DISEÑO DE UN PLAN DE MEJORA DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPOS CRÍTICOS DE FÁBRICA BASADO EN LA FILOSOFÍA TPM APLICANDO HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN EN UN INGENIO AZUCARERO

KELLY ESTEFANY BUENO JARAMILLO

JUAN JOSÉ ROJAS REYES

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero industrial

Director
M. Sc. MAURICIO ALEJANDRO BUITRAGO SOTO
Docente de Ingeniería Industrial Universidad del Valle

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL - VALLE DEL CAUCA
2014

CONTENIDO

RESUMEN 9
INTRODUCCIÓN 10
1. JUSTIFICACIÓN 11
2. OBJETIVOS 13
2.1. GENERAL 13
2.2. ESPECIFICOS 13
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 14
3.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES 14
3.2. HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES 18
3.2.1. Proceso Jerárquico Analítico (AHP) 18
3.2.2. Matriz de mantenimiento clase mundial 20
3.2.3. Análisis de criticidad 23
3.3. FILOSOFÍA DE MANTENIMIENTO Y MEJORA CONTINUA 23
3.3.1. Mantenimiento Productivo Total - TPM 23
3.4. SIMULACIÓN DE PROCESOS PRODUCTIVOS 28
3.4.1. Conceptos de modelamiento 29
3.5. ANALISIS COSTO BENEFICIO 36
4. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE GESTIÓN ACTUAL DE MANTENIMIENTO 37
4.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA 37
4.1.1. Reseña histórica 37
4.1.2. Marco estratégico 38
4.1.3. Portafolio de productos 38
4.1.4. Certificaciones 39
4.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR 39
4.3. MODELO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO EN LA EMPRESA 42
4.3.1. Estructura 42
4.3.2. Actividades de mantenimiento 43

4.3.3. Tecnología de información 47
4.4. EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO DE LA EMPRESA 47
4.4.1. Encuestas 49
4.4.2. Entrevistas 51
4.4.3. Análisis documental y evidencias 55
4.4.4. Consolidado de diagnóstico de la gestión de mantenimiento 56
4.4.5. Análisis de criticidad de equipos 59
5. PLAN DE MEJORA DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPOS CRÍTICOS 65
5.1. FACTORES CLAVES PARA LA MEJORA DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO ... 65
5.2. METODOLOGÍA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPOS CRÍTICOS 65
5.2.1. Decisión de la metodología de gestión de mantenimiento 65
5.2.2. Benchmarking de sistemas de gestión de mantenimiento 66
5.3. PLAN ESTRATÉGICO DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO DE FÁBRICA 68
5.3.1. Metodología de implementación del mantenimiento planeado 74
5.3.2. Metodología de implementación del mantenimiento autónomo 82
6. MODELO DE SIMULACIÓN 88
6.1. PROPÓSITO DE LA SIMULACIÓN 88
6.2. MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA PRODUCTIVO 88
6.3. SUPUESTOS DEL MODELO 91
6.4. DATOS ESTADÍSTICOS DE ENTRADA AL MODELO 92
6.4.1. Datos estadísticos 93
6.5. VALIDACIÓN DEL MODELO 94
6.6. DISEÑO DEL EXPERIMENTO 96
6.7. RESULTADOS 98
7. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DEL PLAN DE MEJORA PROPUESTO 106
7.1. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO 106
CONCLUSIONES 110
RECOMENDACIONES 113
BIBLIOGRAFÍA 114

ANEXOS 117
Anexo 1. Formato de encuestas de la gestión de mantenimiento 117
Anexo 2. Listado de preguntas de entrevistas de la gestión de mantenimiento 121
Anexo 3. Benchmarking TPM 129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento de una variable de estado de tipo continúo 29
Figura 2. Evolución de una variable de un sistema discreto 30
Figura 3. Comportamiento de una variable de estado de tipos discreto 30
Figura 4. Portafolio de productos de la empresa. 38
Figura 5. Certificaciones de la empresa 39
Figura 6. Diagrama de proceso de producción de preparación y molienda de caña 41
Figura 7. Estructura de la unidad de mantenimiento de fábrica 43
Figura 8. Preparación del mantenimiento preventivo y predictivo..... 44
Figura 9. Preparación del mantenimiento correctivo..... 45
Figura 10. Ejecución del mantenimiento de fábrica 46
Figura 11. Ponderación total de las áreas evaluadas 52
Figura 12. Diagrama diagnóstico del sistema de gestión de mantenimiento –WCM 57
Figura 13. Mapa estratégico del ingenio objeto de estudio 68
Figura 14. Procesos fundamentales (pilares) TPM 71
Figura 15. Estructura organizacional de la empresa con TPM 72
Figura 16. La dinámica organizacional del TPM..... 73
Figura 17. Etapas en la implementación del mantenimiento planeado..... 74
Figura 18. Etapas en la implementación del mantenimiento autónomo 82
Figura 19. Diagrama de flujo de patios y molinos de caña 89
Figura 20. Modelo de fallas por equipos 90
Figura 21. Diagrama de flujo de entidades 90
Figura 22. Representación parcial de bloques de SIMAN – Fase 1..... 96
Figura 23. Animación del modelo del sistema productivo en SIMAN – Fase 2 97
Figura 24. Resultados de simulación - Fase 1 - Escenario 0% de reducción 98
Figura 25. Resultados de simulación - Fase 1 - Escenario 20% de reducción 99
Figura 26 Resultados de simulación - Fase 1 - Escenario 70% de reducción 100
Figura 27. Tiempo promedio de reparación del conductor de tablillas 102
Figura 28. Prueba T pareada escenarios 0% y 20% de reducción – Output Analizer 104
Figura 29. Prueba T pareada escenarios 0% y 70% de reducción – Output Analizer 104
Figura 30. Resultados de simulación - Fase 2 - Escenario 0% de reducción 105
Figura 31. Toneladas promedio de caña molida..... 108

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Causas de paradas 12
Tabla 2. Escala de la intensidad de importancia 19
Tabla 3. Escala de la matriz clase mundial 21
Tabla 4. Matriz de mantenimiento clase mundial 22
Tabla 5. Metodología de implantación TPM 25
Tabla 6. Metodología de la simulación 31
Tabla 7. Comparación de dos sistemas 34
Tabla 8. Personal administrativo de mantenimiento 49
Tabla 10. Resultados encuestas del sistema de gestión de mantenimiento 50
Tabla 11. Personal entrevistado 51
Tabla 12. Resultados AHP para la entrevistas de la gestión de mantenimiento 53
Tabla 13. Resultados entrevistas del sistema de gestión de mantenimiento 54
Tabla 14. Resultado análisis documental del sistema de gestión de mantenimiento 55
Tabla 15. Resultados de evaluación del sistema de mantenimiento 56
Tabla 16. Causas de paradas de fábrica 59
Tabla 17. Paradas de fábrica por área 60
Tabla 18. Paradas en equipos de patio de caña 60
Tabla 19. Paradas en equipos de molinos 61
Tabla 20. Tiempos de intervención por área 62
Tabla 21. Tiempos de intervención por equipos en Patio de caña 62
Tabla 22. Tiempos de intervención de equipos en molinos de caña 63
Tabla 23. Consolidado de equipos críticos de fábrica 64
Tabla 24. Focos claves de mejora del sistema de gestión de mantenimiento 65
Tabla 25. Criterios de decisión de la metodología de gestión de mantenimiento 67
Tabla 26. Programa de mantenimiento planeado para el conductor de tablillas 75
Tabla 27. Indicadores del programa de mantenimiento planeado 81
Tabla 28. Programa de mantenimiento autónomo para conductor de tablillas 83
Tabla 29. Indicadores del programa de mantenimiento autónomo 87
Tabla 30. Parámetros del modelo 91
Tabla 31. Datos estadísticos de entrada del modelo 92
Tabla 32. Datos de velocidad de molienda y velocidad de caña entrada 92
Tabla 33. Distribución de probabilidad de fallas de los equipos 93
Tabla 34. Distribución de probabilidad de tiempo de reparación de los equipos 93
Tabla 35. Variables del sistema de producción de patio y molinos de caña 94
Tabla 36. Parámetros de validación del modelo 94

Tabla 37. Tamaño de la corrida de simulación 95
Tabla 38. Datos estadísticos de validación del modelo 95
Tabla 39. Tamaño de la muestra para la variable de caña molida 95
Tabla 40. Datos estadísticos de variación del modelo..... 96
Tabla 41. Valores de costos y precio de venta..... 97
Tabla 42. Impacto en de la mejora en el tipo de causa de falla del equipo analizado..... 100
Tabla 43. Impacto en de la mejora en el equipo analizado 101
Tabla 44. Impacto en de la mejora en el sistema de equipos críticos analizados..... 101
Tabla 45. Resultados estadísticos de la prueba t pareada 103
Tabla 46. Resultados del modelo de producción en toneladas de caña 105
Tabla 47. Resultados del modelo de producción en quintales de azúcar 105
Tabla 48. Margen de utilidad operativa por hora – Año 2012 106
Tabla 49. Margen de utilidad operativa por falla mecánica en el Conductor de tablillas..... 107
Tabla 50. Costos de implementación del plan de mejora 108
Tabla 51. Análisis beneficio-costo de la implementación..... 109

TABLA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Intensidad de importancia de factores comparados 19
Ecuación 2. Razón de consistencia 20
Ecuación 3. Cálculo del tiempo medio entre fallas..... 23
Ecuación 4. Cálculo del tiempo medio entre reparaciones 23
Ecuación 5. Tamaño de muestra..... 33
Ecuación 6. Media de diferencias en prueba t pareada 34
Ecuación 7. Deviación estándar en prueba t pareada 34
Ecuación 8. Parámetro del intervalo de confianza 34
Ecuación 9. Ancho del intervalo en prueba t pareada..... 34
Ecuación 10. Quintales producidos..... 97
Ecuación 11. Estimado del margen de utilidad operativa 97
Ecuación 12. Criterios de decisión en prueba t pareada 103
Ecuación 13. Hipótesis nula de comparación de medias aplicada al caso de estudio 103
Ecuación 14. Hipótesis alterna de comparación de medias aplicada al caso de estudio..... 103

RESUMEN

El presente trabajo sustenta el desarrollo de un programa de mejora de la gestión de mantenimiento basado en la filosofía TPM para equipos críticos en un ingenio azucarero, considerando inicialmente diagnosticar el sistema de administración de mantenimiento actual de la fábrica aplicando la matriz de mantenimiento clase mundial, a través de encuestas, entrevistas dirigida a los responsables de planear y ejecutar el mantenimiento en la planta, complementando la información con datos documentales históricos de la organización con el propósito de encontrar los focos claves de mejora. A partir de los resultados generados por el diagnóstico del mantenimiento en la empresa se eligen aspectos con mayor relevancia para mejorar en el modelo actual de gestión de mantenimiento.

Posteriormente se plantea elegir un equipo piloto en el área con mayor grado de criticidad en la empresa respecto a las fallas presentadas y así establecer un plan de mejora basado en la metodología TPM acorde con las necesidades de la planta. La propuesta es sometida a evaluación del comportamiento de las metas planteadas a través de la programación de un modelo de simulación en SIMAN bajo el entorno ARENA, evaluando el impacto de la reducción del tiempo entre fallas para una determinada categoría en un equipo prestablecido para así conocer el intervalo critico de dicha meta, además se plantea correr una segunda fase del modelo de simulación para evaluar el impacto económico de la disponibilidad del equipo crítico en la empresa.

Finalmente se realiza un análisis costo-beneficio de los resultados proyectados en la simulación para exponer la relación entre lo que se puede producir durante un tiempo determinado al reducir fallas en el sistema y los costos estimados de implementación de la propuesta planteada.

INTRODUCCIÓN

La globalización ha generado que las organizaciones orienten sus esfuerzos hacia la competitividad empresarial para lo cual debe desarrollar determinadas capacidades a nivel industrial enfocadas en factores claves como la calidad, productividad, seguridad, medio ambiente y la confiabilidad. De esta forma el desempeño de las industrias actuales se mide en el mercado internacional por la calidad de los productos, precios competitivos, simplicidad de procesos y tiempo de respuesta, y cuando una organización aplica metodologías de mejora continua, para convertirse en referente de otras empresas similares alcanzando los mejores niveles en el mercado, logra el reconocimiento de empresa clase mundial.

En ese marco, el mantenimiento industrial ha evolucionado durante el último siglo desde el área que reparaba los incidentes emergentes de los equipos del proceso productivo de una empresa, hasta convertirse en una disciplina que gestiona la confiabilidad mediante análisis estructurados enfocados en el ciclo de vida de los activos para predecir y evitar sucesos que puedan generar pérdidas en el proceso productivo debidas a la falta de disponibilidad. Por consecuencia del progresivo crecimiento del mantenimiento como sistema fundamental de las organizaciones, han surgido metodologías que integran la producción con las actividades de mantenibilidad de equipos como el TPM (Mantenimiento Productivo Total) el cual centra sus esfuerzos en la eliminación de pérdidas de disponibilidad, rendimiento y calidad mediante la supresión de las causas que puedan originar estos eventos inesperados; y el RCM (Mantenimiento Basado en la Confiabilidad) el cual establece métodos para garantizar que los equipos que hacen parte del sistema productivo continúen operando bajo las condiciones requeridas en la industria en la cual se desempeñan.

Es entonces como los ingenios azucareros Colombianos deberían de generar nuevas estrategias para mejorar su desempeño en el mercado internacional al cual han sido expuestos por la apertura económica presentada en el país y la inminente incursión de proveedores internacionales en el territorio que antes dominaban por encontrarse dentro de una geografía delimitada por las fronteras de la soberanía nacional. De este modo, la confiabilidad de los equipos que intervienen en los procesos productivos, se convierte en un aspecto fundamental para garantizar la disponibilidad y productividad del sistema de fabricación de derivados de la caña de azúcar. Por este motivo las áreas de mantenimiento de las empresas enmarcadas en este negocio plantean el uso de metodologías estructuradas para utilizar recursos eficientemente que contribuyan a mantener permanentemente en el mejor estado los activos y evitar tiempos de parada que incrementen los costos mediante métodos simples y efectivos de reparación con el fin de prolongar la vida útil de los equipos e instalaciones.

1. JUSTIFICACIÓN

En el siglo XXI el objetivo que persiguen las empresas es el de generar valor, es decir, obtener mayores beneficios que trasciendan más allá del económico, como por ejemplo las buenas relaciones con los clientes o proveedores, el desarrollo sostenible y el prestigio corporativo. Es así, como la competitividad hace resonar al unísono los sistemas de productividad, seguridad, calidad y medio ambiente en un contexto que requiere integrarlos y mantenerlos a través del tiempo; por esta razón se hace importante un componente que garantice que los demás sostengan su ritmo en el exigente mercado globalizado, y se establece un factor clave denominado confiabilidad, que solo puede ser conseguido a partir de la gestión del mantenimiento.

Anteriormente el mantenimiento era considerado como un sistema secundario de tendencia reactiva ante situaciones que requerían atención inmediata, motivo por el cual se identificó como un área de mejora donde la aplicación de estrategias adecuadas causaría un impacto considerable en el enfoque sistémico de la organización. Así pues, el concepto de mantenimiento reconfigura su esencia y pasa de ser un mal necesario a convertirse en un componente funcional que garantiza estabilidad, disponibilidad, calidad y seguridad de los procesos productivos.

Dentro del ámbito industrial el mantenimiento se convierte en un factor crítico. En el caso de un ingenio azucarero se caracteriza por garantizar la continuidad del proceso productivo generando la menor cantidad de tiempos perdidos. Es así como la configuración de un proyecto de mejora de gestión de este aspecto se convierte en una herramienta clave para promover la competitividad de la empresa y hacer que gradualmente disminuya costos logísticos y operacionales generando una cultura donde la gestión de los equipos permita planificar las acciones, focalizándose en la prevención de eventos emergentes para aumentar el índice de disponibilidad de los equipos en el proceso productivo durante el tiempo. De esta forma es como la gestión del mantenimiento a través de metodologías estructuradas genera valor a la compañía e incrementa el grado de eficiencia de los recursos dentro de la organización generando altos estándares de calidad, productividad y seguridad.

Al desarrollar una estrategia de mantenimiento se incrementa el grado de integración entre las áreas que planean y ejecutan las actividades propias de este factor de competitividad. Es entonces donde se establecen tácticas adecuadas para desarrollar procedimientos operacionales que aportan sinérgicamente a los procesos inherentes a la producción y de reparación de los activos fijos del sistema. De igual manera la planeación y programación se beneficia debido a que marcan el norte de sus misiones y trabajan para mejorar día a día la disponibilidad del proceso productivo mediante la prevención y detección de fallas a partir de la eliminación de las causas potenciales que ocasionarían efectos negativos. A su vez, dentro de los componentes fundamentales de la gestión del mantenimiento se encuentra el análisis de confiabilidad que mediante

métodos de estudio de datos históricos de los equipos pueden predecir en qué momento fallarán y el nivel de criticidad de cada uno de ellos; también se consideran las aplicaciones de métodos administrativos y de organización que faciliten el adecuado uso del talento humano disponible, lo cual se consolida como uno de los principales pilares a partir de la gestión del conocimiento; además el auge tecnológico de la actualidad permite la gestión de la información de una forma eficiente que aprovecha los recursos computacionales de una empresa del calibre de un ingenio azucarero al emplear software de alto nivel que permita acceder a la información de un modo eficaz para registrar y consultar datos de infraestructura, instalaciones, eventos, indicadores y planes de mantenimiento que generen mayor efectividad en el flujo informático de las actividades de reparación preventiva, predictiva y correctiva de la organización.

Desde junio de 2012 hasta marzo de 2013, en la empresa se vienen presentando paradas ocasionadas principalmente por fallas en los equipos, las cuales son de tipo mecánico, eléctrico e instrumentación (ver tabla 1).

Tabla 1. Causas de paradas

CAUSA	NO. PARADAS	% NO. PARADAS	%ACUMULADO NO. PARADAS
Falla	445	45.32%	45.32%
Operacional	303	30.86%	76.17%
Externos	168	17.11%	93.28%
Proyectos	43	4.38%	97.66%
Programadas	23	2.34%	100.00%
Total	**982**	**100.00%**	

Nota. Fuente: Los autores

Es así como las fallas afectan directamente al proceso productivo dentro del ingenio azucarero, lo cual genera pérdidas económicas que abarcan costos de producción, personal, repuestos y logísticos. Por tanto se hace necesario rediseñar la metodología de gestión enfocando los esfuerzos en reducir las fallas y los tiempos que estas tardan en ser reparadas para así reducir los costos de producción de la compañía y elevar el margen de utilidad de la misma.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

- Diseñar un plan de gestión de mantenimiento que permita el mejoramiento de la productividad en un ingenio azucarero.

2.2. ESPECIFICOS

- Diagnosticar el sistema de gestión de mantenimiento estableciendo parámetros de administración, planeación y ejecución de actividades dentro de la empresa.

- Desarrollar una propuesta de mejora para la gestión del mantenimiento de fábrica que contribuya al incremento de la eficiencia de los recursos críticos del sistema productivo.

- Diseñar un modelo de simulación que valide la propuesta en un área piloto de la empresa.

- Realizar el análisis costo-beneficio de la propuesta que exponga las ventajas de su implantación en el entorno empresarial.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Con el propósito de claridad sobre algunos términos utilizados en el desarrollo del proyecto, se presentan los siguientes conceptos y definiciones:

- **Atributos**
  Características que pertenecen a una entidad.

- **CMMS - Computerized Maintenance Management System (Sistema Computarizado de Administración de Mantenimiento)**
  Software de gestión cuyo principal objetivo es asistir la administración eficiente y eficaz las actividades de mantenimiento.

- **Confiabilidad**
  La probabilidad de que un equipo o sistema opere sin falla por un determinado período de tiempo, bajo unas condiciones de operación previamente establecidas.

- **Criticidad**
  La incidencia que tiene cada equipo o máquina dentro de la operación de la empresa.

- **Demora**
  Es una duración indefinida que es causada por una combinación de condiciones del sistema.

- **Detección de fallas**
  Es un acto o inspección que se lleva a cabo para evaluar el nivel de presencia inicial de fallas. Un ejemplo de detección de fallas es el de la verificación de la llanta de refacción de un automóvil antes de emprender un viaje largo.

- **Diagrama de Pareto**
  Es una distribución de frecuencias de datos de atributos acomodados por orden de frecuencia. Su propósito es separar los pocos vitales de los muchos triviales. También ayuda a establecer prioridades acerca del cuál curso de acción es más benéfico.

- **Disponibilidad**
  Características de un equipo, instalación o línea de fabricación que expresa su habilidad para operar sin problemas. Depende de los atributos del sistema técnico y de la eficiencia y la eficacia de la gestión del mantenimiento.

- **Entidad**
  Representa un objeto que requiere una definición explicita.

- **Entidad dinámica**
  Un objeto que se mueve a través del sistema.

- **Equipo**
  Elemento que constituye el todo o parte de una máquina o instalación que, por sus características, tiene datos, historial y programas de reparación propios.

- **Estrategia**
  Decisiones que establecen la orientación general de una organización y su viabilidad en el contexto de las situaciones tanto predecibles como de incertidumbre.

- **Evento**
  Ocurrencia que cambia el estado del sistema.

- **Falla**
  Evento que se da cuando un elemento deja de cumplir con su función propuesta.

