2020	710.4
27/01/2020	710.4
28/01/2020	710.4
29/01/2020	711.0
30/01/2020	711.0
31/01/2020	711.2

01/02/2020	711.2
02/02/2020	711.2
03/02/2020	712.3
04/02/2020	712.3
05/02/2020	712.3
06/02/2020	712.3
07/02/2020	712.3
08/02/2020	713.1
09/02/2020	713.1
10/02/2020	713.1
11/02/2020	713.1
12/02/2020	713.1
13/02/2020	713.1
14/02/2020	713.1
15/02/2020	713.1
16/02/2020	713.1
17/02/2020	713.1
18/02/2020	713.1

Tabla 15. Consumos de energía eléctrica antes y después de realizar el mantenimiento preventivo de 6000 horas.

En la siguiente figura se puede observar el cambio en la tendencia de consumo de energía eléctrica, el punto de corte está en la fecha del 19 al 23 de febrero, cabe resaltar la importancia del cambio de las piezas móviles a tiempo en las máquinas ya que con el desgaste de estas el consumo aumento para este caso en un 2,59%.

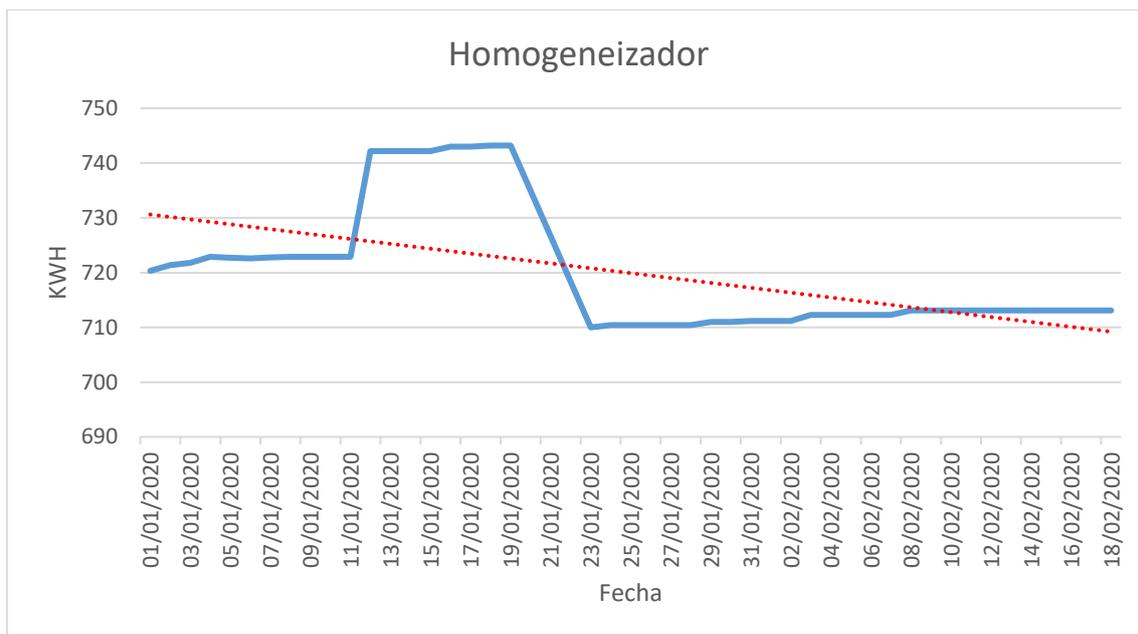


Figura 26. Consumos de Energía Eléctrica Antes y Después de trabajos de Mantenimiento.

Reutilización de repuestos

En la siguiente tabla se encuentran los repuestos que se han reutilizado en los mantenimientos preventivos de 3000 horas, estos repuestos han durado 3000 horas adicionales con lo que se evidencia que se puede obtener una mayor vida útil en las piezas de recambio y por ende beneficios económicos y ambientales.

REPUESTOS DE CAMBIO HOMOGENEIZADOR MANTENIMIENTO PREVENTIVO.					
UN	EQUIPO	TIPO	ACCIÓN	HORAS	MATERIAL
1	SPARE PARTS WETEND				
6		GUIDE BAND 45 - 14	Cambio	3000	Teflón
6		O-RING 75 x 5 – 16	Cambio	3000	Caucho
3		O-RING 62 x 4 – 17	Cambio	3000	Caucho
6		SUPPORT RING 85 - 18	Cambio	3000	Caucho

1	SPARE PARTS HOMOGENISING HEAD				
1		O-RING 62.87 x 5.33 - 6	Cambio	3000	Caucho
2		O-ring 40.87x3.53 Foodgrade - 43	Cambio	3000	Caucho
2		O-ring 16.3x2.4 Foodgrade	Cambio	3000	Caucho
2		O-ring 24.99x3.53, EPDM ,ALEX 20 – 21	Cambio	3000	Caucho
5		O-ring 69.44x3.53 AL113 3030- 70 EPDM – 22	Cambio	3000	Caucho
1		Support ring 35*23.8*3	Cambio	3000	Teflón

Tabla 16. Repuestos reutilizados [20].

En el modelo de mantenimiento preventivo y predictivo evaluado no se evidencia una aplicación importante del modelo de economía circular, teniendo en cuenta que la reutilización se presenta en pocos repuestos como se muestra en la tabla anterior y este proceso es desarrollado solo cuando los repuestos de cambio no llegan a tiempo.

Por otro lado, los residuos de los mantenimientos no son reutilizados por la empresa ya que no se cuenta con un proceso estandarizado para tal fin.