- **Gerencia de Activos (AM)**
  Estrategia que abarca las herramientas y metodologías que permiten la planeación sistemática y control de los activos físicos a lo largo de su vida, esto incluye, diseño, especificaciones, construcción o compra del activo, operación, mantenimiento y modificaciones o rediseños mientras esta en uso, además su disposición cuando ya no es requerido.

- **Inspección**
  El proceso de medir, examinar, probar, calibrar o detectar de alguna otra forma cualquier desviación con respecto a las especificaciones.

- **Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM)**
  Instituto Japonés de Mantenimiento de Planta, creador del TPM

- **Just In Time (JIT)**
  Es una filosofía que define la forma en que debería optimizarse un sistema de producción. Es decir, se trata de entregar materias primas o componentes a la línea de fabricación de forma que lleguen “justo a tiempo” a medida que son necesarios.

- **Mantenimiento**
  Se define como la combinación de actividades mediante las cuales el equipo o un sistema se mantienen en, o se restablece a, un estado en el que se puede realizar las funciones asignadas.

- **Mantenimiento Basado en la Condición (CBM)**
  Tipo de tareas que miden la condición de los equipos, a través de variables que indican la condición de un elemento o componente, y así tomar la acción apropiada para manejar las consecuencias de estas fallas.

- **Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)**
  Proceso estructurado que permite definir las estrategias de mantenimiento que deben hacerse, para que los activos continúen cumpliendo con sus funciones en su contexto operacional.

- **Mantenimiento Correctivo**
  Se conoce como un tipo de tareas reactivas, basadas en remplazar, realizar intervenciones o reparar cuando un activo deja de cumplir su función.

- **Mantenimiento Clase Mundial (MCM)**
  Conjunto de ideas-fuerza dirigidas a reorientar la estrategia de mantención hacia un enfoque de mantenimiento pro-activo, disciplinado en prácticas estandarizadas, gestión autonómica, competitivo y con índices de desempeño clase mundial.

- **Mantenimiento Predictivo**
  Se caracteriza por detectar las fallas antes de que se desarrollen en una rotura u otras interferencias en producción. Se basa en inspecciones, medidas y control del nivel de condición de los equipos.

- **Mantenimiento Preventivo (MP)**
  Serie de tareas planeadas previamente, que se llevan a cabo para contrarrestar las causas conocidas de fallas potenciales de las funciones para las que fue creado un activo.
- **Mantenimiento Productivo Total (TPM)**
  Programa de administración a nivel global de una compañía, hace énfasis en involucrar al operario en el mantenimiento de los equipos para llevar a un estado cero fallas y cero pérdidas, realizando un enfoque de mejoramiento continuo.

- **Modelo**
  Representación de un grupo de objetos o ideas en una forma diferente a la entidad misma.

- **Orden de Trabajo (OT)**
  Es el instructivo por el cual se indica a los sectores operativos de mantenimiento ejecutar una tarea.

- **Planes de mantenimiento**
  Es el conjunto de tareas de mantenimiento seleccionadas y dirigidas a proteger la función de un activo físico, estableciendo una frecuencia de ejecución de las mismas y el personal destinado a realizarlas.

- **Reparación**
  El restablecimiento de un equipo a una condición aceptable mediante la renovación, remplazo o reparación general de piezas dañadas o desgastadas.

- **Simulación**
  Es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y de conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema y/o evaluar varias estrategias de operación del sistema.

- **Tasa de Calidad**
  Esta es una medida de la precisión del proceso o del equipo.

- **Tasa del Proceso**
  Esta es una medida del tiempo del ciclo del equipo en el proceso.

- **Tiempo Medio para Fallar (MTTF)**
  Características de un equipo, instalación o línea de fabricación que se mide por el tiempo promedio en que se puede operar entre fallas consecutivas.

- **Tiempo Medio para entre Fallas (MTBF)**
  Es una medida de la frecuencia de falla. Expresa la probabilidad o tiempo de falla de un elemento o activo.

- **Tiempo Medio para la Reparación (MTTR)**
  Es una medida que indica el tiempo promedio de cada reparación.

- **Total Quality Management (TQM)**
  Es un enfoque que busca mejorar la calidad y desempeño, de forma de ajustarse o superar las expectativas del cliente. Esto puede ser logrado integrando todas las funciones y procesos relacionados con la calidad en una compañía.

- **Variables del estado del sistema**
  Son la colección de toda la información necesaria para definir qué está pasando en el sistema con cierto detalle en un momento en el tiempo en específico.

3.2. HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES

La ejecución de cualquier actividad involucra de una u otra manera la toma de decisiones, ésta básicamente consiste en la evaluación de un conjunto de alternativas en términos de un conjunto de criterios de decisión definidos, donde frecuentemente estos criterios están en conflictos unos con otros. Dentro este marco es fundamental contar con la información necesaria, debido a que de ella dependerá la solución real del problema.

La complejidad de este sistema ha llevado al desarrollo de modelos de preferencia, es decir herramientas que permiten abordar el problema de decisión de una forma sistemática y científica, buscando favorecer el proceso y ayudar a quien toma la decisión de organizar y ejecutar con claridad tareas y trabajos, definiendo objetivos y responsabilidades.

3.2.1. Proceso Jerárquico Analítico (AHP)

Un problema clásico en la teoría de las decisiones es la determinación de los pesos para un conjunto de factores (actividades) u objetos que contribuyen a una meta común. La necesidad surge en dos situaciones. La primera es cuando se requiere un juicio acerca de la importancia de un factor para un proceso. La segunda es cuando se necesita la combinación de varios objetivos. Existen cuatro métodos de la ciencia administrativa para hacer evaluaciones de valor y beneficio, a saber. Clasificación, ordenamiento, evaluación y calificación.

La comparación por pares es un método común para asignar factores de peso u ordenamiento. Después se puede emplear un procedimiento de suma para obtener un peso de cada factor. El diagrama de precedencia de Moody es un ejemplo de dicho método en donde se utiliza la comparación por pares y se suma para obtener calificaciones o lugares para los factores. Otro método para asignar pesos es el método de Delphi, en donde se encuesta a un grupo de expertos y se emplea una técnica interactiva para obtener calificaciones o pesos para los factores bajo consideración.

Un método bastante conocido para la determinación de pesos, y que está ganando popularidad, es el proceso jerárquico analítico (AHP). El peso deberá reflejar la contribución de cada factor en el sistema de mantenimiento. En este método se requiere una matriz de comparación por pares de los factores. Las entradas de la matriz indican la fuerza con que un factor domina al otro. El elemento aji de la matriz se define como la intensidad de la importancia del factor i en comparación con el factor j utilizando la siguiente escala.

Tabla 2. Escala de la intensidad de importancia

INTENSIDAD DE IMPORTANCIA	DEFINICIÓN	EXPLICACIÓN
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo
3	Importancia débil de uno sobre otro	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra
5	Importancia esencial o fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra
7	Importancia demostrada	Una actividad esta favorecida fuertemente y su dominio se demuestra en la práctica
9	Importancia absoluta	La evidencia que favorece a una actividad sobre otra es del más alto orden posible de afirmación
2,4,6,8	Valores intermedios entre los dos juicios adyacentes	Cuando se necesita un compromiso

Nota. Fuente: Duffuaa Raouf Dixon. (2009). *Sistemas de mantenimiento: planeación y control.* México: (Pág.346)Limusa Wiley.

Obviamente,

$$aij = \frac{1}{aji}$$

Ecuación 1. Intensidad de importancia de factores comparados

Mediante esta escala, se elabora una escala de calificaciones subjetivas a partir de la comparación por pares. Para aplicar el AHP a un problema más específico de determinación de pesos, se deben realizar los siguientes pasos:

1. Obtener una matriz de comparaciones por pares utilizando la escala de la tabla 2.

2. Encontrar el valor característico (eigenvalor) máximo *λmáx.* Si es cercano a *n,* la dimensión de la matriz, entonces proceder con el paso 3. En caso contrario, revisar la matriz de comparaciones por pares.

3. Encontrar el vector característico (eigenvalor) correspondiente al máximo valor característico. Este vector proporciona los pesos para cada factor. Los pesos pueden normalizarse cuya suma dé 1. El método AHP proporciona los medios para evaluar la consistencia de los pesos obtenidos mediante él. Mide la consistencia mediante una razón de consistencia (RC), cuyo valor debe ser 10% o menor:

$$\boldsymbol{RC = \frac{\lambda máx - n}{n - 1}}$$

Ecuación 2. Razón de consistencia

El método anterior se emplea en este trabajo para determinar la importancia de los factores de mantenimiento.

3.2.2. Matriz de mantenimiento clase mundial

Se refiere al conjunto de las mejores prácticas que reúne elementos de distintos enfoques organizacionales (con visión de negocio), las cuales aplicadas en forma coherente generan grandes ahorros a las empresas (ver tabla 4.).

Algunas de las características de este concepto de mantenimiento son:

- **Estrategia de mantenimiento**
  Establece estrategias orientadas a la integración de las diferentes áreas que participan en el proceso productivo con las políticas de mantenimiento de la empresa, de manera que sean entendidas y adaptadas por todos.

- **Planeación y programación**
  Debe ser metódica y sistemática con retroalimentación, incluyen las actividades a realizar en corto, mediano y largo plazo, buscando siempre la maximización de la productividad y confiabilidad de los equipos, y debe acoplarse a procedimientos documentados y establecidos.

- **Administración y organización**
  Establece una organización de alto desempeño, en donde la administración de mantenimiento debe estar integrada con las áreas funcionales de la organización y principalmente con los proveedores de materiales y servicios externos que garantice el servicio de proveedores confiables integrados con el proceso para los cuales requieren los materiales, balanceando costos y calidad, en función de convenios y tiempos de entrega oportunos.

- **Administración de recurso humano**
  Debe orientar el cambio planificado a través del desarrollo y educación permanente del personal de la empresa.

- **Equipos de trabajo**
  El análisis de los procesos y la resolución de los problemas se realizan a través de equipos de trabajo multidisciplinarios reconocidos formalmente por la empresa.

- **Tecnologías de información**
  Se refiere al uso de sistemas estándares en la organización, alineados con los procesos a los que apoyan y facilitan el registro y procesamiento de datos.

- **Medidas de desempeño**
  Específica el uso de la información acumulada de costos de producción, mantenimiento, mano de obra, de materiales, de manejo de inventarios además de datos de confiabilidad y disponibilidad, es decir de los Indicadores claves de desempeño (KPI´s) en la empresa.

- **Tácticas de mantenimiento**
  Establece la implementación de metodologías para el mejoramiento continuo de la administración de mantenimiento como los son las inspecciones basadas en el tiempo, el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), inspecciones basadas en el riesgo (RBI), mantenimiento productivo total (TPM), entre otros.

- **Análisis de procesos**
  Sintetiza la búsqueda permanentemente de mejorar las actividades y procesos, siendo estas mejoras promovidas, seguidas y reconocidas por la empresa y los diferentes entes reguladores. Esta metodología de trabajo debe ser parte de la cultura organizacional.

- **Infraestructura e instalaciones**
  Establece la existencia única de información que contenga toda la infraestructura de equipos, componentes y diferentes jerarquías para gestionar el mantenimiento de la organización.

- **Análisis de confiabilidad**
  Deben aplicarse sistemáticamente las más avanzadas tecnologías y herramientas del mantenimiento predictivo, como lo son: análisis de vibraciones, análisis de aceite, ultrasonido, alineación, balanceo, entre otras.

La matriz de mantenimiento clase mundial establece 5 categorías de gestión de mantenimiento con sus respectivos rangos, mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Escala de la matriz clase mundial

CATEGORIA	PUNTUACIÓN
Mantenimiento inocente	(0%-55%)
Mantenimiento no satisfactorio	(55%-66%)
Mantenimiento consciente y conocedor	(66%-77%)
Mantenimiento mejor en su clase	(77%-89%)
Mantenimiento clase mundial	(89%-100%)

Nota. Fuente: RCM Ingeniería.

Tabla 4. Matriz de mantenimiento clase mundial

CLASE	ESTRATEGIA	PLANEACIÓN & PROGRAMACIÓN	ADMINISTRACIÓN Y ORGANIZACIÓN	ADMINISTRACIÓN DEL RECURSO HUMANO	EQUIPOS DE TRABAJO	TECNOLOGÍAS INFORMACIÓN	MEDIDAS DEL DESEMPEÑO	TACTICAS DE MANTENIMIENTO	ANÁLISIS DE PROCESOS	INFRAESTRUCTURA E INSTALACIONES	ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD
CLASE MUNDIAL	Estrategia corporativa de mantenimiento	Ingeniería de mantto y planeación a largo plazo (min 3 años a la visita)	Organización de alto desempeño	Técnicos independientes multi-disciplinarios	Equipos de trabajo autónomos	Base de datos totalmente integrada	Equipos efectivos, benchmarking, excelente base de datos de costos	Todas las tácticas derivadas de un análisis estructurado	Revisión regular de los procesos de costo, tiempo y calidad, certificación ISO 9001 procesos de mantto	Existencia única de información que contiene toda la infraestructura de equipos, componentes y diferentes jerarquías para hacer gestión de mantto	Programa total de confiabilidad (predicción y ajuste de estrategia mantto. Con base en "r")
MEJOR EN SU CLASE	Plan de mejoramiento a largo plazo	Buena planeación del trabajo, programación, soporte de ingeniería de mantto	Administración organizada de mantenimiento integrada con proveedores y servicios externos	Algo de multi-disciplina	Equipos de mejoramiento continuo	Convencional ligada a materiales y financieros	MTBF/MTTR disponibilidad, costos de mantenimiento independientes	CBM formal y dando resultados PPM con base RCM	Algunas revisiones de procesos administrativos de mantto (estratégicos, tácticos y operativos)	Jerarquía de componentes y sistemas estandarizados en diferentes bases de datos	Modelamiento de confiabilidad
CONCIENTE Y CONOCEDOR	Plan estratégico de mantto a un año	Grupos de planeación de ingeniería de mantto establecidos	Estructura organizacional de mantenimiento integrada con logística, finanzas, rec. humanos, gerencia y demás áreas de la compañía	Grupos descentralizados de diferentes disciplinas	Comités de mejoramiento formales	Convencional no ligada a otros sistemas	Tiempo de parada con causas, costos de mantenimiento disponibles	Algo de CBM, Inspecciones basadas en el tiempo, algo de NDT	Revisiones periódica de procesos técnicos por disciplina	Jerarquía de componentes y sistemas para realizar gestión administrativa y técnica	Buena base de datos de falla bien usada RCFA & FMA
NO SATISFACTORIO	Plan de mejoramiento de mantenimiento preventivos	Soporte para detección de fallas, programación	Mantenimiento organizado como respuesta a la necesidad operativa del proceso productivo ppal.	Algunas disciplinas parcialmente descentralizadas	Algunas reuniones de mejoramiento en seguridad	Algunos programas y registros de repuestos	Algunos registros de paradas costos de mantto no segregados	Inspecciones basadas en el tiempo	Procesos técnicos de mantenimiento revisados una vez	Jerarquía de componentes y sistemas en medio magnético	Registro de fallas poco usado
INOCENTE	Reactivo a fallas	No planeación pequeña programación no ingeniería	Organización y administración funcional	Altamente centralizado por disciplinas	Solo reuniones esporádicas del sindicato o sociales	Manual o sistemas ad hoc	Ninguna aproximación sistemática costos de mantenimiento (no disponibles)	Paradas anuales de inspección únicamente	Nunca revisados	No existe jerarquía de equipos	Sin registro de fallas

Nota. Fuente: RCM Ingeniería.

3.2.3. Análisis de criticidad

Las técnicas de análisis de criticidad son herramientas que permiten identificar y jerarquizar por su importancia los activos de una instalación sobre los cuales vale la pena dirigir recursos (humanos, económicos y tecnológicos). En otras palabras, el proceso de análisis de criticidad ayuda a determinar la importancia y las consecuencias de los eventos potenciales de fallos de los sistemas de producción dentro del contexto operacional en el cual se desempeñan.
Los criterios o parámetros utilizados para el cálculo de los valores de criticidad de los sistemas[1] fueron los siguientes:

- **Frecuencia de fallas (MTBF):** Expresa la probabilidad de falla de un elemento o activo, es una medida que indica confiabilidad.

$$\boldsymbol{MTBF = \frac{Tiempo\ Total\ de\ funcionamiento}{Número\ Total\ de\ fallas\ en\ un\ período}}$$

Ecuación 3. Cálculo del tiempo medio entre fallas

- **Tiempo promedio para reparar (MTTR):** Medida que indica el tiempo promedio de cada reparación, se asocia a la mantenibilidad.

$$\boldsymbol{MTTR = \frac{Tiempo\ de\ fallas\ por\ Mtto.}{Número\ Total\ de\ fallas\ en\ un\ período}}$$

Ecuación 4. Cálculo del tiempo medio entre reparaciones

3.3. FILOSOFÍA DE MANTENIMIENTO Y MEJORA CONTINUA

3.3.1. Mantenimiento Productivo Total - TPM

El Mantenimiento Productivo Total (TPM por sus siglas en inglés) es un enfoque gerencial para el mantenimiento que se centra en la participación de todos los empleados de una organización en la mejora del equipo. Este método se desarrolló en el sector manufacturero japonés, comenzando con la aplicación del mantenimiento preventivo al estilo norteamericano y europeo y avanzando hasta la aplicación de los conceptos de la administración de la calidad total (TQM) y la manufactura justo a tiempo (JIT) al campo del mantenimiento de los equipos.

- **Aportes reales**
  El Mantenimiento Productivo Total presenta algunos beneficios para las empresas que lo adoptan[2], como son:

---

[1] Correspondiente al autor Amendola L. (2011). De su articulo "Indicadores de Confiabilidad propulsores en la gestión de mantenimiento".
[2] Correspondiente al autor Sacristán, F. R. (2012). De su libro "Mantenimiento Total de la Producción". España: Fundación Confemetal.

- Mejora la productividad casi en un 50%
- Mejora el rendimiento operacional de las líneas de producción de un 30% - 35%
- Mejora el rendimiento dela organización de un 50% - 55%
- Reducción del número de paradas al 50%
- Mejora la competencia de los operarios de producción.
- Mejor aprovechamiento de los técnicos y profesionales de mantenimiento.
- Mantiene los equipos productivos en estado de referencia.

A su vez, el TPM pretende eliminar, por la mejora continua, las pérdidas esporádicas y crónicas, analizando las seis grandes incidencias que penalizan la operatividad de un proceso básico:

- **Fallas del equipo:** Las descomposturas que presenta un componente de la máquina o instalación que impide la operatividad del mismo.

- **Tiempo Muerto por preparación y ajustes:** Cuando termina la producción de un tipo dado de producto y el equipo se ajusta para estar listo a producir otro tipo de producto, se presentan pérdidas debido al tiempo muerto de preparación y a productos defectuosos.

- **Inactividad y paros menores:** La producción puede verse interrumpida debido al mal funcionamiento o a que una máquina esté ociosa entre la elaboración de dos productos.

- **Reducción de velocidad:** Estas pérdidas corresponden a la diferencia entre la velocidad de diseño del equipo y la velocidad de operación real.

- **Defectos del proceso:** Éstos incluyen pérdidas en calidad ocasionadas por el proceso.

- **Rendimiento reducido:** Consiste en las pérdidas de arranque que ocurren durante las primeras etapas de la producción, desde el principio hasta su estabilización

- **Metodología de implantación**

  Es necesario decir que la planificación y programación para desarrollar un proyecto TPM en una industria debe ser el apropiado para el tipo de actividad, equipos de producción en cuanto a tipo y estado, así como los problemas que se desean afrontar (Sacristán, Mantenimiento Total de la Producción, 2012)**.** Son necesarios unos 3 años para implantarlo y desarrollarlo en una compañía con cierta complejidad en su actividad y organización, y la llave del éxito está en el “rigor de su aplicación”.