7. SISTEMA PROPUESTO: ECONOMÍA CIRCULAR APLICADA A MANTENIMIENTO

Este sistema permite la aplicación del modelo de economía circular en los procesos de mantenimiento y se centra en tres pilares, el primero busca alargar la vida útil de

los repuestos de cambio de los mantenimientos preventivos mediante el uso de tecnología de análisis de datos en tiempo real, el segundo la reutilización de partes y fluidos provenientes de los mantenimientos y el tercero propone indicadores de control, para equipos de tratamiento HTST.

7.1. PRIMER PILAR - VIDA ÚTIL DE LAS PARTES

Este pilar se centra en la medición en tiempo real y análisis de datos de las variables vibración, corriente eléctrica y temperatura. Inicialmente se realiza una caracterización de cada máquina con el fin de tener claro un punto de referencia, posterior a esto se inicia con el monitoreo en tiempo real de las variables, esto permite determinar el momento exacto para ejecutar el cambio de las partes, mediante la información captada por los transmisores de vibraciones, corriente eléctrica y temperatura que será procesada mediante un algoritmo de machine learning.

Machine Learning

El aprendizaje de maquina o machine learning combina estadística con algoritmos para obtener resultados descriptivos, predictivos y prescriptivos de manera automática, basándose en lo siguiente:

Un algoritmo aprende de la experiencia (E) con respecto a alguna tarea (T) y alguna medida de rendimiento (P), entonces su rendimiento en T medido por P, mejora con la experiencia.

Mediante los datos transmitidos por los instrumentos de medición de vibración, energía eléctrica y temperatura y con el criterio anterior se alimentará el algoritmo de supervisión de la planta de HTST.

Machine learning tiene tres clases de aprendizaje los cuales se adaptan según el tipo de datos para alimentar los algoritmos, el fin es a partir de un conjunto de datos provenientes de variables de entrada y salidas relacionadas para generar un modelo, para esto se utiliza la siguiente clasificación.

- Aprendizaje supervisado
- Aprendizaje no supervisado
- Aprendizaje por refuerzo problemas

Aprendizaje supervisado

El aprendizaje supervisado le proporciona al algoritmo o código las características o preguntas y las respuestas o etiquetas, con el fin de que se combinen y así poder hacer predicciones, se divide en regresión, mediante la regresión lineal y con datos basados en características y etiquetas se obtienen dígitos como resultado. En la clasificación el algoritmo clasifica los datos en diferentes grupos con base a patrones relacionando las características con las etiquetas.

Aprendizaje no supervisado

El aprendizaje no supervisado se enfoca en estructuras de datos ocultas en una base de datos, el algoritmo clasificará los datos por si solo sin tener registro de etiquetas o salidas. Se divide en clustering K-means, donde el algoritmo se ejecuta iterativamente para ubicar a cada coordenada o punto compuesto por la fila de los datos de entrada en un grupo K según sus características. Por otro lado, está la

técnica de dimensión reducida donde se combinan las entradas y permite suprimir variables con menor importancia, esto permite que el algoritmo se enfoque en las variables importantes.

Aprendizaje por Refuerzo de Problemas

El algoritmo mediante prueba y error establecerá las acciones a desarrollar, se delimitan puntos de evaluación llamados recompensas y penalidades para que este se evalúe y de esta manera se ira perfeccionando, con base a unas políticas establecidas previamente.

Computación en la Nube

El Cloud Computing o computación en la nube es el nuevo modelo y arquitectura de la informática en la web, es la evolución de un grupo de tecnologías que impacta directamente a las organizaciones en el performance de la infraestructura de IT.

El Sistema de Economía Circular aplicada a mantenimiento utiliza los servicios de esta tecnología para almacenar los datos de los transmisores y el procesamiento de estos mediante los servicios de machine learning, obteniendo beneficios de escalabilidad, performance, cero costos de mantenimiento y alta disponibilidad de la información.



7.2. SEGUNDO PILAR - INDICADORES DE CONTROL

Indicador de Corriente Eléctrica

$$\text{Intensidad Eléctrica} = \frac{\text{Intensidad Actual}}{\text{Intensidad Maxima Esperada}}$$

Ecuación 7. Intensidad eléctrica.

El indicador de corriente eléctrica es una propuesta que permite realizar un seguimiento detallado a los motores eléctricos de las máquinas, el punto de partida es la caracterización del consumo con el producto que se procesa, cuando se tienen datos por encima del máximo esperado indica que mecánicamente tengo desgastes o desbalanceo en rodamientos o ejes, esto contribuye a la economía circular en la reducción de consumo energético, prolongación de la vida útil de los repuestos.

Unidad de medida = Amperios

Intensidad Actual = Este dato se obtiene de los sensores de corriente eléctrica ubicados en los motores de interés.

Intensidad Máxima Esperada = Este dato se obtiene de la caracterización del motor eléctrico bajo unas condiciones de trabajo dadas, mediante los resultados de consumo de los sensores de corriente eléctrica.

Indicador de Vibraciones

$$\text{Vibraciones} = \frac{\text{Vibracion Actual}}{\text{Vibracion Maxima Permitida}}$$

Ecuación 8. Vibraciones.

El indicador de vibraciones permite monitorear los desgastes mecánicos en las partes giratorias de las máquinas, es ideal para hacer predicción en los rodamientos y los ejes de los equipos, para anticiparse a la falla, y contribuye con la economía circular con la prolongación de la vida útil de los repuestos mediante el monitoreo de las partes de interés del equipo. La unidad de medida es m/s² (metro / segundo cuadrado).

Vibración Actual = Este dato se obtiene de los transmisores de vibraciones ubicados en la máquina.

Vibración Máxima Permitida = Esta información se obtiene de la caracterización inicial de la máquina donde se determina el punto mínimo y máximo de vibración mediante la información de los instrumentos de medición.

Indicador de Temperatura

$$\text{Temperatura} = \frac{\text{Temperatura Actual}}{\text{Temperatura Maxima Permitida}}$$

Ecuación 9. Temperatura.

El indicador de temperatura permite monitorear el funcionamiento de los componentes electrónicos de los tableros de control de los equipos, es ideal para hacer predicción en los PLC (controlador lógico programable), para anticiparse a la falla, y contribuye con la economía circular con la prolongación de la vida útil de los repuestos mediante el monitoreo de las partes de interés del equipo. La unidad de medida es °C.

Temperatura Actual = Este dato se obtiene de los transmisores de temperatura ubicados en la máquina.

Temperatura Máxima Permitida = Esta información se obtiene de la caracterización inicial de la máquina donde se determina el punto mínimo y máximo de temperatura mediante la información de los instrumentos de medición.

Indicador de Residuos Reutilizados

$$\text{Residuos Reutilizados} = \frac{\text{Residuos Generados}}{\text{Residuos Reutilizados}}$$

Ecuación 10. Residuos reutilizados.

Este indicador permite monitorear la cantidad de residuos que se han reutilizado, clasificados por materiales, es un indicador propio del Sistema de Economía Circular aplicado a mantenimiento, la unidad de medida es en Kg (kilogramos). g

Residuos Generados = Se obtiene del proceso de pesar en una báscula los residuos generados luego del mantenimiento

Residuos Reutilizados = Se obtiene del proceso de pesar los residuos reciclados provenientes de los mantenimientos.

El modelo de economía circular se soporta en la aplicación de las nueve perspectivas que buscan pasar del modelo lineal a la circularidad, para el cumplimiento del tercer objetivo se propone inicialmente la siguiente matriz de Aplicación.

SISTEMA PLANTEADO	ECONOMÍA CIRCULAR 9R'S										BENEFICIOS
	Rechazar	Repensar	Reducir	Reutilizar	Reparar	Renovar	Remanufactura	Readaptar	Reciclar	Recuperar	
Primer pilar: Vida útil de las partes											<p>Disminuir la frecuencia de mantenimientos y por ende la cantidad de residuos que se generan, impactando de manera positiva el medio ambiente.</p> <p>Mantener la confiabilidad de los equipos teniendo en cuenta el monitoreo en tiempo real de las variables y las alarmas de fallas generadas por medio de Machine Learning.</p>
Transmisores de variables físicas, Computación en la nube y Machine Learning. Generaran alarmas durante la prolongación de la vida útil de los repuestos, permitiendo que este proceso sea seguro.				X	X						
Segundo pilar: Indicadores de control											
Los indicadores de corriente eléctrica, vibración y temperatura permiten llevar control sobre el estado del equipo, haciendo que la prolongación en horas de trabajo de partes de cambio sea seguro.				X	X						
Indicador de residuos reutilizados permite monitorear la efectividad del sistema de economía circular en tercer pilar.							X				
Tercer pilar: Manejo de residuos											<p>Impactar de manera positiva el medio ambiente procesando los residuos dentro de las actividades de la cadena planteada en el sistema.</p>
Reutilización directa				X							
Reparación					X	X					
Restauración									X		
Remanufactura							X				
Canibalización							X				
Reciclaje									X		
Incineración y relleno										X	

Tabla 17. 9R - Sistema de Economía Circular Aplicado a Mantenimiento.

7.3. TERCER PILAR - MANEJO DE RESIDUOS – ECONOMÍA CIRCULAR APLICADO A MANTENIMIENTO

El Sistema de Economía Circular aplicado a mantenimiento propone la recuperación de partes con base a una cadena de actividades para recuperación y gestión de residuos, donde se tienen opciones de recuperación como reparación, restauración, remanufactura, canibalización y reciclaje, para los residuos se plantea incineración o relleno. La figura a continuación muestra las etapas desde el inicio de un producto o servicio hasta que llega al usuario final y las actividades de reutilización o disposición final previamente mencionadas.

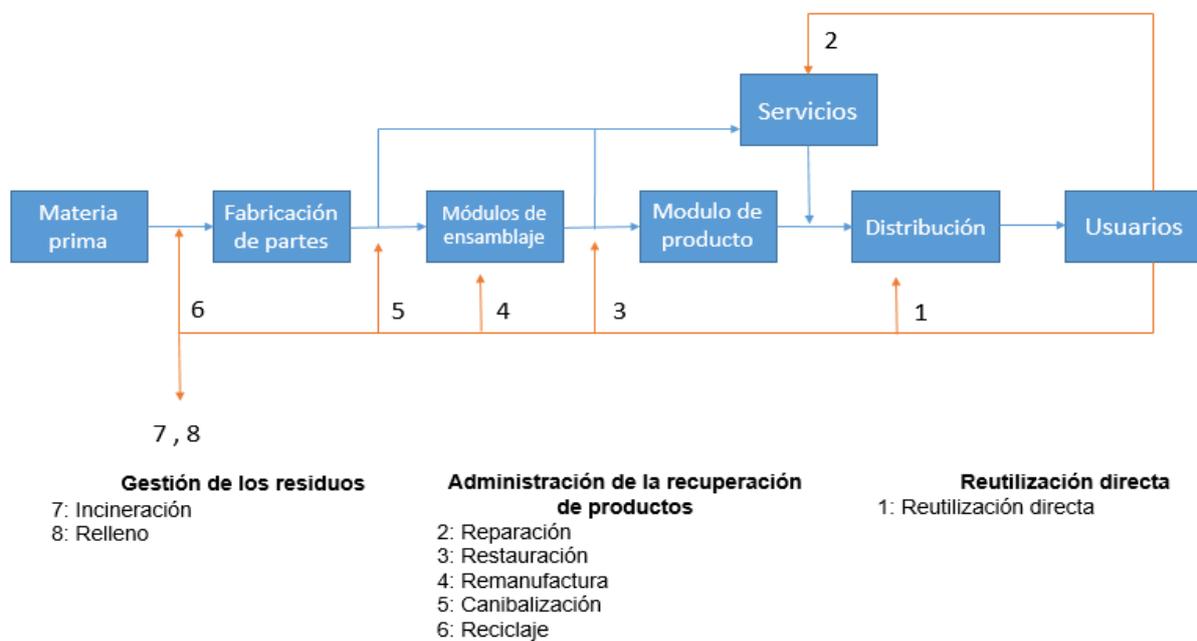


Figura 28. Cadena de Suministro Integrada [10]