Tabla 5. Metodología de implantación TPM

	ETAPAS	CONTENIDO
PREPARACIÓN	1. Decisión de la dirección de aplicar el TPM como proyecto de la empresa	a. Estrategia a presentar en el comité de dirección b. Revista de empresa
	2. Campaña de información-formación técnica	a. Estrategia a presentar en el comité de dirección b. Revista de empresa
	3. Crear la estructura de animación y pilotaje del TPM	a. Comisiones, animadores b. Grupos de trabajo
	4. Diagnóstico de la situación de partida indicadores de progreso técnico	a. Banco de datos de valores técnico-económico b. Encuestas en la organización
	5. Reacción de un plan tipo. Líneas de acción/Objetivos	a. Redacción global y detallada b. Planificación
DESARROLLO	6. Lanzamiento	a. Datos de partida/ presentación plan tipo b. Aspectos normales c. Desarrollo de las "5S"
	7. Implantación de la mejora continua en los sistemas- procesos	a. Análisis de disfuncionamientos b. Máquinas cuello de botella c. Grupos de fiabilización
	8. Desarrollo del mantenimiento autónomo	a. Gestión específica b. Formación c. Gamas/niveles
	9. Desarrollo del mantenimiento programado	a. Mejora de la gestión y organización del mantenimiento programado b. Gamas/niveles c. Formación d. Máquinas típicas e. Grupos de fiabilización
OPTIMIZACIÓN	10. Formación del equipo humano en los métodos y experiencias del mantenimiento global	a. Entrevistas/evaluación de componentes b. Contrato de formación/cursos c. Gestión de la polivalencia d. Grupos de fiabilización

	11. Integrar el TPM en los sistemas de gestión, diseño y construcción de nuevos equipos	a. Medida de la F/M/D b. Participar en fases de un proyecto de equipo nuevo c. Documentación técnica d. Fiabilización e. Máquinas típicas f. Grupos de fiabilización
	12. Certificar la aplicación TPM	a. Auditar - definir nuevos objetivos b. Mejorar la formación

Nota. Fuente: Sacristán, F. R. (2012). *Mantenimiento Total de la Producción.* (Pág. 69) España: Fundación Confemetal

- **Procesos fundamentales (Pilares)[3]**
  Los procesos fundamentales son un conjunto de acciones, que sirven de apoyo para la construcción de un sistema de producción ordenado. Cada uno de estos pilares tiene una función determinada, liderados por responsables de las diferentes áreas e involucrando a todos los empleados, además existe una conexión de realización entre los pilares que tienen los siguientes efectos escalonados:

  - Eliminar pérdidas
  - Prevenir que vuelvan a aparecer
  - Transformar radicalmente el sistema productivo
  - Lograr el desarrollo de las personas
  - Conseguir la transformación de la empresa

  Se implantan siguiendo una metodología disciplinada, potente y efectiva. Los pilares considerados por el JIPM como necesarios para el desarrollo del TPM en una organización son:

- **Educación y Entrenamiento**
  Este pilar considera todas las acciones que se deben realizar para el desarrollo de habilidades para lograr altos niveles de desempeño de las personas en su trabajo.

  Objetivo
  - Desarrollar trabajadores con habilidades múltiples que entrenen al resto de los miembros de los equipos y puedan alcanzar todos los pilares TPM.

- **Mantenimiento autónomo**
  El mantenimiento autónomo es básicamente la prevención del deterioro en los equipos y componentes, consta de un conjunto de actividades que se realizan

[3] Correspondiente al autor Venkatesh J. (2005). An Introduction to Total Productive Maintenance (TPM).

diariamente por todos los trabajadores en los equipos que operan. Estas actividades se rigen a estándares previamente preparados con la colaboración de los propios operarios. Los operarios deben ser capacitados de manera que tengan los conocimientos necesarios para operar correctamente los equipos.

Objetivo

- Desarrollar operadores de producción calificados para establecer y mantener las condiciones adecuadas en los equipos.

- **Mejoras Enfocadas**

  En este pilar se maximiza la Eficiencia Global de los Equipos (OEE) y de los Recursos Humanos en los procesos de producción dentro de la planta, mediante actividades organizadas en equipos, empleando técnicas específicas y centrando la atención en la eliminación de los desperdicios existentes en las industrias que afectan la eficiencia global de la planta (OPE).

  Objetivos

  - Maximizar la efectividad global de los equipos, procesos y la planta manteniendo las cero pérdidas que la afectan
  - Reducir el 30% de los costos de fabricación

- **Mantenimiento planeado**

  El propósito de este pilar consiste en actividades que ejecutan el área de mantenimiento para mantener y asegurar las condiciones operativas adecuadas de los equipos por medio de una planificación detenida, preparación y establecimiento de fechas con antelación.

  Objetivos

  - Mejorar en un 50% la confiabilidad y capacidad de mantenimiento.
  - Reducir en un 20% los costos de mantenimiento.
  - Asegurar la disponibilidad de las máquinas de los repuestos en todo el tiempo.

- **Gestión inicial del equipo**

  Este pilar actúa durante la planificación y construcción de los equipos de producción. Participan los departamentos de investigación, desarrollo y diseño, tecnologías de procesos, producción, mantenimiento, planificación, gestión de calidad y áreas comerciales.

  Objetivo

  - Reducir los tiempos innecesarios para que el equipo sea completamente fiable desde el primer momento.

- **Mantenimiento de Calidad**
  El mantenimiento de calidad es una clase de mantenimiento preventivo orientado al cuidado de las condiciones del producto, es así que este pilar facilita la operación de los equipos donde se generen defectos de calidad mediante la prevención, lo que certifica que la máquina cumpla las condiciones para lograr cero defectos en el producto.

  Objetivos
  - Reducir en un 50% los defectos en el proceso
  - Reducir en un 50% los costos de calidad

- **Eficiencia administrativa**
  Este pilar ayuda a evitar pérdidas de información, coordinación, precisión de la información, etc. Utiliza técnicas de mejoras enfocadas, estrategia de 5s, acciones de mantenimiento autónomo, entrenamiento y estandarización de trabajos. Es desarrollado en las áreas administrativas con acciones individuales o en grupo.

  Objetivo
  - Reducir las pérdidas que se pueden producir en el trabajo manual de oficinas.

- **Seguridad, Salud y Medio ambiente**
  Este pilar crea un lugar de trabajo seguro y una zona libre de daños causados por los procesos y procedimientos realizados en la empresa. Emplea metodología desarrollada para los pilares mejoras enfocadas y mantenimiento autónomo.

  Objetivos
  - Crear lugares de trabajo seguros y con las condiciones ambientalmente idóneas.
  - Reducir los riesgos que afecten la integridad de las personas.

3.4. SIMULACIÓN DE PROCESOS PRODUCTIVOS

Para poder comprender la realidad y toda la complejidad que un sistema puede conllevar, ha sido necesario construir artificialmente objetos y experimentar con ellos dinámicamente antes de interactuar con el sistema real.

Así, la simulación se puede definir como la imitación del funcionamiento de un proceso de un mundo real o de un sistema con el tiempo, en donde se involucra la generación y observación de una historia artificial del sistema para dibujar las inferencias a cerca de las características que opera el sistema que se representa.

3.4.1. Conceptos de modelamiento

- **Sistemas, modelos y eventos**
  Un sistema puede definirse como una colección de objetos o entidades que interactúan entre sí para alcanzar cierto objetivo.

  El estado de un sistema es el conjunto mínimo de variables necesarias para caracterizar o describir todos aquellos aspectos de interés del sistema en un cierto instante de tiempo. A estas variables se le conocen como variables de estado.

  Los sistemas se clasifican en:

  - **Sistemas continuos:** Las variables de estado del sistema evolucionan de modo continuo a lo largo del tiempo.

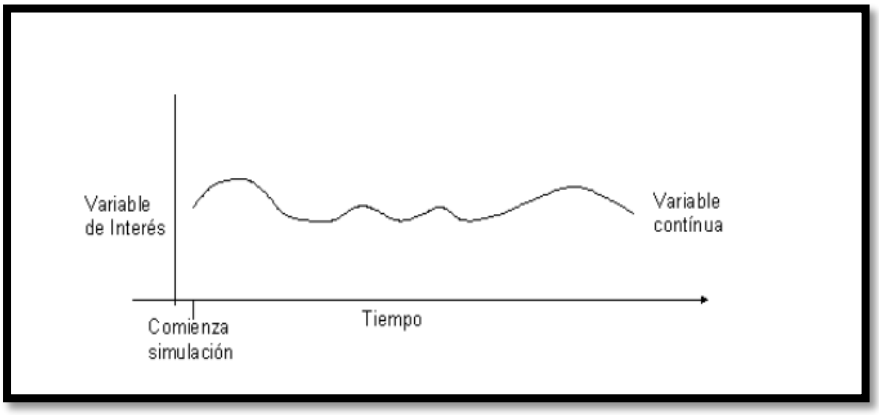


Figura 1. Comportamiento de una variable de estado de tipo continúo
Fuente: Universidad del Valle, Introducción a la Simulación, Mauricio Alejandro Buitrago, 2013.

  - **Sistemas Discretos:** Se caracterizan porque las propiedades de interés del sistema cambian únicamente en un cierto instante o secuencia de instantes, y permanece constantes el resto del tiempo. La secuencia de instantes en los cuales el estado del sistema puede presentar un cambio, obedece normalmente a un patrón periódico.

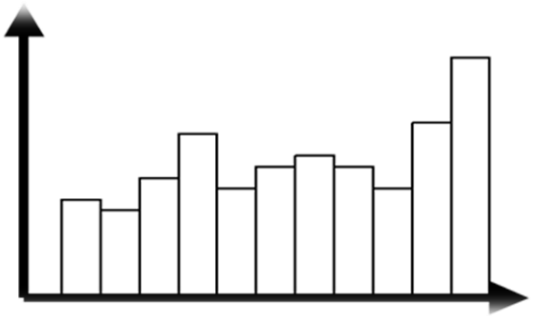


Figura 2. Evolución de una variable de un sistema discreto
Fuente: Universidad del Valle, Introducción a la Simulación, Mauricio Alejandro Buitrago, 2013.

- **Sistemas orientados a eventos discretos:** Al igual que los sistemas discretos, se caracterizan porque las propiedades de interés del sistema cambian únicamente en una secuencia de instantes de tiempo permaneciendo constantes el resto de tiempo. La secuencia de instantes en los cuales el estado del sistema puede presentar un cambio, obedece a un patrón aleatorio

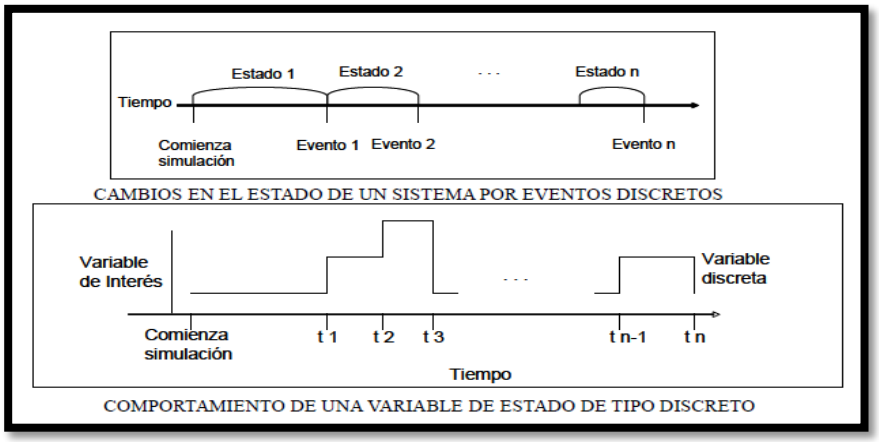


Figura 3. Comportamiento de una variable de estado de tipos discreto
Fuente: Universidad del Valle, Introducción a la Simulación, Mauricio Alejandro Buitrago, 2013.

- **Sistemas combinados**: Aquellos que combinan subsistemas que siguen filosofías continuas o discretas, respectivamente. Es el caso de los sistemas que poseen componentes que deben ser necesariamente modelados según alguno de dichos enfoques específicos.

- **Clasificación de modelos**
  La descripción de las características de interés de un sistema se conoce como modelo del sistema, y el proceso de abstracción para obtener esta descripción se conoce como modelado.

Se utilizan los modelos simbólicos matemáticos como herramienta para representar las dinámicas de interés de cualquier sistema en un entorno de simulación digital.

Los modelos simbólicos matemáticos mapean las relaciones existentes entre las propiedades físicas del sistema que se pretende modelar en las correspondientes estructuras matemáticas. El tipo de formalización matemática que se utilice va a depender de las características intrínsecas de las dinámicas de interés que se quieran representar.

La descripción en términos matemáticos de un sistema real no es una metodología de trabajo propia de la simulación digital, sino que es inherente a la mayoría de las técnicas que se utilizan para solventar cualquier tipo de problema, las cuales suelen seguir unas pautas que, de modo general, se pueden resumir en la tabla 6.

Tabla 6. Metodología de la simulación

ETAPA	DESCRIPCIÓN
Formulación del problema	Define el problema que se pretende estudiar. Incluye por escrito sus objetivos.
Diseño del modelo conceptual	Especificación del modelo a partir de las características de los elementos del sistema que se quiere estudiar y sus interacciones teniendo en cuenta los objetivos del problema.
Recogida de datos	Identificar, recoger y analizar los datos necesarios para el estudio.
Construcción del modelo	Construcción del modelo de simulación partiendo del modelo conceptual y de los datos.
Verificación y validación	Comprobar que el modelo se comporta como es de esperar y que existe la correspondencia adecuada entre el sistema real y el modelo.
Análisis	Analizar los resultados de la simulación con la finalidad de detectar problemas y recomendar mejoras o soluciones.
Documentación	Proporcionar documentación sobre el trabajo efectuado.
Implementación	Poner en práctica las decisiones efectuadas con el apoyo del estudio de simulación.

Nota. Fuente: Pegden, C.D., Shannon, R.E., and Sadowski, R.P., (1995), Introduction to simulation using Siman, McGraw-Hill Corp.

Consideraciones que se deben tener en cuenta para representar una representación eficiente del sistema real:

- Un modelo se desarrolla siempre a partir de una serie de aproximaciones e hipótesis y, consecuentemente, representa tan sólo parcialmente la realidad.

- Un modelo se construye para una finalidad específica y debe ser formulado para que sea útil a dicho fin.
- Un modelo tiene que ser por necesidad un compromiso entre la simplicidad y la necesidad de recoger todos los aspectos esenciales del sistema en estudio.

Un buen modelo debe representar adecuadamente aquellas características del sistema que son de nuestro interés y ser una representación abstracta de la realidad lo suficientemente sencilla como para facilitar su mantenimiento, adaptación y reutilización.

- **Modelos estáticos frente a Modelos dinámicos**
  Los *modelos estáticos* suelen utilizarse para representar el sistema en un cierto instante de tiempo; por tanto, en su formulación no se considera el avance del tiempo.

  Los *modelos dinámicos* permiten deducir cómo las variables de interés del sistema en estudio evolucionan con el tiempo.

- **Modelos determinísticas respecto a Modelos estocásticos**
  Un modelo se considera *determinista* si su nuevo estado puede ser completamente definido a partir del estado previo y de sus entradas. Es decir, ofrece un único conjunto de valores de salida para un conjunto de entradas conocidas.

  Los *modelos estocásticos* requieren de una o más variables aleatorias para formalizar las dinámicas de interés. En consecuencia, el modelo no genera un único conjunto de salidas cuando es utilizado para realizar un experimento, sino que los resultados son utilizados para estimar el comportamiento real del sistema.

- **Modelos continuos frente a Modelos discretos**
  Los *modelos continuos* se caracterizan por representar la evolución de las variables de interés de forma continua. En general suelen utilizarse ecuaciones diferenciales ordinarias si se considera simplemente la evolución de una propiedad respecto al tiempo, o bien ecuaciones en derivadas parciales si se considera también la evolución respecto a otras variables adicionales.

  De modo análogo a la definición de los modelos continuos, los *modelos discretos* se caracterizan por representar la evolución de las variables de interés de forma discreta.

- **Herramientas estadísticas en simulación**

  - **Estimando estadísticas**
    Existen dos tipos de estadísticas, las primeras son las estadísticas basadas en observaciones, las cuales se obtienen por observación de las entidades del sistema. Ejemplo: Tiempo promedio en el sistema - Tiempo promedio en fila; las otras son las estadísticas dependientes del tiempo, las cuales se calculan con variables dependientes del tiempo durante la ejecución de la observación. Ejemplo: Utilización de un recurso – Número de clientes en fila.

  - **Tamaño de la muestra**
    La estimación del tamaño de la muestra permite determinar con precisión el tamaño de la muestra a recoger, para que los análisis estadísticos sean científicamente sólidos.

    Para obtener el tamaño se utiliza la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{n = \frac{(Z\alpha/2)^2 * P * Q}{E^2}}$$

Ecuación 5. Tamaño de muestra

    Donde:
    $Z_{\alpha/2}$: Corresponde el nivel de confianza que se desea
    P: Variabilidad positiva
    Q: Variabilidad negativa
    E: Error muestral

  - **Comparación de dos sistemas**
    En muchas situaciones, se desea comparar dos sistemas elegidos. Por ejemplo, es posible comparar dos sistemas de programación o de manejo de materiales diferentes para determinar cuál produce mejores resultados.

    El procedimiento general usado para comparar dos sistemas, se refiere a los sistemas analizados como *Sistema A (Original)* y *Sistema B (Propuesto),* y asume que se tiene *n* repeticiones de cada uno de los sistemas. Sea denotada X_{ai} y X_{bi} la observación registrada en la replicación i^{th} de los sistemas A y B, respectivamente, y sea d_i la diferencia entre los sistemas A y B de la replicación i^{th} (es decir, $d_i = X_{ai} - X_{bi}$). Se puede organizar estos valores como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Comparación de dos sistemas

RÉPLICA	SISTEMA A	SISTEMA B	DIFERENCIA
1	*Xa1*	*Xb1*	*d1*
2	*Xa2*	*Xb2*	*d2*
.	**.**	**.**	**.**
n	*Xan*	*Xbn*	*dn*

Nota. Fuente: Pegden, C.D., Shannon, R.E., and Sadowski, R.P., (1995), Introduction to simulation using SIMAN, McGraw-Hill Corp.

Se aproxima el problema de comparación de los dos sistemas mediante el desarrollo de un intervalo de confianza en la cantidad *δ,* que es el valor esperado de *di.* De esta manera, el problema de comparación de dos sistemas se reduce a la estimación de un solo parámetro, *δ.* El intervalo de confianza resultante se conoce como un intervalo de confianza t pareada.

Aunque otros métodos pueden ser utilizados para comparar los dos sistemas, esta técnica es atractiva por varias razones. En primer lugar, no se asume que la varianza de X_{ai} y X_{bi} es igual. En segundo lugar, no se asume que X_{ai} y X_{bi} son independientes, y es necesario asumir que las observaciones del *sistema A* y en el *sistema B* son independientes.

El procedimiento para el cálculo del intervalo de confianza *δ* es exactamente el mismo que para el caso de un solo sistema. Se empieza calculando *đ, s(d),* y *s(đ),* de la siguiente manera:

$$đ = \sum_{i} \frac{\boldsymbol{di}}{\boldsymbol{n}}$$

Ecuación 6. Media de diferencias en prueba t pareada

$$\boldsymbol{S(d)} = \sqrt{\sum_{i} \frac{(\boldsymbol{di} - đ)^2}{\boldsymbol{n-1}}}$$

Ecuación 7. Deviación estándar en prueba t pareada

$$\boldsymbol{s}(đ) = \frac{\boldsymbol{s(d)}}{\sqrt{\boldsymbol{n}}}$$

Ecuación 8. Parámetro del intervalo de confianza

El ancho de un intervalo de confianza 1-α en δ centrada en *d* viene dada por:

$$\boldsymbol{h = tn-1, 1-\alpha/2s}(đ)$$

Ecuación 9. Ancho del intervalo en prueba t pareada

Se plantea dentro del sistema una hipótesis nula donde la diferencia $\bar{d}$ es igual a 0 y a su vez una hipótesis alternativa donde la diferencia $\bar{d}$ es diferente de *0*. Dado esto, entonces, se debe tener en cuenta que si los dos sistemas se realizan de forma idéntica, el valor esperado de $\bar{d}$ es 0. Por lo tanto, si el intervalo de confianza de la diferencia calculado contiene 0, los dos sistemas no son necesariamente los mismos; pero repeticiones adicionales puede ser necesarias para discernir cualquier diferencia. Por lo tanto, no se pueden extraer conclusiones de los resultados cuando el intervalo contiene 0. Y finalmente, si el intervalo de confianza no contiene 0, se concluye de que los sistemas son diferentes, y seleccionamos el mejor entre los dos sistemas con base a la señal de $\bar{d}$

- **Entorno de simulación ARENA**
  Arena es un entorno gráfico que asiste en la implementación de modelos orientados al proceso. Contiene un conjunto de bloques que representan gráficamente los diversos tipos de procesos agrupados en categorías en función de su complejidad. Los bloques se enlazan para representar el flujo de entidades entre ellos, y también permite fácilmente crear cuadros en los que se muestren los valores de variables del modelo según transcurre la simulación.

- **Simulación Usando SIMAN**
  SIMAN es un lenguaje orientados a procesos, en el existen dos utilidades que permiten el modelar y experimentar. Un modelo contiene las instrucciones ejecutables (la lógica), estás instrucciones se llaman bloques; un experimento contiene las condiciones experimentales, en ella se definen las variables, atributos, recursos, fila y otros. El experimento las instrucciones se llaman elementos.

- **Ventajas de la simulación**
  - Permite analizar el efecto sobre el rendimiento global de un sistema, de pequeños cambios realizados en una o varias de sus componentes.
  - A partir de la experimentación con un modelo, es posible analizar los efectos sobre el sistema real de cambios organizativos, o de cambios en la gestión de la información.
  - El análisis del modelo del sistema puede permitir la sugerencia de posibles mejoras del sistema real, así como detectar las variables más influyentes en el rendimiento del mismo.
  - Permite la experimentación en condiciones que podrían ser peligrosas o de elevado coste económico en el sistema real.
  - La simulación suele ser utilizada también con una perspectiva pedagógica para ilustrar y facilitar la comprensión de los resultados que se obtienen mediante las técnicas analíticas.

3.5. ANALISIS COSTO BENEFICIO

Un enfoque más cuantitativo para decidir entre las alternativas es un *análisis costo*-beneficio. Este enfoque requiere cinco pasos:

1. Determinar que cambia debido a un mejor diseño, es decir, incremento en la productividad, mayor calidad, menos lesiones, entre otros.
2. Cuantificar estos cambios (beneficios) en unidades monetarias.
3. Determinar los costos requerido para implantar los cambios.
4. Dividir el costo entre el beneficio para cada alternativa, a fin de crear una razón.
5. La razón más pequeña establece la alternativa deseada.

El paso 2 es el más difícil de evaluar y cuantificar. No siempre es posible asignar valores en unidades monetarias; en ocasiones pueden ser porcentaje de cambios, lesiones o algún otro valor.

4. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE GESTIÓN ACTUAL DE MANTENIMIENTO.

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

4.1.1. Reseña histórica

Riopaila Castilla S.A. Es una empresa agroindustrial colombiana con 84 años de experiencia en el mercado nacional e internacional en la producción y comercialización de azúcar, miel y alcohol. Actualmente es líder en la producción de azúcar en Colombia con el 21,65% de participación.

En el año 1920, la empresa inicia como un trapiche panelero y para el 24 de septiembre de 1928 Don Hernando Caicedo, aguerrido empresario vallecaucano, inaugura el Ingenio Riopaila S.A. e instala la fábrica en el municipio de La Paila, al sur del municipio de Zarzal.

En el año 1940, se inicia el trapiche panelero, para cinco años después Don Hernando Caicedo inaugurarlo como Ingenio Central Castilla S.A. e instalar la fábrica azucarera en Pradera, Valle.
El ingenio azucarero durante los años siguientes ha venido realizando diversas actividades para el desarrollo de la comunidad, en las que se encuentra:

- Apoyo a la actividad educativa con la creación de la Escuela Belisario Caicedo y Escuela San Martín de Porres, para el servicio de los hijos de los trabajadores y de la comunidad.
- Creación de la Fundación Caicedo González, con el objetivo de atender el desarrollo social de la población vulnerable perteneciente a comunidades de área de influencia de las empresas Ingenio Riopaila S.A. y Central Castilla S.A.
- Apoyo a la construcción de vivienda para trabajadores con una urbanización de 120 casas en el corregimiento de La Paila, Zarzal (Valle del Cauca). Construcción y donación el Ejército Nacional de Colombia, la Base Militar de Tesorito en el Municipio de Zarzal.
- Apoyo a la recreación y deporte con la construcción del Centro Deportivo y un teatro en el Ingenio Riopaila S.A., para eventos culturales y proyección de películas al servicio de sus trabajadores y de la comunidad de la Paila, Zarzal. 1967, Ingenio Riopaila S.A.
- Apoyo a la creación del Instituto para el Desarrollo de La Paila, IDLA, destinado a la formación y generación de empleo de las esposas de los trabajadores de la empresa.
- Con recursos donados por Ingenio Riopaila S.A. se crea la Escuela Obrera de La Paila para formar a la comunidad del corregimiento en artes y oficios requeridos por Ingenio Riopaila S.A. y Colombiana S.A.
- En terrenos donados por Ingenio Riopaila, con recursos de la empresa, los trabajadores y la Fundación Caicedo González, se construye un Centro Recreacional en el Corregimiento de La Paila (Zarzal) para el servicio de los trabajadores, sus familias y la comunidad, hoy operado por la Caja de Compensación Familiar del Valle del Cauca, Comfandi.
- Creación de la beca Hernando Caicedo Caicedo para los estudiantes egresados del colegio interesados en realizar posgrados.

- En su búsqueda por el crecimiento y la sostenibilidad, realiza un importante plan de crecimiento y diversificación en otras regiones:
- Puesta en marcha la refinería de Central Castilla y se ensancha la refinería de Ingenio Riopaila.
- Riopaila Industrial S.A. y Castilla Industrial S.A. se fusionan, dando origen a Riopaila Castilla S.A., la cual dispone de dos plantas fabriles. La Planta Riopaila ubicada al norte del Valle del Cauca (en La Paila, Zarzal) y, la Planta Castilla, al sur del Valle del Cauca, en Pradera. Inicio de programa de Agricultura de Precisión, tecnología para la eficiencia y conservación del suelo.
- Riopaila Castilla inicia operaciones en el proyecto la Conquista en el departamento del Meta, con el suministro de caña a Bioenergy Zona Franca SAS.
- Riopaila Castilla firma acuerdo por el Derecho a la Felicidad adquisición de tierras en el departamento de Vichada para la siembra de Palma y Soya.

4.1.2. Marco estratégico

Misión

Empresa agroindustrial dedicada al cultivo y procesamiento de la caña de azúcar para elaborar productos y prestar servicios acordes con las necesidades del mercado nacional e internacional, creando valor económico, valor social y sostenibilidad ambiental para los accionistas, colaboradores y demás grupos de interés.

Visión 2020

Ser una corporación agroindustrial diversificada e internacional que produce alimentos y energía en forma sostenible.

4.1.3. Portafolio de productos

Figura 4. Portafolio de productos de la empresa.
Fuente: Empresa objeto de estudio.

4.1.4. Certificaciones

Durante el año 2012 la compañía sostiene las siguientes certificaciones:

Figura 5. Certificaciones de la empresa
Fuente: Empresa objeto de estudio.

- Sello para Azúcar Blanco Especial - NTC 2085
- Sello para Azúcar Blanco - NTC 611
- Sello para Azúcar Crudo - NTC 607
- Sello para Melaza de Caña - NTC 587
- Sello para Azúcar Refinado - NTC 778

4.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR

- **Preparación y Extracción:** El proceso del azúcar inicia en el campo con labores de adecuación, preparación y siembra de la caña bajo buenas prácticas agronómicas. La fabricación del azúcar comienza en el patio de caña donde la caña se limpia, pica y desfibra, buscando propiciar altos niveles de extracción de sacarosa. La caña desfibrada alimenta los molinos obteniendo dos subproductos, jugo crudo y bagazo, el jugo crudo es la materia prima para la producción de azúcar, miel y alcohol, el bagazo se utiliza para generar el vapor que mueve los molinos y la generación de energía eléctrica que garantiza la operación de la fábrica, los excedentes son comercializados a la red eléctrica nacional.

- **Purificación:** el jugo crudo es sometido a un proceso de purificación que consiste en calentarlo y decantarlo, la decantación se lleva a cabo en clarificadores de donde surgen dos subproductos, jugo clarificado y la cachaza que se utiliza como abono orgánico para el mejoramiento de los campos.

- **Concentración y Purificación de Meladura:** el jugo clarificado es concentrado a través de un proceso de evaporación con el fin de extraer la mayor cantidad de agua posible y facilitar la cristalización de la sacarosa, este subproducto es denominado meladura.

- **Cristalización:** la meladura es llevada a los tachos donde es sometida a la cristalización para producir azúcar blanco directo, este proceso consiste en transferir

la sacarosa de la meladura a un grano de azúcar muy fino lo que permite el mayor crecimiento del grano de azúcar.

- **Separación:** el material obtenido pasa al proceso de centrifugación donde se hace la separación de la miel y los cristales de azúcar, la miel pasa al envasado de miel final o las destilerías donde se producirán diferentes tipos de alcoholes, los cristales pasan al proceso de secado o al de refinado.

- **Secado:** los cristales de azúcar se secan por medio de aire caliente con el objetivo de eliminar humedad, luego se llevan al área de empaque donde son envasados en las diferentes presentaciones que ofrece la empresa, para los canales autoservicios, tradicional, industria y exportaciones.

- **Refinado:** consiste en disolver cristales de azúcar, someter el licor a un proceso de purificación, una etapa de cristalización, separación y secado

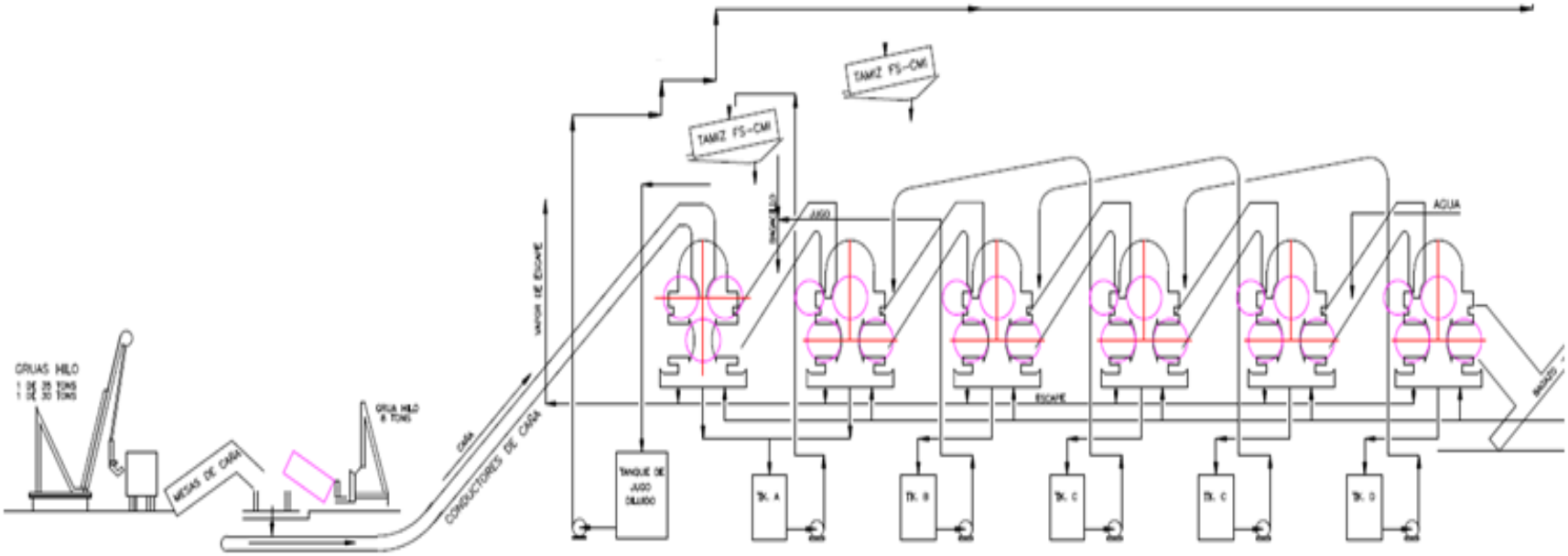


Figura 6. Diagrama de proceso de producción de preparación y molienda de caña
Fuente: Ingenio objeto de estudio

4.3. MODELO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO EN LA EMPRESA

4.3.1. Estructura

El sistema de mantenimiento de fábrica se encuentra constituido por las áreas funcionales de mantenimiento mecánico, planeación y confiabilidad de mantenimiento, e instrumentación y electricidad como entidades encargadas directamente de actividades ligadas al mantenimiento. Además se agregan otras áreas cuyas funciones productivas se complementan con el mantenimiento que logran realizar a los equipos que hacen parte de su responsabilidad como preparación y molienda de caña y generación de vapor.

Las funciones primordiales por cada área se caracterizan así:

Mantenimiento mecánico: encargado de atender y controlar las emergencias y ejecutar proyectos de mejoramiento.

Planeación y confiabilidad del mantenimiento: es un área de apoyo, enfocada en la programación y planificación, soportados en actividades de mantenimiento preventivo y predictivo, así como la ejecución de procedimientos de lubricación e intervención de maquinaria,

Electricidad e instrumentación: área encargada de suministrar energía eléctrica a la planta de manera continua, garantizar disponibilidad de los equipos eléctricos, de medición y control.

Generación vapor: mantener funcionando las calderas para generar el vapor necesario a través del aprovechamiento del ciclo del agua mediante el uso de bagazo para calentarla y brindar la materia prima principal a los turbogeneradores de la planta eléctrica.

Preparación y molienda de caña: transformar la caña de azúcar en jugo diluido a través de la presión mecánica que ejercen los molinos sobre la materia prima.

De esta forma el sistema de gestión de mantenimiento de la planta es coordinado por el área de planeación y confiabilidad de mantenimiento en conjunto con el área de instrumentación y electricidad que a su vez ejecuta labores como lo hace el área de mantenimiento mecánico.

Las áreas de mantenimiento mecánico y eléctrico cuentan con supervisores especializados encargados de atender las necesidades de mantenimiento de las diferentes áreas de la fábrica y de asegurar el cumplimiento de las actividades programadas a nivel táctico. Para realizar las acciones de reparación existe un taller mecánico responsable de la buena fabricación y reparación de las maquinarias de la planta y un taller eléctrico responsable de la distribución interna de energía eléctrica y el buen funcionamiento de los equipos eléctricos.

La coordinación de planeación de mantenimiento cuenta con analistas para cada área operacional del proceso como patios y molinos de caña, calderas y elaboración, que son los

responsables de generar y actualizar la información de la ejecución de actividades de mantenimiento e indicadores de gestión del área y a su vez realizan la programación de actividades de mantenimiento.

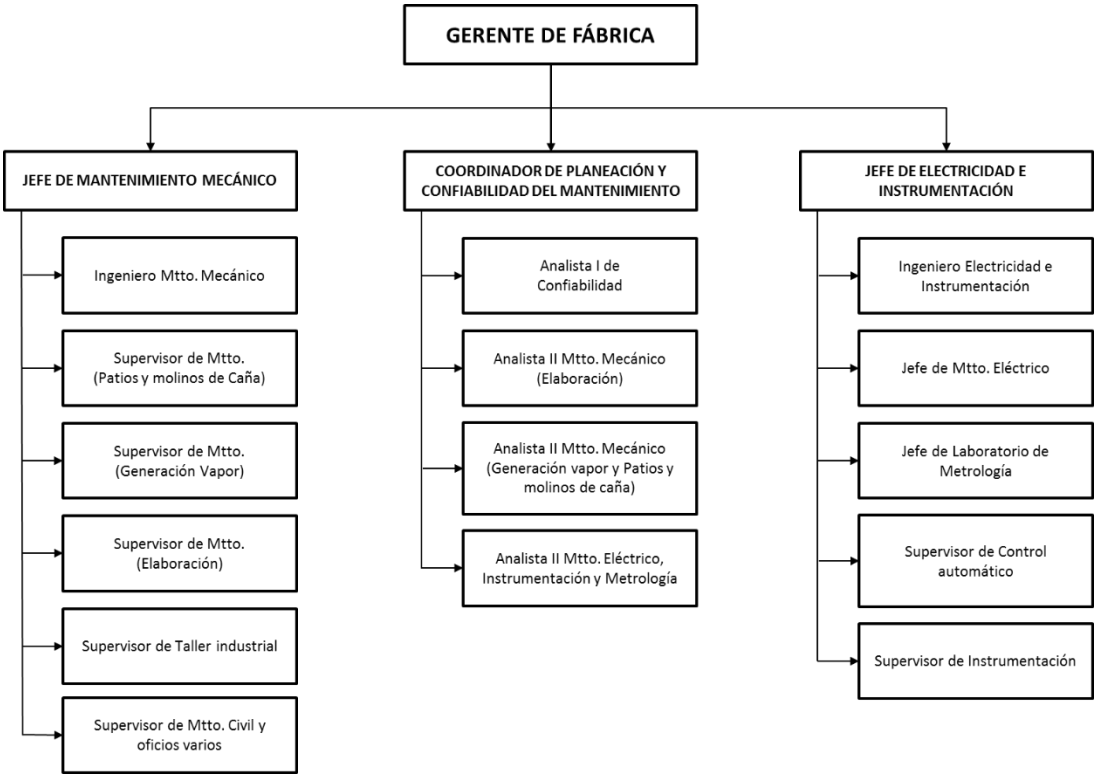


Figura 7. Estructura de la unidad de mantenimiento de fábrica
Fuente: Ingenio objeto de estudio

4.3.2. Actividades de mantenimiento

El mantenimiento que se ejecuta en la empresa se basa en (ver figuras 8 y 9):

- Mantenimiento Preventivo
- Mantenimiento Correctivo
- Mantenimiento Predictivo

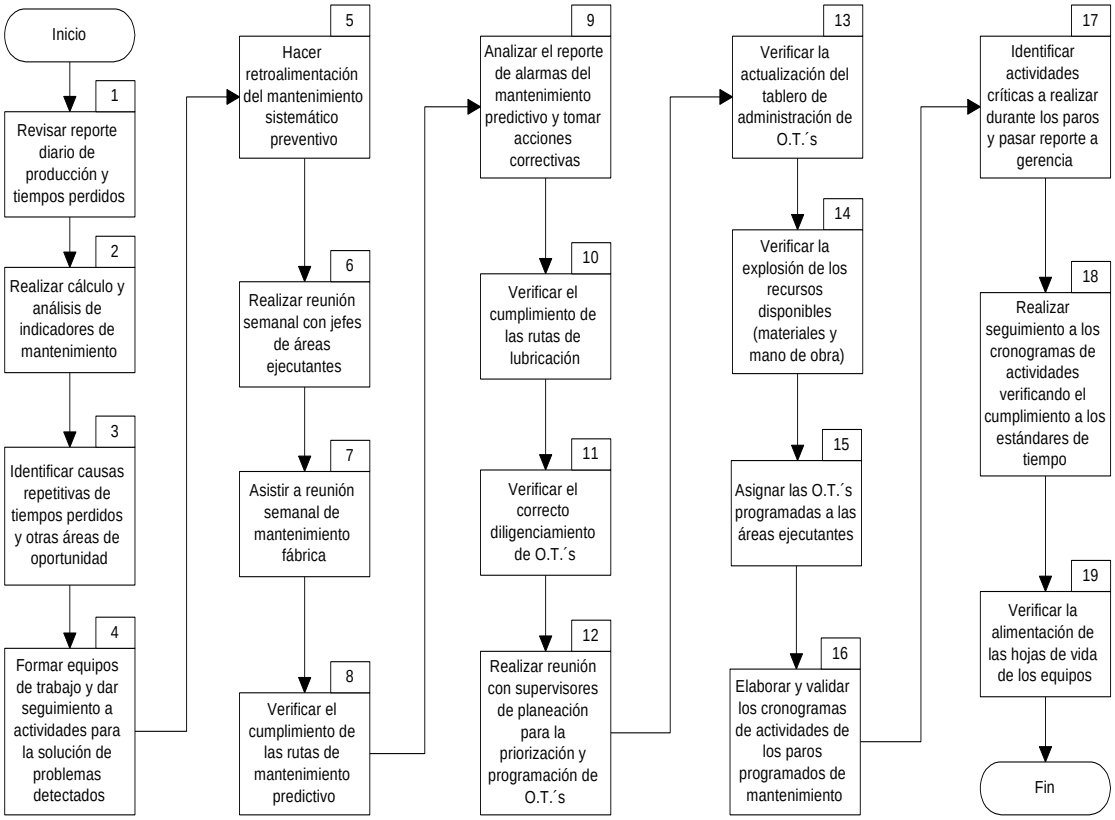


Figura 8. Preparación del mantenimiento preventivo y predictivo
Fuente: Ingenio objeto de estudio

Al identificar una falla en los equipos de fábrica se solicita al supervisor de mantenimiento responsable del área, mediante el diligenciamiento de una orden de trabajo, la solución de la misma.

Las fallas reportadas en los equipos requieren que el jefe de mantenimiento mecánico realice en conjunto con el operador de dicho equipo, el supervisor de operación y el supervisor de mantenimiento responsable del área, una valoración de la falla para definir la urgencia de la misma dentro de la orden de trabajo.

Cuando se genere una orden de trabajo urgente, se realiza el proceso de asignación de personal encargado de ejecutarla, se debe anotar en la OT la fecha y hora de inicio de la reparación, la ficha de cada persona asignada y la labor que ejecutará cada una de ellas.