Reutilización Directa

Una vez el usuario desecha el producto este pasa a la etapa de distribución nuevamente, como se ve en la figura a continuación:

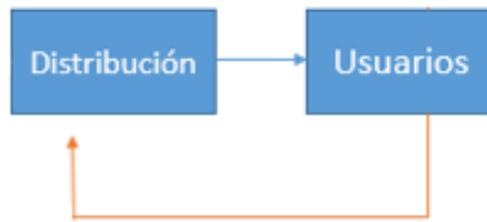


Figura 29. Cadena de Reutilización Directa.

Reparación

Como objetivo principal la reparación convierte las partes usadas a funcionales, teniendo en cuenta que la calidad de estos productos cambia con respecto a uno nuevo, en los trabajos de reparación se reemplazan o arreglan partes o piezas rotas, estas operaciones se pueden realizar en las instalaciones o en talleres especializados según sea la necesidad del trabajo.

En la cadena de reparación el producto pasa a reparación para posteriormente ser distribuido de nuevo, como se aprecia en la figura a continuación:



Figura 30. Cadena de Reparación.

Restauración

Los procesos de restauración transforman las partes usadas a partes con calidad especificada previamente, los estándares de calidad son menos rigurosos en comparación con las partes nuevas, todas las partes son inspeccionadas y clasificadas para reparación o reemplazo, en este paso se pueden sustituir piezas por elementos tecnológicamente superior con el fin de aportar mejores características a estas piezas.

En la cadena de restauración el producto desechado pasa a ser restaurado para luego formar parte de un módulo de producto y así ser distribuido y llegar al usuario final, en la imagen a continuación se puede apreciar:

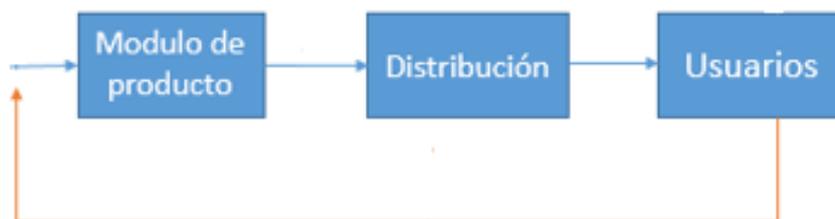


Figura 31. Cadena de Restauración.

Remanufacturación

El objetivo de la remanufacturación es transformar las partes usadas en partes con calidad igual a un repuesto nuevo, para esto es necesario desmontar toda la pieza para una inspección rigurosa, las piezas desgastadas se reemplazan por nuevas, las piezas reparables son sometidas a exigentes pruebas para garantizar su calidad luego ser ensambladas en el equipo o parte remanufacturada, esto lleva a que tenga un costo final mucho menor a que si fuera nueva.

En la cadena de restauración el producto desechado pasa a ser remanufacturado en el módulo de ensamblaje, luego al módulo de producto para llegar al usuario final mediante la distribución.

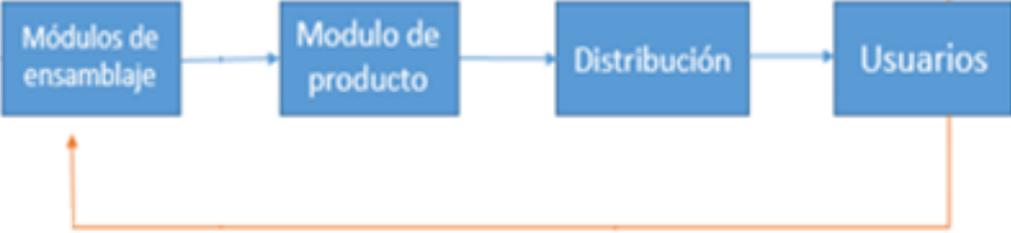


Figura 32. Cadena de Remanufactura.

Canibalización

La canibalización busca recuperar piezas reutilizables para ser utilizadas en la reparación, restauración o remanufactura de partes o equipo, realizando un desmontaje selectivo de productos usados y la inspección de piezas potencialmente reutilizables.

El producto desechado pasa a ser canibalizado con el fin de recuperar partes para ser utilizados en producto en reparación, restauración o Remanufactura, de esta manera seguiría la cadena a continuación:

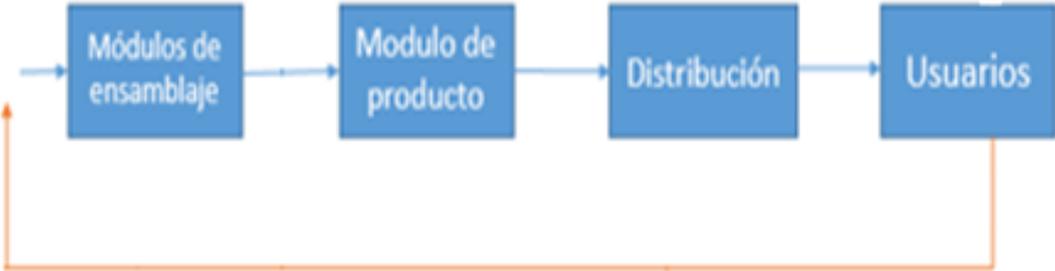


Figura 33. Cadena de Canibalización.