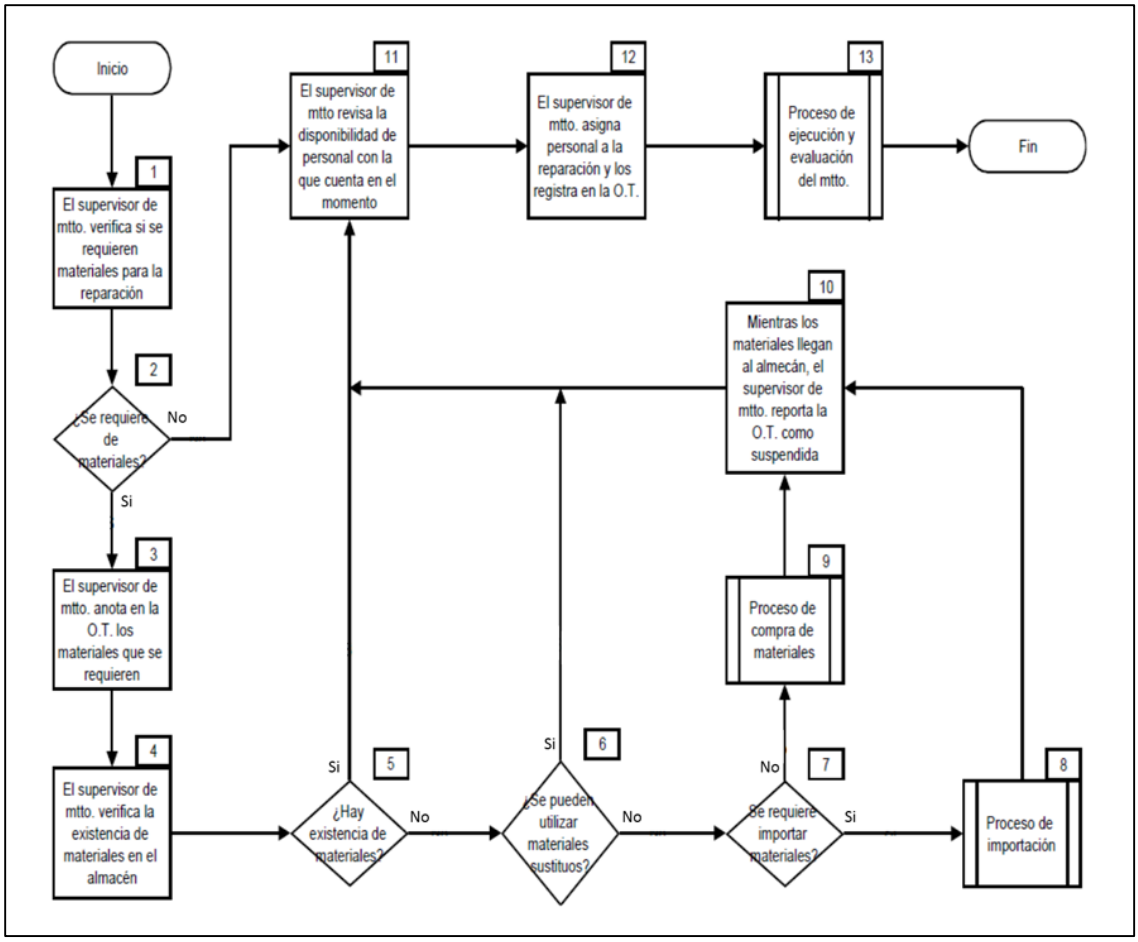


Figura 9. Preparación del mantenimiento correctivo
Fuente: Ingenio objeto de estudio

El supervisor de mantenimiento del área debe realizar la verificación que en el almacén existan los materiales necesarios para las reparaciones programadas y urgentes para ejecutar las actividades eficientemente. Sin embargo en el caso de que se trate de reparaciones urgentes y no existan materiales necesarios en el almacén, se realiza una búsqueda de materiales sustitutos para la ejecución de la reparación. Se puede tratar de materiales obsoletos que existan en el almacén o de materiales de desechos que se encuentren en el patio.

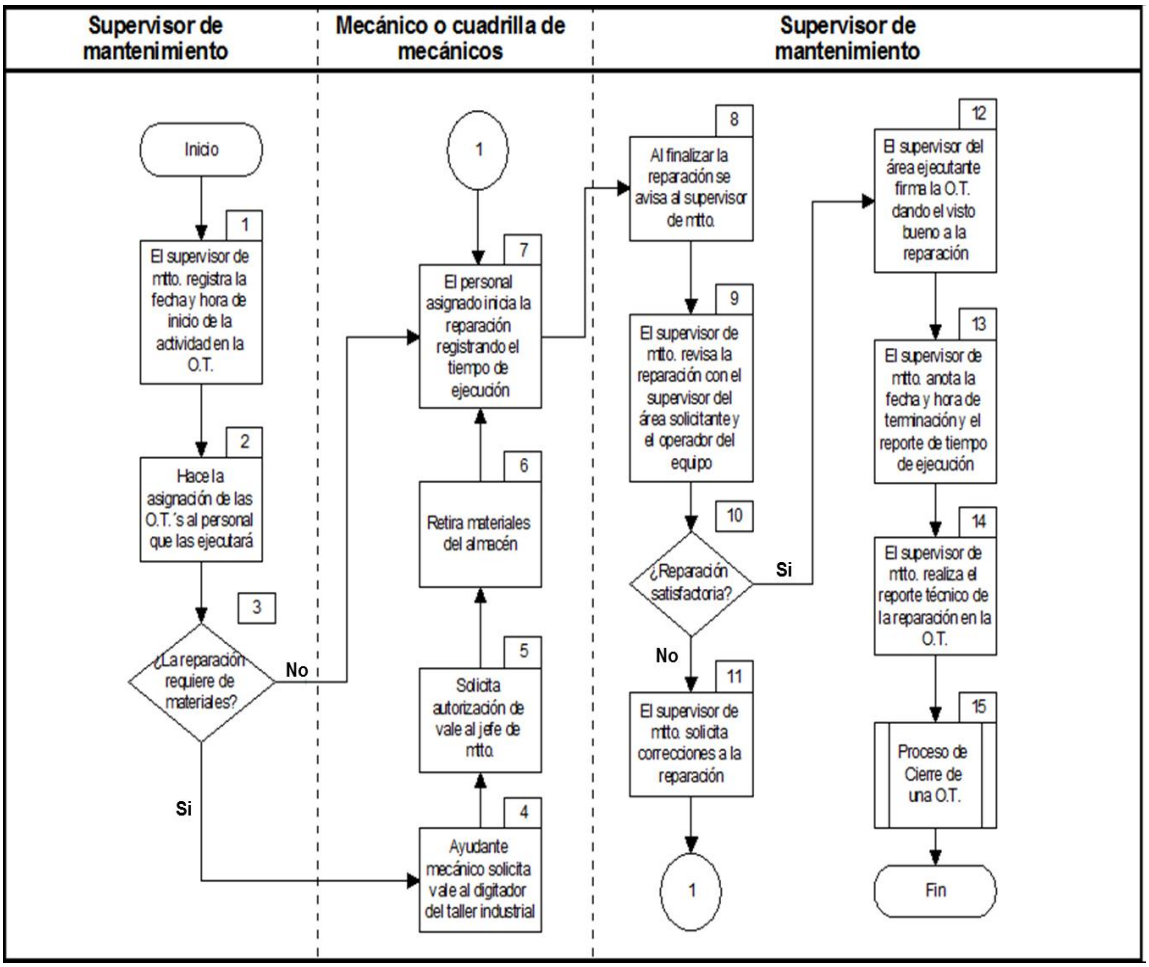


Figura 10. Ejecución del mantenimiento de fábrica
Fuente: Ingenio objeto de estudio

Posteriormente cuando se haya concluido la reparación, se debe hacer la evaluación de la misma con el personal de supervisión y operación del área correspondiente para que estos últimos firmen el visto bueno de la reparación en la orden de trabajo y finalmente se entrega al analista de planeación responsable la copia para que ingrese al sistema de órdenes de trabajo la información sobre las actividades realizadas, datos Técnicos y causas del daño del equipo de acuerdo al proceso de administración de órdenes de trabajo (ver figura 10).

En casos donde se presentan fallas de mantenimiento mayor y se requiera de la contratación de terceros para la reparación del equipo, se realiza el proceso de llamado a contratistas para solicitar cotizaciones del servicio requerido y coordinar los tiempos del mismo.

Los procesos de mantenimiento son soportados mediante la realización de reuniones semanales de mantenimiento de fábrica, en donde se presentan los indicadores de disponibilidad de equipos de fábrica, cumplimiento al programa semanal de mantenimiento, órdenes de trabajo correctivas, utilización de horas hombre y costo de horas extras de mantenimiento, y así mismo se hacen comentarios generales de las diferentes áreas.

4.3.3. Tecnología de información

La empresa dispone de un software para el manejo integral de los recursos SAP (Sistemas, Aplicaciones y Productos en Procesamiento de Datos), que está formado por un conjunto de módulos (Logística, Financiera, Recursos Humanos, Mantenimiento, entre otros) que conforman las diferentes funciones del sistema.

El software de información se encuentra implementado y adaptado a los requerimientos de la gestión de mantenimiento y activos de la empresa, el cual cuenta con información sistematizada de los equipos en aspectos relevantes para el control de mantenimiento, y asignados perfiles de acceso a esta información según las necesidades de cada cargo y funciones. De igual forma el sistema de información permite visualizar ordenes de trabajo por tipo de mantenimiento, avisos de mantenimiento, hojas de ruta, ubicación técnica, lista de materiales de equipos, la programación de órdenes de trabajo de mantenimiento, informes de paradas y reportes de fallas. Simplificando la gestión de mantenimiento y obteniendo acceso rápido e información completa de los datos de mantenimiento.

4.4. EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO DE LA EMPRESA

El diagnóstico de la gestión de mantenimiento se consolida a través de la recolección de información documental, observación directa, realización encuestas y entrevistas dirigidas a jefes, supervisores y analistas de las áreas directamente involucradas con la programación, planeación y ejecución del mantenimiento de la planta, y la revisión documental de la información suministrada por el personal, para así conocer el estatus de la unidad de gestión de mantenimiento en termino individual y global, identificando las fortalezas y puntos de mejora de acuerdo a la matriz de mantenimiento clase mundial, que permita a posteriori, implementar un plan de trabajo en la medida que apunte a su mejoramiento.

Las encuestas y entrevistas de la gestión de mantenimiento se realizaron teniendo en cuenta 10 criterios de evaluación, en los cuales se aglomeran los aspectos que comprenden la administración general de mantenimiento; estos criterios son:

a. **Estrategia de mantenimiento:** Este factor evalúa las políticas de mantenimiento y la alineación de la estrategia del sistema respecto a la estrategia corporativa, además examina la capacidad de identificar, definir, implementar y ejecutar acciones para mejorar continuamente a mediano y largo plazo.

b. **Administración y Organización:** Este aspecto evalúa la caracterización de la estructura organizacional teniendo en cuenta la gestión del talento humano, proveedores y relaciones entre eslabones de la empresa con el área de mantenimiento.

c. **Planeación y Programación:** Este componente evalúa el modo de direccionar los recursos humanos, financieros, tecnológicos y logísticos para realizar operaciones de mantenimiento teniendo en cuenta la planeación, programación, ejecución y mejoramiento de los procesos del área.

d. **Tácticas de mantenimiento:** Esta área evalúa las técnicas de mantenimiento usadas para realizar las operaciones de planeación, análisis, control y ejecución en los equipos de la empresa aplicando metodologías adaptadas a las condiciones especiales de cada organización como TPM, RCM, CBM, entre otros.

e. **Medidas de desempeño:** Este elemento evalúa la capacidad de reflejar los resultados del sistema de gestión de mantenimiento en indicadores establecidos, así como la confiabilidad del análisis de la información que se lleva en la actualidad.

f. **Tecnología de información:** En este aspecto se examina la capacidad del sistema computarizado de administración de mantenimiento (CMMS) para almacenar de forma ordenada la información recolectada durante las actividades de mantenimiento, su nivel de utilización respecto a lo que se está haciendo con el sistema frente a lo que puede hacer y su nivel de interacción con los subsistemas de la organización.

g. **Participación del empleado:** En este factor se analizan los mecanismos disponibles para garantizar la interacción entre los empleados y acciones emprendidas por los empleados para cumplir la misión del sistema de mantenimiento y así mismo su contribución a la estrategia corporativa.

h. **Análisis de confiabilidad:** Esta área evalúa la efectividad de las metodologías de análisis y modelamiento de confiabilidad que se utilizan en la organización para mejorar procesos de mantenimiento y así contribuir a tomar decisiones con un menor grado de riesgo.

i. **Análisis de los procesos:** Este aspecto revisa el nivel de documentación de los procedimientos para ejecutar las actividades de mantenimiento así como los procesos de revisión y actualización de los mismos.

j. **Infraestructura e instalaciones:** Este elemento evalúa la calidad de la información de los equipos almacenadas en el sistema computarizado de mantenimiento teniendo en cuenta su estructuración y jerarquización.

El listado de preguntas para los criterios fue determinado y validado de acuerdo a los factores que sustentan el mantenimiento clase mundial (WCM), diagnósticos y auditorias de la gestión de mantenimiento realizada en diversas empresas.

4.4.1. Encuestas

Las reuniones de mantenimiento, las visitas en las instalaciones, talleres y oficinas, y la interacción con el personal de las diferentes áreas de la compañía, fueron fundamentales para identificar las personas que hacen parte del mantenimiento de fábrica y a las cuales se les realizaría la encuesta.

Tabla 8. Personal administrativo de mantenimiento

CARGO	CANTIDAD	ÁREA
Jefe de área	1	Molinos
Ingeniero auxiliar	1	
Supervisor de área	3	
Jefe de área	1	Generación vapor
Supervisor de área	2	
Jefe de área	1	Electricidad e instrumentación
Ingeniero auxiliar	1	
Supervisor de área	3	
Metrólogo	1	
Jefe de área	1	Mantenimiento mecánico
Ingeniero auxiliar	1	
Supervisor de área	4	
Coordinador de área	1	Planeación y confiabilidad de mantenimiento
Analista de mantenimiento	3	
Coordinador de área	1	Mejoramiento y productividad
Total	**25**	

Nota. Fuente: Ingenio objeto de estudio

- **Realización de la encuesta**

  La encuesta fue construida de acuerdo a un programa de entrenamiento de un equipo de expertos de una empresa consultora en mantenimiento clase mundial (WCM)[4], en la cual se desarrolla la evaluación del sistema de mantenimiento con una escala de 1 a 10 para cada pregunta dentro de los criterios anteriormente señalados. El cuestionario diseñado contiene un total de 71 preguntas adaptadas al ingenio azucarero, estos interrogantes abarcan los principales aspectos de la gestión de mantenimiento según la matriz WCM y apoyados en la norma internacional PAS 55 de gestión de activos. La encuesta fue diligenciada por el personal administrativo de mantenimiento en la empresa (ver tabla 9), y de acuerdo a la percepción que el

[4] Murillo, W. M. (2008). Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Programa de Entrenamiento: Mantenimiento Clase Mundial. RCM Ingeniería.

personal poseía sobre cada uno de los criterios evaluados del sistema de gestión del mantenimiento de la empresa calificaba los interrogantes planteados (ver anexo 1).

El consolidado de las encuestas fue determinado mediante un puntaje máximo otorgado a cada pregunta dentro de los criterios de evaluación definidos.

- **Resultados de la encuesta**

Tabla 9. Resultados encuestas del sistema de gestión de mantenimiento

EVALUACIÓN DE LA ORGANIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO[5]		
PARÁMETRO EVALUADO	**PUNTAJE**	**%**
Análisis de confiabilidad	5,42	54,21%
Medidas de desempeño	6,07	60,68%
Administración y organización	6,57	65,74%
Estrategia de mantenimiento	6,64	66,41%
Análisis de los procesos	6,68	66,82%
Participación del empleado	6,87	68,70%
Infraestructura e instalaciones	6,93	69,27%
Tácticas de mantenimiento	7,06	70,58%
Planeación y programación	7,16	71,65%
Tecnología de información y uso	7,18	71,76%
PROMEDIO	**66,58%**	

Nota. Fuente: Los autores.

La información suministrada a través de las encuestas por el personal operativo y administrativo del sistema de mantenimiento de la empresa, califican el nivel de gestión como consciente y conocedor, según la escala utilizada, lo cual sugiere que la empresa se encuentra en un grado donde se pueden apreciar los siguientes aspectos:

- Realización de planes de mantenimiento a un año, lo cual se evidencia en la implantación de la metodología PHVA donde se exige anualmente a las áreas generar un plan de gestión que agregue valor por encima de las labores de rutina.
- La administración del mantenimiento cuenta con grupos descentralizados de diferentes disciplinas al tener áreas específicas de mecánica, electricidad, instrumentación y planeación.
- Se aprecian grupos de ingeniería de mantenimiento establecidos como el área de mantenimiento mecánico así como el área de instrumentación y electricidad.

[5] Los datos procesados de las encuestas de la gestión del mantenimiento reposan en un archivo de Excel® que se adjunta con este documento (ANALISIS DE ENCUESTAS DE GESTION DE MANTENIMIENTO.xlsx)

- La planeación y programación del mantenimiento se realizan basadas en las condiciones de los equipos, esto se puede observar en las inspecciones que realizan los analistas de planeación y confiabilidad de mantenimiento a través del proceso productivo para determinar que equipos se encuentran deteriorados o presentando síntomas de mal funcionamiento y así definir actividades de reparación.
- Se observa que manejan indicadores de tiempos de paradas en los equipos con causa ya que se emite un informe cuando se realizan paros emergentes en la planta discriminando el tipo de falla, fecha y hora de inicio, duración en horas y una breve descripción del evento; sin embargo, los costos de reparación no se discriminan dentro de estos informes.
- Disponen del módulo PM de SAP el cual es un software de gestión de mantenimiento convencional y en la compañía no está ligado a otros sistemas.
- Tiene definido un grupo de mejoramiento para mantenimiento enfocado en los tiempos perdidos de producción.

4.4.2. Entrevistas

Las entrevistas fueron realizadas a los gerentes de cada área funcional de la fábrica, evaluando los aspectos de mantenimiento en los que influyen directamente.

Tabla 10. Personal entrevistado

ÁREA	CARGO
Preparación y Molienda de Caña	Jefe de área
Generación Vapor	Jefe de área
Electricidad e Instrumentación	Jefe de área
Mantenimiento Mecánico	Jefe de área
Planeación y Confiabilidad de Mantenimiento	Coordinador de área
Mejoramiento y Productividad	Coordinador de área

Nota. Fuente: Ingenio objeto de estudio

- **Realización de la entrevista**

  El cuestionario desarrollado para la entrevista abarca en cada criterio de evaluación preguntas específicas acerca de aspectos centrales básicos de la gestión del mantenimiento, en donde cada jefe de área entrevistado, calificaba dando respuestas puntuales a los ítems evaluados, según los procesos de administración y ejecución del mantenimiento que actualmente el área realiza (Ver Anexo 2).

  Para la entrevista fue necesario determinar el peso o importancia relativa de las áreas que intervienen en la gestión de mantenimiento de la empresa respecto a los

criterios de evaluación a través de la herramienta multicriterio AHP[6]. La aplicación del proceso de análisis jerárquico se enmarca dentro de obtención de la ponderación de cada aspecto según el área a evaluar a través de la comparación de ellas según los factores de evaluación utilizados en el diagnóstico (ver tabla 11).

Para el desarrollo del proceso analítico jerárquico (AHP) se precisó la participación del área de planeación y confiabilidad de mantenimiento, quién es la encargada formalmente de garantizar la disponibilidad de los activos fijos que hacen parte del sistema de producción, mediante la planeación y programación del mantenimiento, por tanto, posee una visión global y objetiva de los factores involucrados en el sistema. Por esta razón, la intensidad de importancia de las áreas definidas para la evaluación del sistema de gestión de mantenimiento fue realizada en conjunto con el coordinador del área de planeación y confiablidad, quién a su vez obtiene la mayor responsabilidad en los resultados de la evaluación con un 40,40% y con una participación menor del 10,40% se encuentra la coordinación de mejoramiento y productividad.

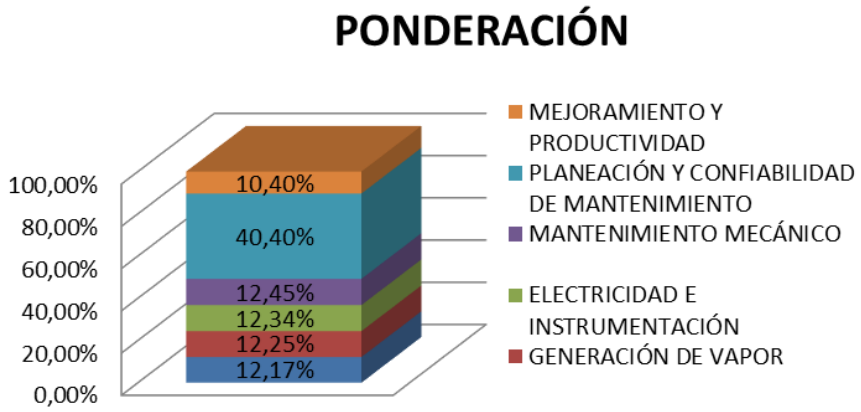


Figura 11. Ponderación total de las áreas evaluadas
Fuente: Los autores

[6] La realización del Proceso Analítico Jerárquico se fundamenta en el libro **de** Duffuaa Raouf Dixon. (2009). Sistemas de Mantenimiento: Planeación y Control. México: Limusa Wiley.

Tabla 11. Resultados AHP para la entrevistas de la gestión de mantenimiento

PRIORIDAD DE CRITERIOS[7]					
FACTORES DE EVALUACIÓN	**ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO**	**PLANEACIÓN Y PROGRAMACIÓN**	**ADMINISTRACIÓN Y ORGANIZACIÓN**	**RECURSO HUMANO**	**MEDIDAS DE DESEMPEÑO**
Patios y molinos de caña	0,182	0,077	0,200	0,102	0,167
Generación vapor	0,182	0,077	0,200	0,129	0,167
Electricidad e instrumentación	0,182	0,077	0,200	0,160	0,167
Mantenimiento mecánico	0,182	0,077	0,200	0,199	0,167
Planeación y confiabilidad de mantenimiento	0,216	0,692	0,200	0,250	0,167
Mejoramiento y productividad	0,055	0,000	0,000	0,160	0,167
PRIORIDAD DE CRITERIOS	**0,026**	**0,037**	**0,040**	**0,028**	**0,069**
COEF. DE CONSISTENCIA[8]	**0,013**	**0,000**	**0,000**	**0,044**	**0,000**
FACTORES DE EVALUACIÓN	**TECNOLOGÍA DE INFORMACIÓN**	**ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD**	**ANÁLISIS DE PROCESOS**	**TÁCTICAS DE MANTENIMIENTO**	**INSTALACIONES E INFRAESTRUCTURA**
Patios y molinos de caña	0,077	0,071	0,167	0,167	0,083
Generación vapor	0,077	0,071	0,167	0,167	0,083
Electricidad e instrumentación	0,077	0,071	0,167	0,167	0,083
Mantenimiento mecánico	0,077	0,071	0,167	0,167	0,083
Planeación y confiabilidad de mantenimiento	0,692	0,643	0,167	0,167	0,583
Mejoramiento y productividad	0,000	0,071	0,167	0,167	0,083
PRIORIDAD DE CRITERIOS	**0,068**	**0,130**	**0,163**	**0,163**	**0,277**
COEF. DE CONSISTENCIA	**0,000**	**0,000**	**0,000**	**0,000**	**0,000**

Nota. Fuente: Los autores

[7] Los datos procesados se encuentran en un archivo de Excel® que se adjunta con este documento (PONDERACION AHP ENTREVISTAS.xlsx)

[8] La matriz "intensidad de importancia" fue diligenciada por el coordinador de planeación y confiabilidad de mantenimiento y dirigida por los investigadores del proyecto, quienes garantizaron la aplicación correcta de la herramienta mediante preguntas claras, por esta razón, algunos coeficientes de consistencia tienen valores iguales a cero.

- **Resultados de la entrevista**

Las respuestas generadas por cada gerente de área daban como resultado general la percepción individual de cómo se encuentra el sistema de acuerdo a la matriz de mantenimiento clase mundial, y posteriormente esta información consolidaba la gestión de mantenimiento de la empresa[9].

Tabla 12. Resultados entrevistas del sistema de gestión de mantenimiento

EVALUACIÓN DE LA ORGANIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO[10]	
PARAMETRO EVALUADO	**%**
Análisis de confiabilidad	43,93%
Planeación y programación	55,45%
Participación del empleado	58,20%
Tácticas de mantenimiento	60,33%
Análisis de procesos	64,33%
Estrategia de mantenimiento	64,97%
Administración y organización	65,00%
Tecnologías de información	69,40%
Infraestructura e instalaciones	70,56%
Medidas de desempeño	73,64%
PROMEDIO	**62,58%**

Nota. Fuente: Los autores

La información suministrada a través de las entrevistas realizadas a cada encargado de área involucrado con actividades administrativas u operativas de mantenimiento muestra a la gestión del programa de mantenimiento en un nivel de no satisfactorio.

De acuerdo a los parámetros de la matriz de mantenimiento clase mundial y en contraste con el resultado particular de las encuestas se encuentra en un nivel inferior, debido a que la empresa solo realiza la planeación del mantenimiento preventivo y no planea a largo plazo, la administración del mantenimiento cuenta con poco personal especializado en la disciplina, realiza solo técnicas de inspección basadas en el tiempo, los indicadores de desempeño de la unidad consisten en algunos registros de paradas y costos de mantenimiento, que no se encuentran separados. El software de mantenimiento comprende algunos programas y registro

9 Los datos procesados de cada una de las entrevistas realizadas a los jefes de área reposan en diferentes archivos de Excel® que se adjunta con este documento (ELECTRICIDAD E INSTRUMENTACION.xlsx, GENERACION VAPOR.xlsx, MEJORAMIENTO Y PRODUCTIVIDAD.xlsx, MTTO MECANICO.xlsx, PATIOS Y MOLINOS.xlsx y PLANEACION Y CONF. MTTO.xlsx)

10 Los datos procesados del consolidado de las entrevistas reposan en un archivo de Excel® que se adjunta con este documento (ANALISIS ENTREVISTAS DE GESTION DE MANTENIMIENTO.xlsx)

de repuestos, se realizan algunas reuniones en seguridad en donde participa el personal de mantenimiento y finalmente los procesos de mantenimiento y los registros de fallas son usados y revisados con poca frecuencia.

4.4.3. Análisis documental y evidencias

La revisión documental fue necesaria para evidenciar y sustentar la veracidad de la información obtenida en las encuestas y entrevistas, de manera que de una forma objetiva se calificara la gestión de mantenimiento de la empresa de acuerdo a los mismos criterios de evaluación planteados inicialmente.

- **Resultados del análisis documental**

Tabla 13. Resultado análisis documental del sistema de gestión de mantenimiento

EVALUACIÓN DE LA ORGANIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO[11]	
PARAMETRO EVALUADO	**%**
Estrategia de mantenimiento	47,78%
Planeación y programación	52,84%
Administración y organización	84,06%
Participación del empleado	47,81%
Tecnologías de información	79,39%
Medidas de desempeño	32,82%
Tácticas de mantenimiento	45,12%
Análisis de procesos	37,50%
Infraestructura e instalaciones	75,00%
Análisis de confiabilidad	60,00%
PROMEDIO	**56,2%**

Nota. Fuente: Los autores

La información documental y evidencias suministradas por las diferentes áreas administrativas de la unidad de mantenimiento muestra a la organización con un nivel de mantenimiento no satisfactorio, lo cual implica que la empresa realice la planeación del mantenimiento preventivo y no planea a largo plazo, la administración del mantenimiento cuenta con poco personal especializado en la disciplina, realiza solo técnicas de inspección basadas en el tiempo, los indicadores de desempeño de la unidad consisten en algunos registros de paradas y costos de mantenimiento, que no se encuentran clasificados. El software de mantenimiento comprende algunos programas y registro de repuestos, se realizan algunas reuniones en seguridad en donde participa el personal de mantenimiento y finalmente los procesos de mantenimiento y los registros de fallas son usados y revisados con poca frecuencia.

[11] Los datos procesados para la revisión documental reposan en un archivo de Excel® que se adjunta con este documento (ANALISIS DATOS DOCUMENTALES.xlsx)

4.4.4. Consolidado de diagnóstico de la gestión de mantenimiento

El sistema de gestión de mantenimiento de la empresa se determina de acuerdo a los consolidados finales de las encuestas, entrevistas y análisis documental.

- **Resultados de la evaluación del sistema de gestión de mantenimiento**

Tabla 14. Resultados de evaluación del sistema de mantenimiento

EVALUACIÓN DE LA ORGANIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO[12]				
PARÁMETRO EVALUADO	**CALIFICACIÓN DE ENCUESTAS**	**CALIFICACIÓN DE ENTREVISTAS**	**CALIFICACIÓN DE ANÁLISIS DOCUMENTAL**	**PONDERACIÓN**
Análisis de confiabilidad	54,21%	43,93%	60,00%	52,71%
Medidas de desempeño	60,68%	73,64%	32,82%	55,71%
Análisis de procesos	66,82%	64,33%	37,50%	56,22%
Recurso humano	68,70%	58,20%	47,81%	58,24%
Tácticas de mantenimiento	70,58%	60,33%	45,12%	58,68%
Estrategia de mantenimiento	66,41%	64,97%	47,78%	59,72%
Planeación y programación	71,65%	55,45%	52,84%	59,98%
Administración y organización	65,74%	65,00%	84,06%	71,60%
Infraestructura e instalaciones	69,27%	70,56%	75,00%	71,61%
Tecnologías de información	71,76%	69,40%	79,39%	73,52%
PROMEDIO	**66,58%**	**62,58%**	**56,23%**	**61,80%**
MANTENIMIENTO NO SATISFACTORIO				

Nota. Fuente: Los autores

[12] Los datos procesados de la evaluación del sistema de gestión de mantenimiento reposan en un archivo de Excel® que se adjunta con este documento (CONSOLIDADO FINAL DIAGNOSTICO DE GESTION DE MANTENIMIENTO.xlsx)

Se puede observar que hay 7 factores cuya calificación da menor al promedio general, de esta forma se empiezan a focalizar aspectos a mejorar entre los que se encuentran:

- Estrategia de mantenimiento
- Planeación y programación
- Recurso humano
- Medidas de desempeño
- Tácticas de mantenimiento
- Análisis de procesos
- Análisis de confiabilidad

La menor calificación la obtiene el análisis de confiabilidad con un 52,71% y se consolida como uno de los aspectos críticos para mejorar. De igual forma se observa que la principal fortaleza del sistema de mantenimiento de la organización se centra en su tecnología de información con un puntaje consolidado del 73,52%.

- **Informe de diagnóstico del sistema de gestión de mantenimiento**
  La evaluación permitió valorar y analizar la situación actual de la gestión de mantenimiento de la empresa, con la identificación de problemas, puntos débiles y fuertes de las áreas evaluadas. Esta consolida a la organización con un nivel de mantenimiento no satisfactorio.

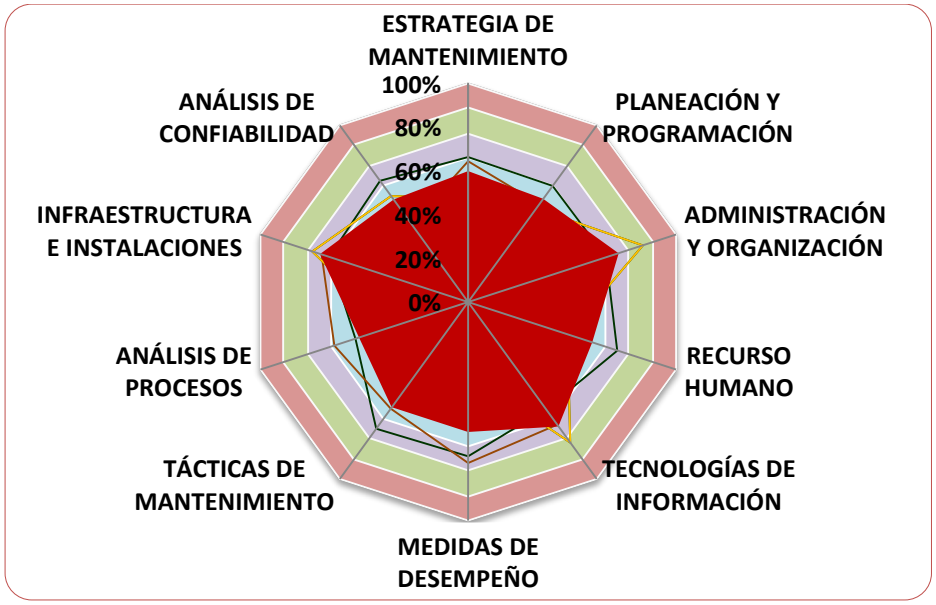


Figura 12. Diagrama diagnóstico del sistema de gestión de mantenimiento –WCM
Fuente: Los autores

A partir de la información obtenida de los resultados de la evaluación y junto con las observaciones[13] que se dieron en cada encuesta y entrevista realizada, los criterios de evaluación en los que se proyecta el resultado del diagnóstico de la gestión de mantenimiento de fábrica, teniendo en cuenta los parámetros de la matriz de mantenimiento clase mundial (ver figura 12), demuestran que la empresa tiene las siguientes fortalezas relevantes:

- Cuentan con un sistema de información (SAP) adaptado a las necesidades de gestión de mantenimiento y activos el cual tiene asignados perfiles de acceso a la información según las necesidades de cada cargo y funciones, la información referente a los equipos se encuentra sistematizada en aspectos relevantes de operación y distribución de planta, permite visualizar informes de paradas de fábrica, avisos y programación de órdenes de trabajo de mantenimiento.
- El área de mantenimiento se encuentra sincronizada con la necesidades del proceso productivo, así mismo los cargos dentro del área de mantenimiento se encuentran definidos y el cumplimiento de las funciones por parte de los trabajadores es ideal, los equipos se encuentran clasificados en el proceso productivo según la criticidad de las estaciones de trabajo y las actividades se facilitan gracias al sistema de órdenes de trabajo.
- Los activos de la empresa se encuentran sistematizados y la condición de ellos es inspeccionada frecuentemente, así mismo los hallazgos encontrados en cada equipo son priorizados según las necesidades del proceso productivo.

Sin embargo se señala algunas debilidades que actualmente dificultan el proceso idóneo de la gestión de mantenimiento dentro de la empresa causando el deterioro de los equipos, las fallas frecuentes, los tiempos perdidos que finalmente se ven reflejados en la productividad de la empresa. Estos aspectos corresponden principalmente a:

- No existe una metodología de gestión que permita modelar la confiabilidad y acceder a información precisa para planear las actividades de mantenimiento mediante sistemas de cálculo y aplicación de técnicas estadísticas.
- Las áreas de planeación y ejecución de mantenimiento no cuenta con una táctica estandarizada que permita incrementar la efectividad del sistema.
- El conocimiento adquirido es en gran parte empírico, los riesgos no se manejan adecuadamente y los empleados no identifican claramente las consecuencias de desviarse de la planeación.

[13] Las observaciones de la evaluación del sistema de gestión de mantenimiento reposan en un archivo de Word® que se adjunta con este documento (OBSERVACIONES.docx)

- Cada área perteneciente a la unidad de mantenimiento tiene establecido las políticas, objetivos, y planes para llevar a cabo sus funciones operacionales, sin embargo la empresa como unidad funcional no tiene establecido una política de mantenimiento y el plan estratégico de su gestión no está definido claramente.
- La fábrica no cuenta con índices estructurados de gestión de mantenimiento en cuanto a factores operacionales, de personal, logísticos, entre otros.

4.4.5. Análisis de criticidad de equipos

Para iniciar un proceso de mejora, es necesario focalizar esfuerzos en uno de los criterios que se identificaron como débiles en los resultados obtenidos por el diagnóstico del sistema de gestión de mantenimiento.

El análisis de confiabilidad fue uno de dichos criterios, lo que conlleva a la realización de planes de mejoramiento, pero a priori, es fundamental establecer los factores que involucran una mejora en el análisis de confiabilidad, es por ello, que a partir de información histórica y de establecer el indicador MTTR se realiza un análisis del estado de los equipos que finalmente refleja la gestión de las actividades de mantenimiento y su efectividad.

- **Tiempos perdidos por ocurrencia de fallas**
  A partir de la información suministrada por el software SAP-PM el cual es utilizado para la gestión del mantenimiento en la fábrica se obtiene que las fallas en los equipos representan el 45,32%, la principal causa de paradas que generan tiempos perdidos en la planta durante un periodo de 10 meses desde que se realizó el ultimo paro de producción para realizar actividades de mantenimiento de alto impacto en la planta.

Tabla 15. Causas de paradas de fábrica

PARADAS DE FÁBRICA			
CAUSA	**No. PARADAS**	**% No. PARADAS**	**% ACUMULADO NO. PARADAS**
Falla	445	45,32%	45,32%
Operacional	303	30,86%	76,17%
Externos	168	17,11%	93,28%
Proyectos	43	4,38%	97,66%
Programadas	23	2,34%	100,00%
Total general	**982**	**100,00%**	

Nota. Fuente: Los autores

Cada área funcional de la empresa es responsable de las causantes de tiempos perdidos, para el caso de las fallas que se presentan en los equipos, las áreas que

contribuyen con el 87,19% de los paros de molienda son patios y molinos de caña con 50,11% y 37,08% respectivamente.

Tabla 16. Paradas de fábrica por área

PARADAS POR ÁREA			
ÁREA	**No. PARADAS**	**% No. PARADAS**	**% ACUMULADO No. PARADAS**
Patio de caña	223	50,11%	50,11%
Molinos	165	37,08%	87,19%
Elaboración	28	6,29%	93,48%
Generación de Vapor	23	5,17%	98,65%
Planta Eléctrica	6	1,35%	100,00%
Total general	**445**	**100,00%**	

Nota. Fuente: Los autores

Entre los equipos que reportan mayor número de fallas en el área de patios de caña se encuentran conductor de tablillas, desfibradora, picadora con un 30,04%, 24,22% y 23,77% respectivamente.

Tabla 17. Paradas en equipos de patio de caña

PATIO DE CAÑA			
EQUIPO	**No. PARADAS**	**% No. PARADAS**	**% ACUMULADO No. PARADAS**
Conductor de tablillas	67	30,04%	30,04%
Desfibradora	54	24,22%	54,26%
Picadora	53	23,77%	78,03%
Banda de Caña	30	13,45%	91,48%
Mesa 1a	7	3,14%	94,62%
Mesa 1b	6	2,69%	97,31%
Otros (patio de caña)	4	1,79%	99,10%
Nivelador 2	2	0,90%	100,00%
Total general	**223**	**100,00%**	

Nota. Fuente: Los autores

De igual manera, para el área de molinos de caña, los equipos que frecuentan fallas son el molino 5, molino 1, donnelly 2, molino 6, molino 4, donnelly 3, bomba 2 de maceración y donnelly 4, representando 81,82% de las fallas de los equipos del área.

Tabla 18. Paradas en equipos de molinos

MOLINOS DE CAÑA			
EQUIPO	**No. PARADAS**	**% No. PARADAS**	**%ACUMULADO No. PARADAS**
Molino 5	30	18,18%	18,18%
Molino 1	18	10,91%	29,09%
Donnelly 2	18	10,91%	40,00%
Molino 6	18	10,91%	50,91%
Molino 2	12	7,27%	58,18%
Molino 4	11	6,67%	64,85%
Donnelly 3	10	6,06%	70,91%
Bomba 2 maceración	9	5,45%	76,36%
Donnelly 4	9	5,45%	81,82%
Molino 3	6	3,64%	85,45%
Donnelly 6	4	2,42%	87,88%
Otros (molinos)	4	2,42%	90,30%
Bomba 3 tamiz	4	2,42%	92,73%
Bomba 2 jugo diluido	2	1,21%	93,94%
Bomba 1 tamiz	2	1,21%	95,15%
Bomba 1 jugo diluido	2	1,21%	96,36%
Bomba 1 maceración	1	0,61%	96,97%
Filtro DSM	1	0,61%	97,58%
Tamiz 1	1	0,61%	98,18%
Bomba 2 tamiz	1	0,61%	98,79%
Tanque jugo diluido tamiz	1	0,61%	99,39%
Donnelly 5	1	0,61%	100,00%
Total general	**165**	**100,00%**	

Nota. Fuente: Los autores

- **Tiempos perdidos por tiempos de reparación**

  Otra manera de analizar la criticidad de los equipos es por los tiempos perdidos debido a los lapsos de intervención que se les realizan a los equipos que fallan. Así mismo, estos tiempos son atribuidos a las áreas funcionales de la empresa.

  Las áreas que presentan los más altos tiempos de intervención son patios y molinos de caña con un 54,16% y 23,67% respectivamente.

Tabla 19. Tiempos de intervención por área

TIEMPOS DE INTERVENCIÓN POR ÁREA			
ÁREA	**TIEMPO DE REPARACIONES**	**% TIEMPO DE REPARACIONES**	**% ACUMULADO TIEMPO DE REPARACIONES**
Patio de caña	103,37	54,16%	54,16%
Molinos	45,17	23,67%	77,83%
Elaboración	21,03	11,02%	88,85%
Generación de vapor	17,42	9,13%	97,97%
Planta eléctrica	3,87	2,03%	100,00%
Total general	**190,85**	**100,00%**	

Nota. Fuente: Los autores

En el área de patios de caña, los equipos que mayor tiempo de intervención ocupan son el conductor de tablillas, desfibradora y picadora con 29,78 horas, 28,18 horas y 18,98 horas, respectivamente.

Tabla 20. Tiempos de intervención por equipos en Patio de caña

PATIO DE CAÑA			
EQUIPO	**TIEMPO DE REPARACIONES**	**% TIEMPO DE REPARACIONES**	**%ACUMULADO TIEMPO DE REPARACIONES**
Conductor de tablillas	29,78	28,81%	28,81%
Desfibradora	28,18	27,27%	56,08%
Picadora	18,98	18,37%	74,44%
Banda de caña	18,82	18,20%	92,65%
Nivelador 2	3,95	3,82%	96,47%
Mesa 1a	1,95	1,89%	98,36%
Mesa 1b	1,45	1,40%	99,76%
Otros (patio de caña)	0,25	0,24%	100,00%
Total general	**103,37**	**100,00%**	

Nota. Fuente: Los autores

En el área de molinos de caña, los mayores tiempos de reparaciones en los equipos que contribuyen en aproximadamente el 80% de los tiempos perdidos del área son el molino 5, donnelly 2, molino 6, donnelly 4, molino 2, molino 4 y molino 1.

Tabla 21. Tiempos de intervención de equipos en molinos de caña

MOLINOS DE CAÑA			
EQUIPO	**TIEMPO DE REPARACIONES**	**% TIEMPO DE REPARACIONES**	**%ACUMULADO TIEMPO DE REPARACIONES**
Molino 5	8,52	18,86%	18,86%
Donnelly 2	7,67	16,97%	35,83%
Molino 6	4,88	10,81%	46,64%
Donnelly 4	4,68	10,37%	57,01%
Molino 2	3,33	7,38%	64,39%
Molino 4	3,07	6,79%	71,18%
Molino 1	2,83	6,27%	77,45%
Donnelly 3	2,57	5,68%	83,14%
Bomba 2 maceración	1,82	4,02%	87,16%
Donnelly 6	0,85	1,88%	89,04%
Molino 3	0,83	1,85%	90,89%
Bomba 3 tamiz	0,72	1,59%	92,47%
Bomba 2 tamiz	0,70	1,55%	94,02%
Otros (molinos)	0,53	1,18%	95,20%
Tamiz 1	0,43	0,96%	96,16%
Bomba 1 tamiz	0,42	0,92%	97,08%
Bomba 2 jugo diluido	0,38	0,85%	97,93%
Tanque jugo diluido tamiz	0,32	0,70%	98,63%
Donnelly 5	0,25	0,55%	99,19%
Filtros DSM	0,23	0,52%	99,70%
Bomba 1 jugo diluido	0,10	0,22%	99,93%
Bomba 1 maceración	0,03	0,07%	100,00%
Total general	**45,17**	**100,00%**	

Nota. Fuente: Los autores

- **Equipos críticos por ocurrencia de fallas y tiempos de intervención**
  A partir del análisis de ocurrencia de falla y tiempos de intervención de los equipos en las áreas críticas, los equipos que requieren de una evaluación detallada para encontrar las causas reales por las que afectan las condiciones normales del proceso son los que se muestran en la tabla 22.