Reciclaje

El objetivo principal del reciclaje es reutilizar materiales de equipos o piezas usadas, estos materiales pueden reutilizarse en la fabricación de piezas originales siempre y cuando la calidad de los materiales sea alta, las piezas y partes de los equipos se desarmen y clasifican por su material.

El producto desechado pasa a ser reciclado donde su objetivo principal es utilizar sus materiales para hacer piezas nuevas y así iniciar la cadena nuevamente como se ve en la figura a continuación:

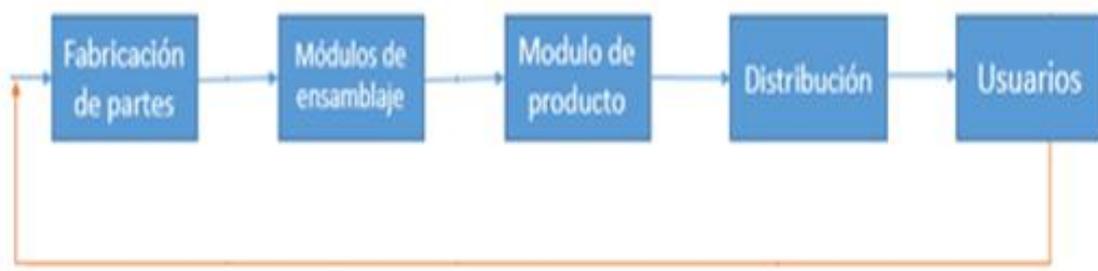


Figura 34. Cadena de Reciclaje.

Incineración y relleno

Cuando el producto no puede ser utilizado en ninguna etapa de la cadena de recuperación este se incinera o se utiliza para relleno.

Tabla de registro para materiales post mantenimiento

Esta tabla permite clasificar los materiales y llevar un registro en kilogramos luego de los mantenimientos de las máquinas, de esta manera se puede llevar un control de la aplicación del modelo vs los residuos.

ACERO INOXIDABLE kg	CARBÓN kg	ACERO kg	CAUCHO kg	TEFLÓN kg	BRONCE kg	ACEITE kg

Tabla 18.Registro de valores para residuos.

7.6. ANÁLISIS FINANCIERO

Para la implementación del Sistema de Economía Circular aplicado a mantenimiento en equipos de fabricación de productos UHT, pasteurizador y homogeneizador, se identificaron los siguientes costos y beneficios.

Presupuesto de Inversión

En la siguiente tabla se especifican las inversiones iniciales que debe asumir la compañía.

INVERSIÓN INICIAL				
CANTIDAD	ITEM	DESCRIPCION	COSTO	
4	Transmisor de energía eléctrica	El CVM-C10 es un analizador de redes para panel en 96x96 mm con registro de energías compacto y con medida en 4 cuadrantes (Consumo y Generación). Adecuado para instalaciones de Media y Baja Tensión, tanto en circuitos trifásicos a 3 o 4 hilos, 2 fases con o sin neutro, conexiones ARON o sistemas monofásicos.		\$ 10,000,000

		<p>Características de visualización e interfaz:</p> <p>Visualización rápida y simple usando un solo botón</p> <p>Teclado capacitivo de tres teclas</p> <p>Pantalla LCD retro-iluminada de alto contraste</p>		
4	Transmisor de vibración	<p>El Analizador de Vibraciones Wiser 3X es un acelerómetro triaxial inalámbrico que incluye las aplicaciones para dispositivos Móviles Wiser-Vibe y Wiser-Balance. Wiser 3X es la última generación de acelerómetros inalámbricos siendo capaz de enviar 4 canales simultáneos para X, Y y Z así como un canal de referencia o tacómetro. Adicionalmente de ser ultraportable, Wiser 3X incorpora funcionalidad de inicio y fin de captura desde el mismo botón de encendido para ahorrar tiempo invaluable en la toma de datos.</p> <p>Rango de Frecuencia: 1 Hz – 14 kHz</p> <p>Líneas de Resolución: 1,638,400</p> <p>Canales Simultáneos: 4</p> <p>Capacidad para balancear: Sí</p> <p>Compatibilidad con Dispositivos Móviles: Sí</p>		\$ 6,000,000

		Ruido: Ultra Bajo		
4	Transmisor de temperatura	El medidor de temperatura serie PCE-VDL está disponible en dos versiones. El medidor de temperatura PCE-VDL 16I mide y registra las magnitudes de temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, luz y aceleración a través de un sensor triaxial. La frecuencia máxima de muestreo es de 800 Hz para el sensor de aceleración, y para el resto de sensores la velocidad máxima de muestreo es de 1 Hz.		\$ 5,200,000
1	Instalación	Instalación para 12 transmisores con cableado y conexión hasta sistema de control		\$ 7,000,000
1	AWS - Machine Learning	Servicio de almacenamiento de datos y Machine Learning		\$ 8,000,000

1	Capacitación	Capacitación en manejo de la herramienta de análisis de datos		\$ 1,500,000
Total				\$ 37,700,000

Tabla 19. Presupuesto de Inversión Inicial.

El presupuesto de inversión inicial incluye la compra de los instrumentos de medición y servicios en la nube, necesarios para el funcionamiento del sistema y así tener un control de las máquinas mediante la medición y análisis frecuentes de los indicadores. Por ser un nuevo sistema se incluye dentro de la inversión la capacitación del personal asignado contemplando el uso adecuado de los instrumentos y el análisis de la información.

Presupuesto de ingresos operacionales

Mediante la integración de estos instrumentos, el almacenamiento de información y los algoritmos de Machine Learning, se tiene una visión integral de la máquina durante su funcionamiento, con lo cual se prolonga la vida útil de las piezas de cambio haciendo posible disminuir la frecuencia de los mantenimientos preventivos.