Tabla 22. Consolidado de equipos críticos de fábrica

EQUIPOS CRÍTICOS		
Equipo	**No. Paradas**	**Tiempo de Reparaciones**
Conductor de Tablillas	67	29,78
Desfibradora	54	28,18
Picadora	53	18,98
Banda de Caña	30	18,82
Molino 5	30	8,52
Molino 1	18	2,83
Donnelly 2	18	7,67
Total general	**270**	**114,78**

Nota. Fuente: Los autores

En conclusión, se prioriza las áreas de patio de caña y molinos debido a que la cantidad fallas presentadas es de 50,11% y 37,06% respectivamente consolidando un total de 388 fallas equivalente a un 87,19% de las fallas de la fábrica. También se tienen en cuenta horas perdidas por mantenimiento, según este factor de evaluación el área de patio de caña reflejan un 54,16% y en molinos un 23,67% con un total de 148,54 horas abarcando una proporción del 77,83% del tiempo perdido por reparaciones de fallas en la planta.

De esta forma se establecen los parámetros de cantidad de fallas y tiempo de reparaciones para evaluar la criticidad de los equipos en la fábrica, los cuales se hacen susceptibles a aplicación prioritaria de planes de mejora. Entre los equipos que se encuentran involucrados se pueden mencionar el conductor de tablillas, desfibradora, picadora, banda de caña, molino 5, molino 1 y donnelly 2. Teniendo en cuenta que el molino 5 cambió sus condiciones de diseño de vapor a electricidad y que la picadora tiene un periodo de operación menor a un año y aún se encuentra en fase de puesta a punto, se decide excluir estos equipos de la priorización. Sumado a esto, se decide tomar el conductor de tablillas como equipo piloto para la realización del estudio, ya que según el análisis es el equipo que con 67 fallas y 29,78 horas como tiempo de reparación representa el más crítico de las áreas.

5. PLAN DE MEJORA DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPOS CRÍTICOS

5.1. FACTORES CLAVES PARA LA MEJORA DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

Los resultados obtenidos en el diagnóstico de la gestión de mantenimiento y el análisis de criticidad de los equipos permitieron conocer a fondo la realidad de la fábrica en cuánto a estos aspectos, la existencia de debilidades y fortalezas en el sistema de gestión y el entendimiento de las relaciones entre las distintas áreas que integran el proceso productivo del azúcar, para finalmente establecer los focos claves de mejora y el diseño de estrategias que contribuyan a mejorar el sistema de gestión de mantenimiento de los equipos de fábrica (ver tabla 23).

Tabla 23. Focos claves de mejora del sistema de gestión de mantenimiento

FORTALEZAS	OPORTUNIDADES	DEBILIDADES
Tecnologías de información Administración y organización Infraestructura e Instalaciones	Recursos humanos Medidas de desempeño Planeación y programación	Tácticas de mantenimiento Análisis de procesos Análisis de confiabilidad Estrategia de mantenimiento

Nota. Fuente: Los autores

5.2. METODOLOGÍA DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPOS CRÍTICOS

5.2.1. Decisión de la metodología de gestión de mantenimiento

La fábrica posteriormente de diagnosticar el sistema de gestión de mantenimiento, de conocer el impacto que representa la disponibilidad de los equipos en el proceso productivo en términos de tiempos perdidos y de elegir el conductor de tablillas como equipo piloto, reconoce la necesidad de mejorar la forma en que se realizan las actividades de mantenimiento y de reducir los tiempos originados por equipos que fallan, a través de una metodología estructurada y organizada que permita abordar los problemas principales de la estructura de mantenimiento.

Por este motivo, se evalúan algunas de las diferentes metodologías para la gestión de mantenimiento existentes, en las cuales se analizan algunos criterios relevantes del mantenimiento, para enseguida adoptar esta metodología, primero en el equipo elegido como piloto y finalmente expandirla hacia los demás equipos de la fábrica.
Es así como se elige una filosofía que abarca desde las técnicas para la planeación detallada de los equipos hasta las actividades fundamentales de todas las áreas funcionales de la compañía, siendo el Mantenimiento Productivo Total (TPM) la metodología acorde con las necesidades generales y específicas de la empresa (ver tabla 24).

5.2.2. Benchmarking de sistemas de gestión de mantenimiento

Una vez definido el Mantenimiento Productivo Total (TPM) como la metodología a emplear para la gestión de los equipos de fábrica, fue necesario conocer que empresas nacionales tienen esta filosofía en una etapa de implementación avanzada, con la cual se pueda conocer aspectos básicos de su implementación.

Para realizar este benchmarking del TPM se visitaron dos empresas altamente influyentes en la economía del país y pioneras en el Valle del Cauca en dicho tema, CARVAJAL S.A. y NESTLÉ. A partir del conocimiento que estas empresas poseen debido a una trayectoria amplia sobre el proceso de implementación TPM y mediante algunas preguntas precisas sobre la experiencia con esta metodología, fue posible ratificar el éxito que ha tenido el gestionar los equipos a través de un proceso TPM, en donde el compromiso de la gerencia juega un papel predominante para el éxito de la implementación (Ver Anexo 3).

Tabla 24. Criterios de decisión de la metodología de gestión de mantenimiento

Criterios	Mantenimiento Proactivo (PaM)	Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)	Mantenimiento Continuo (CM)	Mantenimiento Productivo Total (TPM)
Reducción de costos de mantenimiento	Mejorando la administración del ciclo de vida del sistema	Optimizando el intervalo de mantenimiento requerido	Dirigiendo a la programación y aspectos técnicos de mantenimiento	Mejorando la eficiencia global del equipo y resolviendo problemas relacionados con el equipo
Productividad del equipo o mantenimiento	Enfocándose en tecnologías de mantenimiento preventivo y correctivo; identificando los procesos de mantenimiento de los equipos	Mejorando la confiabilidad del equipo	Mejorando y manteniendo la disponibilidad con pocos recursos	Incrementando el valor agregado por persona; la tasa de operación y reduciendo los paros de los equipos
Eficiencia global del equipo	Enfatizando en la eficiencia del equipo y del sistema	Enfatizando en un enfoque sistemático y en el uso apropiado de: Correr a la falla, planeado, preventivo y estrategias basadas en la condición, de acuerdo a las consecuencias de falla del sistema	Enfatizando en la medición del desempeño mediante el uso de la disponibilidad y costos totales de mantenimiento	Mejorando la OEE atacando las 6 pérdidas: paros, preparación y ajustes, vacío y paros menores, reducción de velocidad, rendimiento reducido por arranque y defectos
Mejoramiento continuo	Teniendo consideraciones pequeñas de mejoramiento continuo	Teniendo consideraciones pequeñas de mejoramiento continuo	Lograr el mejoramiento continuo incorporando técnicas PaM y RCM	Logrando el mejoramiento continuo mediante uso extensivo de estandarización, organización del área de trabajo y administración visual
Duración de la implementación	3 -6 Meses	3-6 Meses	6-12 Meses	1-3 años

Nota. Fuente: *An effectiveness-centred approach to maintenance management.* Journal of Quality in Maintenance Engineering. 2002.Vol 8. p353

5.3. PLAN ESTRATÉGICO DE LA GESTIÓN DE MANTENIMIENTO DE FÁBRICA

El benchmarking TPM fue un factor importante para tomar la decisión de como ejecutar la planeación de la metodología, debido que implementar TPM implica muchos cambios, requiere de tiempo e inversión económica y sus beneficios son a largo plazo, se decide realizar la planeación de dos de los procesos fundamentales de la metodología (Pilares TPM) y una de sus bases principales las 5s en el Conductor de tablillas[14].

Posteriormente, efectuando un análisis de los ocho procesos en los que se fundamenta el Mantenimiento Productivo Total (TPM) se considera adecuada la planeación de dos pilares, el mantenimiento planificado y el mantenimiento autónomo, debido a que en ellos se interviene directamente con el mejoramiento del estado de los equipos.
En primera instancia, se construye la información documental del sistema de gestión de Mantenimiento Productivo Total, en la cual se expone:

- **Filosofía TPM y mapa estratégico de la empresa.**
  El TPM es una metodología de gestión que no sólo pretende mejorar la eficiencia global del equipo, si no que involucra la formación y entrenamiento, la seguridad ambiental, la eficiencia administrativa para lograr la eficiencia global de la planta.

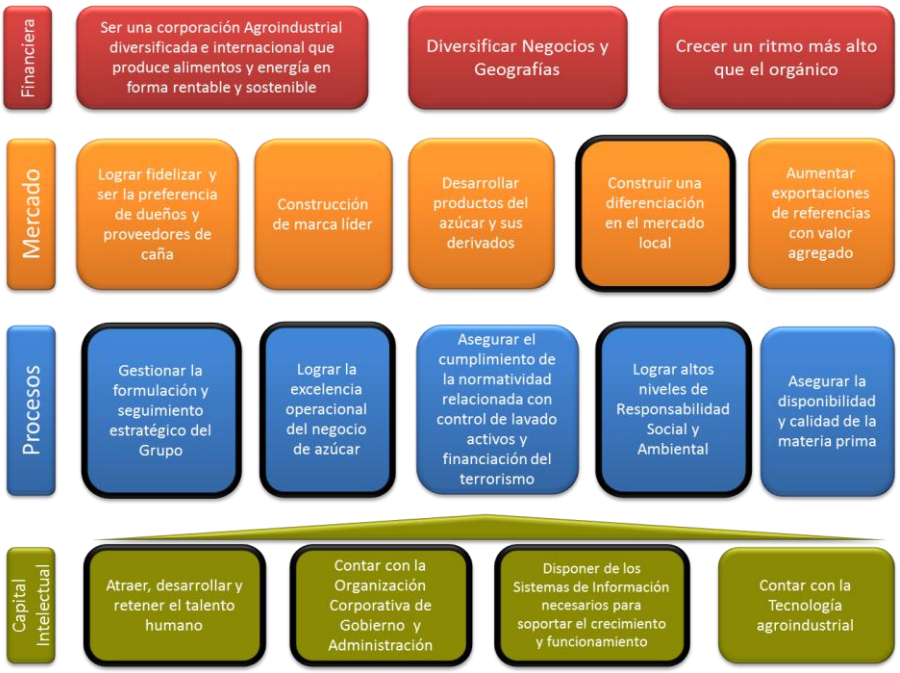


Figura 13. Mapa estratégico del ingenio objeto de estudio
Fuente: Ingenio objeto de estudio

[14] La información documental de la metodología 5s y el programa de actividades y planeación reposa en un archivo de Word® y Excel® que se adjunta con este documento (5S.docx) y (Programa 5s.xlsx) respectivamente.

- **Lineamientos estratégicos**

  Misión
  Lograr que el sistema productivo mejore continuamente la disponibilidad, rendimiento y calidad de sus procesos mediante la participación permanente de todos los miembros de la organización para alcanzar la excelencia operacional.

  Visión
  Para el 2016 consolidar el sistema de producción y mantenimiento como líder en el sector azucarero Colombiano utilizando eficientemente los recursos y fortaleciendo la integración de sus áreas funcionales.

  Objetivos
  - Mejorar el rendimiento operacional de los equipos de producción con la participación de todos los actores del proceso productivo.

  - Mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos para asegurar la calidad y productividad del sistema.

  - Analizar información obtenida del sistema para establecer parámetros de decisión que promuevan la mejora continua dentro del proceso productivo.

  - Capacitar al personal en metodologías y técnicas que contribuyan a incrementar los niveles productivos de la fábrica.

- **Impacto de la mejora**

  - **Productividad:** al eliminar averías reducen los tiempos perdidos y se incrementa la disponibilidad de los equipos al igual que la capacidad productiva de la planta en periodos definidos de tiempo. Así mismo la producción se beneficia en términos de calidad de producto final gracias a que confiabilidad del proceso es mejorada.

  - **Calidad:** los equipos y el personal desarrollan procesos y actividad asignados de tal forma que contribuyen en todo el sistema productivo con los resultados esperados.

  - **Gestión del conocimiento:** el TPM abarca actividades de capacitación y entrenamiento de los empleados, de esta forma se incrementa la capacidad del personal de la planta para afrontar situaciones y aportar ideas que mejoren el proceso productivo continuamente.

- **Seguridad:** mientras las averías disminuyen mediante procesos metódicos como las 5 S se incrementa el nivel de seguridad industrial debido a que las estaciones de trabajo reducen su índice de riesgo gracias al correcto uso de sus recursos.

- **Medio Ambiente:** Mejorando las condiciones del entorno de trabajo y procurando que el impacto negativo sobre el medio se reduzca hasta niveles que conjuguen armónicamente la actividad productiva con el ambiente.

- **Principios corporativos e inherentes al TPM.**

  - Participación de todo el personal, desde la alta dirección hasta los niveles operativos de la planta apoyada en el trabajo en equipo de grupos multidisciplinarios y la estrecha cooperación entre personal de producción y mantenimiento.

  - Creación de una Cultura Corporativa orientada a la obtención de la máxima eficacia en el sistema de producción y gestión de los equipos y maquinarias.

  - Implantación de un sistema de gestión de la planta productiva de manera que facilite la Eliminación de Pérdidas antes de que se produzcan elevando el rendimiento de los equipos en los procesos con la máxima rentabilidad económica.

  - Implantación del Sistema de Total de Gestión de Mantenimiento apoyado en el Mantenimiento Preventivo como medio básico para alcanzar el objetivo de cero pérdidas mediante actividades integradas en pequeños grupos de trabajo y apoyado en el soporte que proporciona el mantenimiento autónomo.

  - Aplicación de los Sistemas de Gestión de todos los aspectos de la producción, incluyendo diseño y desarrollo, ventas y dirección mediante los cuales se reduzcan costos, stock de repuestos y materiales no procesados.

- **Procesos fundamentales del sistema de gestión de TPM.**

Pilares del Mantenimiento Productivo Total - TPM

Es una filosofía de gestión orientada a crear un sistema corporativo que maximice la eficiencia de todo el sistema productivo de la empresa, estableciendo estrategias, tácticas y planes de acción que previenen las pérdidas en todas las operaciones.

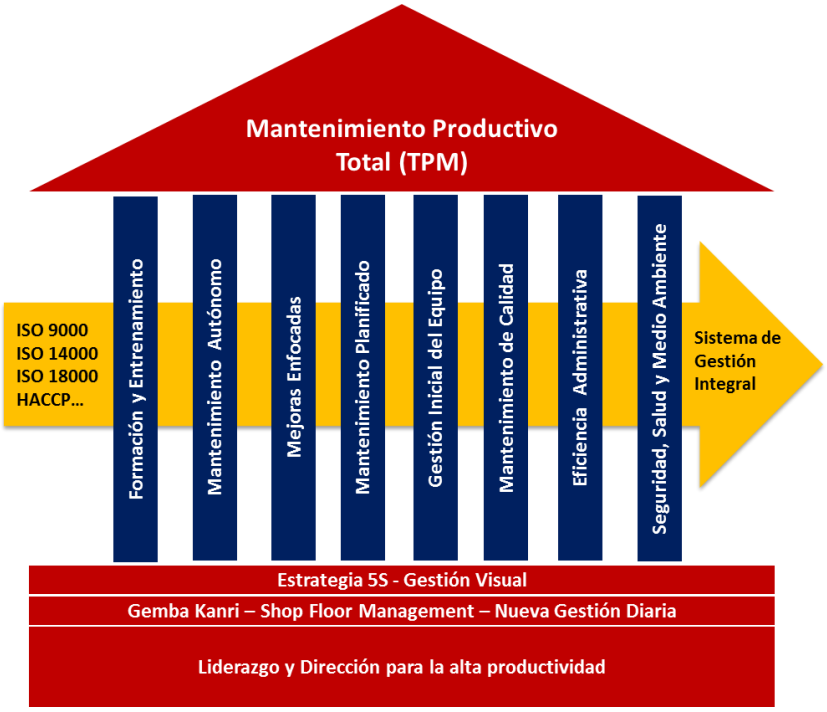


Figura 14. Procesos fundamentales (pilares) TPM
Fuente: http://www.ceroaverias.com/centroTPM/guiarapidatpm/companywide.htm

- **Mantenimiento planificado**[15]
  Actividades que ejecutan el área de mantenimiento para mantener y asegurar las condiciones operativas adecuadas de los equipos por medio de una planificación detenida, preparación y establecimiento de fechas con antelación.

  Objetivos
  - Cero fallas en los equipos
  - Mejorar en un 50% la confiabilidad y capacidad de mantenimiento
  - Reducir en un 20% los costos de mantenimiento
  - Asegurar la disponibilidad de repuestos

  Principios
  - Lograr y mantener la disponibilidad de las máquinas
  - Costos de mantenimiento óptimos
  - Reducir el inventario de repuestos
  - Mejorar la confiabilidad y mantenibilidad de las máquinas

[15] Correspondiente al autor Venkatesh J. (2005). An Introduction to Total Productive Maintenance (TPM), p. 17

- **Mantenimiento autónomo**
  Está compuesto por un conjunto de actividades que se realizan diariamente por todos los trabajadores en los equipos que operan, incluyendo inspección, lubricación, limpieza, intervenciones menores, cambio de herramientas, y piezas, estudiando posibles mejoras, analizando y solucionando problemas del equipo y acciones que conduzcan a mantenerlo en las mejores condiciones de funcionamiento.

  Objetivo
  - Desarrollar operadores de producción calificados para establecer y mantener las condiciones adecuadas en los equipos

  Principios
  - Funcionamiento ininterrumpido de los equipos.
  - Operadores flexibles para operar y mantener otros equipos.
  - La eliminación de las fuentes de los defectos a través de la participación activa de los trabajadores.
  - Aplicación progresiva de las actividades de mantenimiento autónomo.

- **Estructura organizacional de fábrica de acuerdo con la filosofía TPM.**

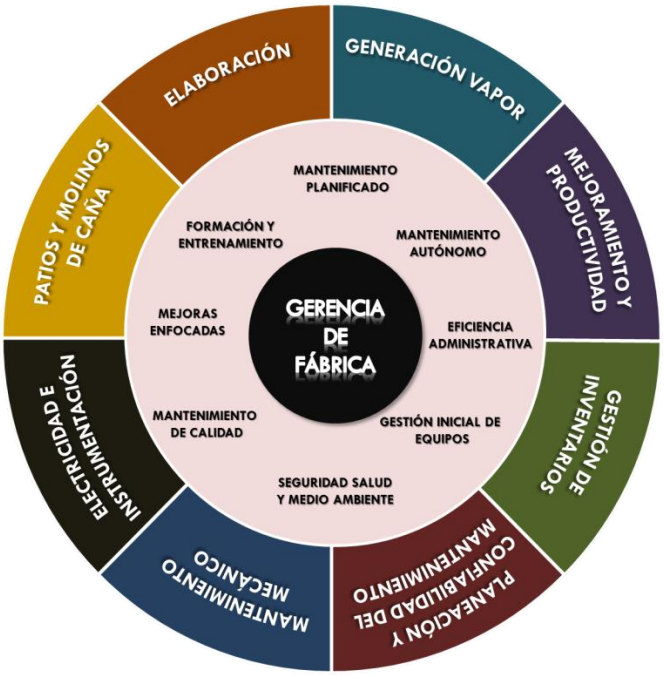


Figura 15. Estructura organizacional de la empresa con TPM
Fuente: Los autores

- **Dinámica organizacional del TPM.**

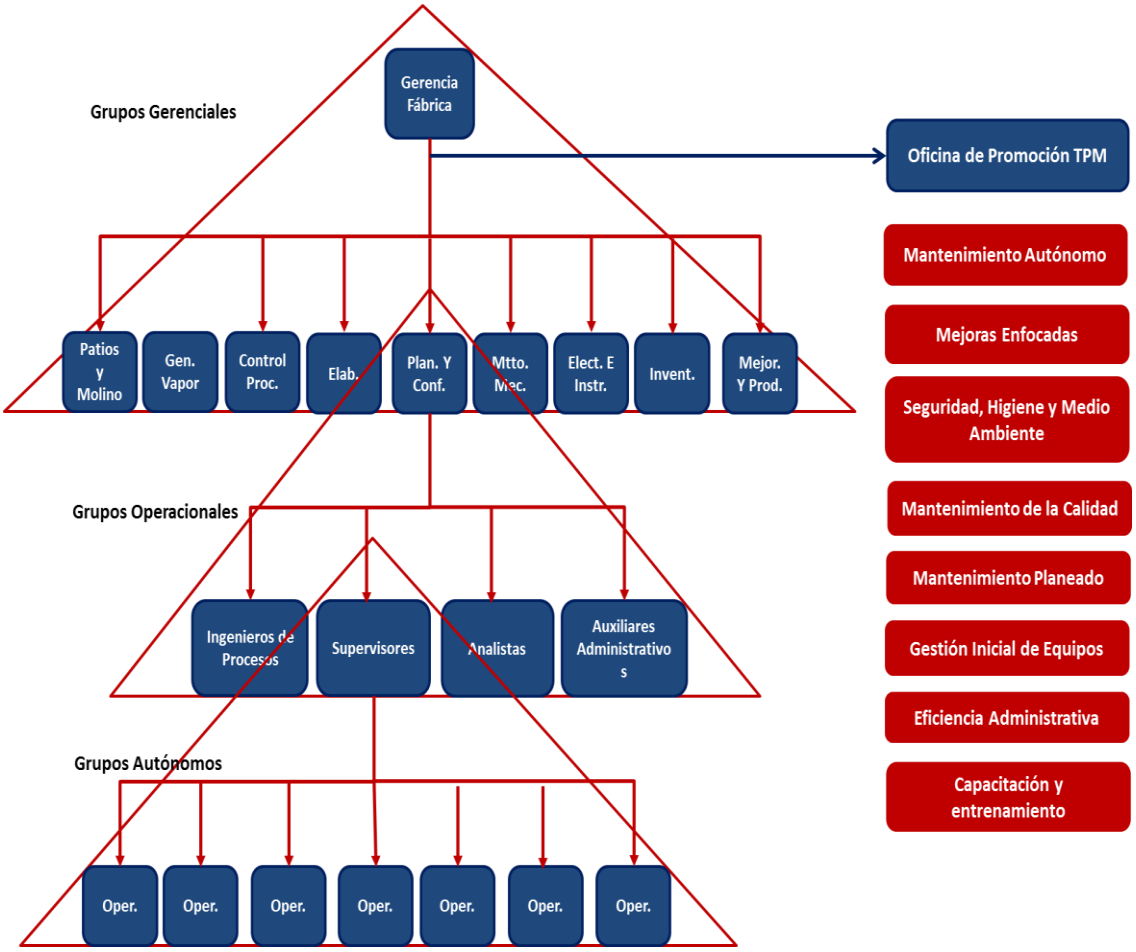


Figura 16. La dinámica organizacional del TPM

Fuente: Sacristán, F. R. (2012). Mantenimiento Total de la Producción. España: Fundación Confemetal

5.3.1. Metodología de implementación del mantenimiento planeado

Para la realización del programa de actividades del mantenimiento planeado fue necesario identificar la metodología establecida para la implementación de dicho pilar, esta se resume en los siguientes pasos:

Figura 17. Etapas en la implementación del mantenimiento planeado
Fuente: Los autores

La meta de este pilar es mejorar en un 50% la confiabilidad, lo cual se apreciar en el incremento de la disponibilidad de los equipos, por lo tanto, los costos de mantenimiento correctivo podrían reducir en 20% (Venkatesh J, 2005).