Actualmente los mantenimientos preventivos tienen los siguientes costos:

COSTO MANTENIMIENTO PREVENTIVO HOMOGENEIZADOR				
Horas	Piezas de Cambio	Mano de Obra	Total	Costo Mantenimiento/ hora de producción
3000	\$ 12,000,000	\$ 4,000,000	\$ 16,000,000	\$ 5,333
18000	\$ 20,000,000	\$ 8,000,000	\$ 28,000,000	\$ 9,333

Tabla 20. Costo Mantenimiento Homogeneizador.

COSTO MANTENIMIENTO PREVENTIVO PASTEURIZADOR				
Horas	Piezas de Cambio	Mano de Obra	Total	Costo Mantenimiento/ hora de producción
3000	\$ 15,000,000	\$ 4,000,000	\$ 19,000,000	\$ 6,333
6000	\$ 20,000,000	\$ 5,000,000	\$ 25,000,000	\$ 8,333
12000	\$ 25,000,000	\$ 6,500,000	\$ 31,500,000	\$ 10,500
18000	\$ 32,000,000	\$ 7,000,000	\$ 39,000,000	\$ 13,000

Tabla 21. Costo Mantenimiento Pasteurizador.

Con el control constante del funcionamiento de las máquinas se podrá disminuir la cantidad de mantenimientos según el estado de las piezas y así conseguir beneficios económicos para la compañía, lo anterior está directamente relacionado con la cantidad de horas de trabajo de la pieza en producción.

Teniendo en cuenta la investigación realizada durante este trabajo y los datos ilustrados en las tablas 16 y 17, con una prolongación del 20% en horas de producción para las piezas de cambio de los mantenimientos preventivos de 3000 y 6000 horas se traduce en un ahorro de \$16.999.200 millones aproximadamente en un año teniendo en cuenta la siguiente tabla.

Equipo	Mantenimiento preventivo en Horas	% Prolongación en Horas	Costo Mantenimiento/ Hora de Producción	Horas de Prolongación	Ahorros
Homogeneizador	3000	20%	\$ 5,333	600	\$ 3,199,800
Pasteurizador	6000	20%	\$ 8,333	1200	\$ 9,999,600
Pasteurizador	3000	20%	\$ 6,333	600	\$ 3,799,800
Total Ahorros					\$ 16,999,200

Tabla 22. Ahorros con prolongación de horas de producción en los repuestos.

Obteniendo un retorno de inversión a 2,2 años ($\$ 37,700,000 / \$ 16,999,200 = 2,2$).

8. CONCLUSIONES

El impacto ambiental y el aumento en los costos son las principales señales de la necesidad que tienen las plantas de productos de bebidas UHT, de implementar el modelo economía circular mediante metodologías que la contemplen dentro de los planes de mantenimiento.

Los modelos de mantenimiento en plantas de producción de bebidas UHT se basan en acciones preventivas, predictivas y correctivas, las cuales se deben desarrollar de manera periódica y tienen como fin mantener un nivel de disponibilidad alto en equipos y anticiparse a posibles fallas, mitigando los impactos ambientales y económicos. Las acciones correctivas también se encuentran enmarcadas en los modelos de mantenimiento principalmente por incumplimiento de las dos acciones mencionadas inicialmente.

Actualmente dentro de los modelos de mantenimiento no se evidencian metodologías propias de economía circular, sin embargo, se encuentran algunas prácticas de reciclaje de partes y lubricantes, las cuales son desarrolladas por empresas externas y no permiten un beneficio económico directo. Por lo anterior el Sistema de Economía Circular aplicado a mantenimiento propuesto en este trabajo, describe dentro de sus pilares (primer pilar - vida útil de las partes, segundo pilar - indicadores de control, tercer pilar - manejo de residuos – economía circular aplicado a mantenimiento) la reutilización de partes y fluidos provenientes de mantenimiento, por medio de la cadena de actividades para recuperación y gestión de residuos.

El sistema propuesto incluye como uno de sus pilares alargar la vida útil de las partes, por medio de diferentes estrategias y tecnologías (machine learning,

instrumentación y servicios en la nube) que permiten extender de una manera controlada y segura las horas de trabajo de las piezas de cambio de los equipos y con esto la frecuencia de los mantenimientos preventivos.

Los indicadores propuestos en el sistema son una herramienta que guía la frecuencia de las intervenciones preventivas que requieren los equipos, con el fin mantener su disponibilidad durante la producción, así como también permiten llevar control de los residuos generados durante los mantenimientos.

9. RECOMENDACIONES

Es importante que las plantas de productos de bebidas UHT, adopten modelos similares al Sistema de Economía Circular aplicado a mantenimiento planteado dentro de esta investigación, teniendo en cuenta la mitigación de impactos ambientales y la reducción de costos en los mantenimientos. Lo anterior está dado por el alargamiento de la vida útil de piezas de cambio y su reutilización en otras industrias o procesos.

Se recomienda que dentro de los planes de mantenimiento se prioricen las acciones predictivas con mediciones térmicas, eléctricas y de vibración, por la posibilidad que dan de anticiparse a las fallas y garantizar un continuo funcionamiento aumentando la disponibilidad de los equipos.

Se recomienda profundizar en trabajos de investigación que combinen economía circular y mantenimiento en plantas industriales, teniendo en cuenta sus diferentes beneficios y la escasa aplicación que se evidenció en las plantas de bebidas UHT durante el desarrollo de esta investigación.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F.J González Fernandez, Teoría y Práctica Del Mantenimiento Industrial Avanzado, 2da edición. Madrid España: Fundación Confemetal.
- [2] J. Moubray, Reliability-centered maintenance, 2da edition. New York: Industrial Press Inc., 2001.
- [3] J. Roberts, TPM: Total Productive Maintenance. History and Basic Implementation Process. Wiley Publishing, 2000.
- [4] S. G. Garrido, Organización y gestión integral de mantenimiento. Madrid España: Ediciones Diaz de santos, 2010.
- [5] M. Lefcovich, TPM mantenimiento productivo total: un paso más hacia la excelencia empresarial. El Cid Editor, 2009.
- [6] E. G. S. of Business, «Las 6 grandes pérdidas que busca eliminar el Mantenimiento Productivo Total». <http://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2016/05/las-6-grandes-perdidas-que-busca-eliminar-el-mantenimiento-productivo-total/> (accedido ago. 30, 2019).
- [7] Mantenimiento Planificado, «MANTENIMIENTO AUTÓNOMO», p. 7.
- [8] F. J. G. Fernández, Auditoría del mantenimiento e indicadores de gestión. FC editorial, 2004.
- [9] S. G. Garrido, «INDICADORES EN MANTENIMIENTO», Indicadores de Mantenimiento. <http://www.renovetec.com/590-mantenimiento-industrial/110-mantenimiento-industrial/300-indicadores-en-mantenimiento> (accedido jul. 31, 2019).

- [10] M. Thierry, M. Salomón, J. V. Nunen, y L. V. Wassenhove, «Strategic Issues in Product Recovery Management».
- [11] L. García, «Ingeniería del Mantenimiento», Ingeniería del Mantenimiento N 5. https://issuu.com/revista-tbn/docs/revista_tbn5 (accedido mar. 21, 2020).
- [12] J. G Barros Ochoa, J. R. Calderón Machuca, «Estudio del Impacto Ambiental Generado por un Taller de Mantenimiento Automotriz de Vehículos Livianos», Universidad del Azuay, 2012.
- [13] C. L. G. Caicedo, «Economía circular y su papel en el diseño e innovación sustentable», Libr. Editor. UNIMAR, 2016, [En línea]. Disponible en: <http://ojseditorialumariana.com/index.php/libroseditorialunimar/article/view/1154>.
- [14] C. H. Balboa y M. D. Somonte, «Economía circular como marco para el ecodiseño: el modelo ECO-3», Inf. Téc., vol. 78, n.º 1, pp. 82–90, 2014.
- [15] M. R. Chertow, W. S. Ashton, y J. C. Espinosa, «Industrial symbiosis in Puerto Rico: Environmentally related agglomeration economies», Reg. Stud., vol. 42, n.º 10, pp. 1299–1312, 2008.
- [16] Tetra Pak Processing System AB, Manual de Industrias Lacteas. Lud, Suecia, 1996.
- [17] «Tratamiento a temperaturas ultra-altas (UHT) para alimentos y productos lácteos». <https://www.tetrapak.com/co/processing/uht-treatment> (accedido sep. 06, 2019).
- [18] Inicio - La Anunciata Ikerketa, «Pasteurizacion». <http://www.laanunciataikerketa.com/trabajos/yogur/pasteurizacion.pdf> (accedido sep. 06, 2019).

- [19] «Tetra Therm Aseptic VTIS, procesado directo a altas temperaturas».
<https://www.tetrapak.com/co/processing/uht-treatment/tetra-therm-aseptic-vtis>
(accedido oct. 15, 2019).
- [20] Tetra Pak Processing System AB, «Tetra Therm Aseptic VTIS, Materials without Preventive maintenance recommendations.» .
- [21] Tetra Pak Processing System AB, «Manual de funcionamiento Tetra Therm® Aseptic VTIS».
- [22] L. J. Aguilar, «COMPUTACIÓN EN LA NUBE: Notas para una estrategia española en cloud computing», Revista del Instituto Español de Estudios Estratégicos, n.º 00, 2012, Accedido: ene. 30, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://revista.ieee.es/article/view/406>.
- [23] A. R. Alamo y A. F. Oquendo, «LA GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL EN LA INDUSTRIA LÁCTEA», Tecnología Química, vol. 27, n.º 2, pp. 48–54, 2007.
- [24] L. J. Amendola, «` Cómo lograr la gestión optimizada de los activos físicos? Norma PAS 55 ISO 55000, para la gestión optimizada de activos físicos.(Presente-Futuro) Mantenimiento o Gestión de Activos Físicos.», PMM Project, vol. 26, n.º 26, pp. 18–32, 2013.
- [25] C. Arce Serrano, J. Castro Vásquez, y G. Márquez Alvarado, «Impacto del plan piloto TPM en la satisfacción laboral de los trabajadores de la planta UHT de Derivados Lácteos», 2016.
- [26] D. A. Avendaño Olaya, «Estudio Para El Mejoramiento De Homogenizadores Y Aplicabilidad En Clientes Tetra Pak Colombia».
- [27] M. Barcia y H. Enrique, «Redistribución en la línea de leche chocolatada en Industrias Lácteas Toni SA», PhD Thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de ..., 2014.

- [28] A. I. Basco, G. Beliz, D. Coatz, y P. Garnero, *Industria 4.0: fabricando el futuro*, vol. 647. Inter-American Development Bank, 2018.
- [29] M. F. Cabanas, *Técnicas para el mantenimiento diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. marcombo, 1998.
- [30] E. O. N. Chusin y E. Orlando, «Mantenimiento industrial», Macas-Ecuador, marzo de, 2008.
- [31] F. J. G. Fernández, *Auditoría del mantenimiento e indicadores de gestión*. FC editorial, 2004.
- [32] A. M. Gaibor Fuentes y K. I. Quinga Collaguazo, «Desarrollo de un programa de mantenimiento para la Empresa Pasteurizadora El Ranchito compañía limitada», B.S. thesis, QUITO/EPN/2009, 2009.
- [33] F. T. García Sánchez, «Implementación de un sistema de análisis de riesgos y control de puntos críticos (haccp) sucedáneo en el proceso de elaboración de leche entera UHT TETRA BRIK en la industria Láctea Parmalat Ecuador SA», B.S. thesis, 2012.
- [34] S. G. Garrido, *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Ediciones Diaz de santos, 2010.
- [35] D. H. M. Grajales, Y. O. Sánchez, y M. Pinzón, «La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento», *Scientia et technica*, vol. 1, n.o 30, 2006.
- [36] M. Guerrero Cano, A. Luque Sendra, J. R. Lama Ruiz, y A. Córdoba Roldán, «Mantenimiento predictivo mediante técnicas de machine learning», *Predictive maintenance using machine learning techniques*, 2019, Accedido: ene. 21, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/2293>.

- [37] Á. H. Jemio Mena y L. Chaves Ríos, «Optimización del proceso de ultra pasteurización de la compañía de alimentos Ltda, Delizia», PhD Thesis, 2012.
- [38] J. Moubray, Reliability-centered maintenance. Industrial Press Inc., 2001.
- [39] J. Moubray, «Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)», Asheville, North Carolina USA: Aladon LLC, 2004.
- [40] A. J. Sánchez Egea y L. N. López de la Calle, «Máquinas, procesos, personas y datos, las claves para la revolución 4.0», Dyna ingeniería e industria, vol. 93, n.o 6, pp. 576–577, 2018.
- [41] L. Tavares, «Auditorías de mantenimiento», Revista Mantenimiento. San José, 2001.
- [42] Y. Verdecia Fusté, «Aplicación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC) a equipos del Combinado Lácteo de Morón, Ciego de Ávila.», PhD Thesis, Universidad Central" Marta Abreu' de Las Villas, 2010.
- [43] C. H. Balboa y M. D. Somonte, «Economía circular como marco para el ecodiseño: el modelo ECO-3», Informador técnico, vol. 78, n.o 1, pp. 82–90, 2014.
- [44] C. L. G. Caicedo, «Economía circular y su papel en el diseño e innovación sustentable», Libros Editorial UNIMAR, 2016, [En línea]. Disponible en: <http://ojseditorialumariana.com/index.php/libroseditorialunimar/article/view/1154>
- [45] H. Carvalho, S. G. Azevedo, y V. Cruz-Machado, «Supply chain performance management: lean and green paradigms», International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling, vol. 2, n.o 3-4, pp. 304–333, 2010.
- [46] G. Cervantes Torre-Marín, «Ecología industrial: innovación y desarrollo sostenible en sistemas industriales», Revista Internacional de sostenibilidad, tecnología y humanismo, n.º 6, pp. 58–78, 2011.

- [47] «Circutor», serie «CVM-C10» [En línea]. Disponible en: <http://circutor.es/es/productos/medida-y-control/analizadores-de-redes-fijos/analizadores-de-redes/serie-cvm-c10-detail>.
- [48] «Wiser 3X», [En línea]. Disponible en: <https://www.erbessd-instruments.com/es/articulos/el-mejor-analizador-de-vibraciones/>.
- [49] R. Hernández Sampieri, Metodología de la Investigación, 6ta edición. Mc Graw Hill Education.
- [50] A. Ruiz Acevedo, Modelos para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo, [En línea]. Disponible en: <http://oilproduction.net/produccion/procesos-de-produccion/mantenimientoyconfiabilidad/item/3648-modelo-para-la-implementacion-de-mantenimiento-predictivo-en-las-facilidades-de-produccion-de-petroleo>.
- [51] ACIEM Asociación Colombiana de Ingenieros, Capitulo Cundinamarca, Glosario Términos de Mantenimiento, rev 2018.
- [52] L. Tensio, «Gestión de mantenimiento en la industria farmacéutica bajo la filosofía de Lean Maintenance y la industria 4.0», Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [53] L. Amendola, Indicadores de confiabilidad propulsores en la gestión del mantenimiento, Universidad politécnica Valencia España.
- [54] E. MacArthur, Hacia una economía circular, Ellen MacArthur Foundation, 2015.
- [55] Gobierno de la Republica de Colombia, 2019. Estrategia nacional de economía circular. Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio. Bogotá D.C., Colombia. Presidencia de la

República; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.

- [56] L. Jiménez, E. Pérez Economía Circular-Espiral Transición hacia un metabolismo económico cerrado, 2019, [En línea]. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=5RvJDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA21&dq=BASES+DE+LA+ECONOMÍA+CIRCULAR&ots=DncWV_Tr2Z&sig=hvdUvg5btCEU68cLTOXZEE2Lp0#v=onepage&q&f=false.
- [57] ISO Límites en rango de velocidad y clases de máquinas, ISO10816-3:1998.
- [58] E. Fernández, Gestión de Mantenimiento: Lean Maintenance y TPM, [En línea]. <http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/47868/1/Gesti%C3%B3n%20de%20Mantenimiento.%20Lean%20Maintenance%20y%20TPM.pdf>.
- [59] A. Olaya, ESTUDIO PARA EL MEJORAMIENTO DE HOMOGENIZADORES Y APLICABILIDAD EN CLIENTES TETRA PAK COLOMBIA [En línea]. <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4798/1/Avenda%C3%B1oOlayaDavidAlberto2016.pdf>
- [60] X. Marcet, M Marcet F Vergés «Qué es la economía circular y por qué es importante para el territorio», Asociación Pacto Industrial de la Región Metropolitana de Barcelona, numero 4.
- [61] Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, Ministerios de Comercio Industria y Turismo «Estrategia Nacional de Economía Circular ».