- **Programa de implementación del mantenimiento planeado para conductor de tablillas**
  De acuerdo con la metodología de implementación anteriormente mencionada del mantenimiento planeado, se realiza la adaptación de dichas etapas en el conductor de tablillas.

Tabla 25. Programa de mantenimiento planeado para el conductor de tablillas

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PLANEADO																															
ETAPA	**ACCIÓN**	**¿CÓMO?**	**¿CUÁNDO? (Fecha de terminación)**																												
			MES 1				**MES 2**				**MES 3**				**MES 4**				**MES 5**				**MES 6**				**MES 7**			
			1	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**
Mejorar el sistema de información de la gestión del mantenimiento	Establecer la información existente	Revisar la información del equipo en el SAP																													
		Crear una lista de esta información																													
	Identificar la información deseada	Establecer el tipo de información que se desea obtener del equipo en el SAP																													
	Comparar y determinar los requerimientos faltantes	Comparar la información existente contra la deseada																													
		Anexar la información faltante																													
	Ingresar la información	Actualizar la información del equipo																													
	Validar los servicios del software	Visualizar la información suministrada por el software (Catálogos de equipo, OT´s, Historial del equipo, entre otros)																													
Evaluar el estado inicial de los equipos	Recopilar información básica del equipo	Revisar con el responsable del área el listado de partes y componentes del equipo																													
		Revisar con el responsable de área el listado de materiales del equipo																													
		Identificar la cantidad requerida y el costo de adquisición para cada material del equipo																													

	Codificar el equipo	Asignar un código a los componentes o partes del equipo identificados como nuevos que no lo tengan																											
		Marcar físicamente el equipo con Código en SAP																											
	Reunir históricos de averías e intervenciones	Obtener datos de las averías, paros, tiempos de reparación entre otros, causados por los equipos																											
		Ordenar y procesar cuantitativamente la información anterior para generar el histórico																											
		Crear un formato de historia del equipo y anexarlo al sistema de información SAP																											
	Registros MTBF	Calcular el indicador MTBF a partir de la información del equipo																											
		Crear formatos para el análisis del comportamiento del indicador																											
Eliminar el deterioro y mejorar su estado	Identificar el problema y conocer la situación actual	Estratificar la información de las principales causas de fallas en el equipo con la información recolectada en pasos anteriores																											
		Reunir a los analistas, supervisores, operadores involucrados para definir la causa raíz de fallas en el equipo																											
		Priorizar las causas con la colaboración de las personas involucradas en la operación del equipo																											
		Anexar toda la información en el formato de la metodología PHVA																											
	Formular el plan de acción	Establecer las actividades correctivas para reducir el deterioro o fallas del equipo con la colaboración de las personas																											

		implicadas en él																											
		Incluir en el plan de acción la evaluación del progreso, metas y frecuencias de control de estas metas																											
		Asignar responsables para la ejecución de cada actividad de mejora con tiempos específicos																											
		Anexar la información al formato de plan de acción del PHVA																											
	Implantar mejoras	Realizar las actividades con la colaboración del personal involucrado																											
	Evaluar resultados	Crear formatos para el seguimiento de actividades																											
		Realizar físicamente el seguimiento de las acciones correctivas diariamente																											
		Verificar los resultados generales de cada actividad																											
		Publicar en tableros de control visual, los logros alcanzados para que cada área de la empresa tenga conocimiento																											
	Estandarizar mejoras	Identificar las acciones planeadas que han dado resultados positivos																											
		Mantener esas acciones mediante el dominio de la metodología EHVA																											
Mejorar el sistema de mantenimiento preventivo	Iniciar programa de frecuencias	De acuerdo al comportamiento de fallas en el equipo proponer la frecuencia de mantenimiento																											

		Revisar con las personas involucradas en equipo la frecuencias de mantenimiento propuestas para su validación o modificación																											
		Actualizar los planes de mantenimiento del equipo(Paro Mensual)																											
		Actualizar la información de OT (Hojas de rutas, OT por tipo, etc.)																											
		Generar plan de mantenimiento del equipo(Paro por horas)																											
	Preparación de estándares de mantenimiento	Realizar los formatos necesarios para el seguimiento de actividades de mejora																											
		Modificación catálogos de fallas y causas de fallas del equipo																											
		Revisar y actualizar los procedimientos e instructivos de mantenimiento																											
		Validar los manuales con cada jefe																											
		Publicar y difundir el procedimiento en la intranet																											
	Gestionar la información del mantenimiento contratado	Tener identificado las actividades específicas de mantenimiento del equipo que requieren de personas externas																											
		Generar las OT para estas actividades donde se defina claramente las labores necesitadas																											
		Ingresar al SAP la información de mantenimiento externo para mantener el historial completo del equipo																											

	Gestionar los repuestos insumos y materiales	Listar las cantidades requeridas de componentes o partes del equipo																											
		Realizar el inventario de los componentes o partes del equipo																											
		Identificar los repuestos, insumos o materiales faltantes y necesarios																											
		Clasificar el inventario de repuestos según la técnica de gestión (ABC)																											
		Gestionar la compra de los repuestos, insumos y materiales en la cantidad necesaria																											
		Gestionar los repuestos estratégicos del equipo																											
	Asegurar la calidad del mantenimiento	Recolectar las OT efectuadas (Supervisores de mantenimiento.)																											
		Asegurar que las actividades de mantenimiento se hayan realizado y que los objetivos se hayan cumplido																											
		Capacitar a los supervisores de mantenimiento en la elaboración de avisos y anomalías																											
		Capacitar a los operarios en el diligenciamiento de OT																											
		Llevar indicadores																											
Desarrollar el sistema de mantenimiento predictivo	Analizar confiabilidad del equipo	Llevar el cálculo de confiabilidad del equipo																											
		Análisis de causa raíz de fallas y evolución de anomalías																											
	Preparar rutas de inspección	Modificar frecuencias de ejecución de rutas de lubricación para el equipo																											
		Modificar frecuencias de ejecución de rutas de vibraciones para el equipo																											

Evaluar y mejorar continuamente		Realizar las rutas de inspección para el equipo																													
		Notificar a los responsables sobre las nuevas rutas y las modificaciones realizadas																													
	Realizar rutas de inspección	Ejecución de rutas de medición de espesores al equipo																													
		Ejecución de rutas de detección de fallas de ejes del equipo																													
	Evaluar el progreso de indicadores	Utilizar tablas de análisis																													
		Comparar indicadores antes y después de la implementación																													
		Publicar los logros obtenidos																													
		Definir nuevas metas																													
	Evaluar los beneficios económicos	Recalcular los costos de mantenimiento																													
		Comparar costos antes y después de la implementación																													
		Publicar los beneficios económicos obtenidos																													

Nota. Fuente: Los autores

Para facilitar la evaluación del cumplimiento y progreso de la metodología en la empresa se establece un conjunto de indicadores que reúnen los aspectos principales del mantenimiento planeado (ver tabla 26).

Tabla 26. Indicadores del programa de mantenimiento planeado

INDICADORES DEL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PLANIFICADO	
SISTEMA DE INFORMACIÓN DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO	$\frac{N° \ Equipos \ Nuevos \ en \ SAP}{N° \ Total \ Equipos \ Nuevos} x100$
	$\frac{N° \ Equipos \ obsoletos \ actualizados \ en \ SAP}{N° \ Total \ Equipos \ obsoletos} x100$
ESTADO INICIAL DEL EQUIPO	$\frac{Hoja \ Historica \ del \ Equipo}{N° \ de \ Equipos} x \ 100$
MEJORA ESTADO DEL EQUIPO	$\frac{Fallas \ actuales \ en \ los \ equipos}{Fallas \ pasadas \ de \ los \ equipos} x \ 100$
SISTEMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO	$\frac{Plan \ de \ Mtto.de \ \ equipo}{N° \ Total \ Equipos} x100$
SISTEMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO	$MTBF = \frac{Tiempo \ de \ Operatividad}{Número \ de \ Paradas}$
EVALUACIÓN Y MEJORA CONTINUA	$\frac{Costos \ de \ Mtto. (después \ de \ implementación)}{Costos \ de \ Mtto. (antes \ de \ implementación)} x100$

Nota. Fuente: Los autores

5.3.2. Metodología de implementación del mantenimiento autónomo

La metodología establecida del mantenimiento autónomo se resume en los siguientes pasos, posteriormente usados para la programación de actividades en el Conductor de tablillas.

Figura 18. Etapas en la implementación del mantenimiento autónomo
Fuente: Los autores

El objetivo de este pilar es el desarrollar operadores de producción calificados para establecer y mantener las condiciones adecuadas en los equipos[16].

[16] Ibíd. p. 12

- **Programa de mantenimiento autónomo para el conductor de tablillas**
  La metodología de implementación anteriormente mencionada del mantenimiento autónomo permitió la ejecución del programa de dicho pilar en el conductor de tablillas.

Tabla 27. Programa de mantenimiento autónomo para conductor de tablillas

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO AUTÓNOMO																							
ETAPA	**OBJETIVO**	**ACCIÓN**	**¿CÓMO?**	**¿CUÁNDO? (Fecha de terminación)**																			
				MES 1				**MES 2**				**MES 3**				**MES 4**				**MES 5**			
				1	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**
Preparación	Gestionar las capacitaciones y la información previa a la implementación del programa de mantenimiento autónomo	Preparación de la metodología	Diseñar mapa de seguridad																				
			Diseñar el manual de situaciones anormales																				
			Diseñar formato de OPL																				
			Diseñar las tarjetas de anomalías																				
			Crear tableros de Control Visual																				
			Formatos para la detección de anomalías																				
			Formatos de planificación de mejoras																				
			Formato de auditoria de mantenimiento Autónomo																				
			Otros formatos																				
			Imprimir los formatos diseñados																				
		Capacitación inicial	Introducción del mantenimiento autónomo a jefes y supervisores del área																				
			Introducción del mantenimiento autónomo a operarios																				

Limpieza inicial	Identificar fugas, fuentes de contaminación y mala lubricación , mediante una limpieza general del equipo	Inventario de elementos necesarios para la limpieza	Listar los elementos de limpieza para el equipos																			
			Realizar la adquisición de los elementos que no se tienen para la limpieza																			
		Limpieza del equipo	Realizar las actividades de limpieza e inspección del equipo																			
		Registros de defectos encontrados durante la limpieza	Realizar la inspección del equipo																			
			Registrar en los formatos los defectos o anomalías halladas																			
		Tarjeta de anomalías	Usar las tarjetas de defectos para exponer las anomalías halladas en el equipos																			
Reducción de las causas de las fuentes de contaminación	Eliminar las fuentes principales que están ocasionando problemas en el funcionamiento del equipo a través de acciones correctivas	Detección de lugares de contaminación y de difícil acceso	Observar cuidadosamente el equipo																			
			Conocer la ubicación exacta de las fuentes de contaminación o situaciones anormales																			
		Estudio de métodos de corrección de problemas	Analizar las soluciones posibles para la eliminación del problema																			
			Ejecutar las mejoras seleccionadas como adecuadas																			
Preparación de estándares de limpieza e inspección	Estandarizar los procesos de limpieza, inspección y lubricación para conocimiento de estas actividades en los operarios	Revisión de estándares de limpieza y desinfección	Realizar la estandarización de los procesos de limpieza y desinfección del equipo																			
			Consultar con los operarios los procesos estandarizados y realizar mejoras sugeridas por ellos																			
		Identificación de los puntos a lubricar	Crear esquemas que indiquen los puntos en el equipo en los cuales se realiza la lubricación																			

		Identificación de las fugas de lubricantes	Llevar un control periódico de la existencia o inexistencia de las fugas mediante el diseño de formatos de seguimiento																			
		Métodos de lubricación	Identificar los método de lubricación (Manual o Bomba de engrase)																			
			Estandarizar el procedimiento																			
Inspección general	Inspeccionar el equipo para identificar cualquier estado anormal y corregirla	Programa de capacitación	Identificar los puntos en los cuales el operario del equipo debe ser capacitado para lograr con el objetivo de la inspección																			
			Realizar la capacitación sobre los puntos débiles identificados en el ítem anterior																			
		Inspección periódica	Planificar las revisiones e inspecciones del equipo																			
			Realizar el trabajo de inspección en compañía de la persona encargada del mantenimiento del equipo																			
Inspección autónoma	Inspeccionar el equipo para identificar cualquier estado anormal y corregirla a tiempo	Implantación de mantenimiento autónomo	Inspeccionar el equipo bajo las habilidades y conocimientos desarrollados por el operario frecuentemente																			
			Evaluación del proceso de inspección realizado por el operario																			
Estandarización	Mantener los progresos alcanzados de mantenimiento autónomo	Evaluación de las actividades de inspección	Comparar indicadores antes y después de la implementación																			
			Definir nuevas metas																			
			Publicar los progresos alcanzados en tableros de gestión visual																			

		Elaboración de estándares	Diseño de manuales de limpieza e inspección del equipo																			
			Diseño de procedimientos de lubricación del equipo																			
			Evaluación constante de estándares																			
Control autónomo total	Asegurar que el equipo mantenga en buenas condiciones mediante la inspección constante de los operarios	Correcto mantenimiento autónomo	Entregar a los operarios los documentos realizados con el fin de que la actividad se realice correctamente																			
		Auditoria de mantenimiento autónomo	Controlar y evaluar las mejorar a corto y largo plazo a cargo del líder del mantenimiento autónomo																			
			Realizar Auditoria de mantenimiento autónomo																			
			Informar de resultados																			

Nota. Fuente: Los autores

La planeación del mantenimiento autónomo incluye el establecimiento de indicadores como medida de evaluación del cumplimiento y control del progreso de la metodología en la empresa (ver tabla 28).

Tabla 28. Indicadores del programa de mantenimiento autónomo

INDICADORES DEL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO AUTÓNOMO	
LIMPIEZA INICIAL	$\frac{N° \ de \ equipos \ o \ zonas \ limpias}{N° \ Total \ equipos \ o \ zonas \ en \ el \ área} x100$
REDUCCIÓN DE LAS CAUSAS DE LAS FUENTES DE CONTAMINACIÓN	$\frac{N° \ de \ anomalías \ halladas \ (últ. inspección)}{N° \ de \ anomalía \ halladas (1mera \ inspección)} x \ 100$
INSPECCIÓN GENERAL	$\frac{Fallas \ actuales \ en \ los \ equipos}{Fallas \ pasadas \ de \ los \ equipos} x \ 100$
INSPECCIÓN AUTÓNOMA	$\frac{Tiempos \ actuales \ de \ intervención}{Tiempos \ de \ intervención \ existentes} x \ 100$
ESTANDARIZACIÓN	$\frac{Estándares \ establecidos}{Estándares \ existentes} x100$
CONTROL AUTÓNOMO TOTAL	$\frac{Habilidades \ del \ operador \ (Después)}{Habilidades \ de \ operador \ (Antes)} x100$

Nota. Fuente: Los autores

Adicional al programa de mantenimiento autónomo, se realiza el bosquejo de la campaña de etiquetas[17] a emplear en dicho pilar, las cuales permiten de una manera organizada que se detecten y anuncien las anomalías o fallas en los equipos, en él se exponen los formatos de etiquetas para la empresa, así como la metodología que se debe realizar para la implementación adecuada de las mismas y finalmente el diseño de un tablero de control visual para publicar los indicadores referentes a la implementación de la metodología del mantenimiento Autónomo.

[17] La información documental sobre la campaña de etiquetas reposa en un archivo de Word® que se adjunta con este documento (CAMPAÑA DE ETIQUETAS.docx)

6. MODELO DE SIMULACIÓN

6.1. PROPÓSITO DE LA SIMULACIÓN

El ingenio Riopaila Castilla desarrolla actividades de producción de azúcar las cuales inician en el proceso de molienda donde ingresa la caña de azúcar y es transformada en jugo diluido, posteriormente este jugo pasa a la planta de elaboración donde el proceso de transformación continúa hasta que se obtiene azúcar.

De esta forma se establece simular el área de molinos debido a la criticidad del este elemento en el sistema productivo. El objetivo principal del modelo es validar el desarrollo del programa de mejoramiento en el área piloto de patios y molinos de caña mediante la medición de las variables de disponibilidad, rendimiento y calidad del proceso de molienda de caña para calcular la eficiencia global del proceso estableciendo escenarios donde se recreen incrementos graduales en la eficiencia de las reparaciones de algún tipo de falla en uno de los equipos del conjunto focalizado de equipos críticos.

Para el proceso se requiere calcular la cantidad de horas que los equipos críticos presentan fallas del tipo mecánica, eléctrica e instrumentación y metrología para posteriormente tomar un equipo como objeto de análisis y definir mejoras en la eficiencia del tipo de falla especifico que presenta mayor índice de tiempo de reparación.

Posteriormente se requiere establecer mediante un modelo de simulación del sistema productivo de molienda el impacto en la cantidad de toneladas de caña molida, quintales producidos y dinero que la empresa dejaría de generar en el tiempo que se presentan las fallas del equipo focalizado.

6.2. MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA PRODUCTIVO

El proceso de molienda inicia desde la recepción de la caña de azúcar por parte de las grúa de hilo que la depositan sobre las mesas que son las encargadas de llevar la materia prima a un conductor de tablillas que transporta el material hasta un nivelador el cual cumple la función de compactarla para alimentar una picadora y fraccionar la caña en trozos, luego el material procesado pasa a un tambor alimentador que se encarga de llevar la caña a una desfibradora donde estos fragmentos son golpeados para separar fibras vegetales y facilitar la extracción del jugo, posteriormente se convierte en un polvo de caña, este pasa a una banda transportadora que alimenta el primer molino, en esta banda transportadora se integran un electroimán que separa material extraño metálico y un nivelador que se compacta la caña para evitar atascamientos en el primer molino.

De esta forma, en el molino numero 1 la caña es sometida presión mecánica para extraer jugo que pasa a un tanque, después la caña que sale del molino 1 sigue pasa a los molinos 2, 3, 4, 5 y 6 donde se recupera jugo a través del proceso de maceración. La maceración consiste en

agregar agua a la caña que entra en el molino 6 para facilitar la extracción de jugo en este equipo, así mismo el jugo del molino 6 recircula al molino 5 para añadir humedad al polvo de caña que ingresa allí, este camino sigue secuencialmente hasta volver al molino 2, es decir, el jugo del molino 5 recircula al molino 4, el que sale del molino 4 vuelve al molino 3, y por último el jugo extraído del molino 3 vuelve al molino 2 para pasar a un tanque donde se mezcla con el jugo de primera extracción (resultante del primer molino). Cuando el jugo ha sido recuperado de los molinos y se deposita en el tanque, procede a ser bombeado a un tamiz que actual como separador entre la materia sólida y el líquido, la materia solida vuelve al molino número 2 para continuar el proceso y el líquido a unos equipos denominados DSM que actúan como filtros para material solido más fino, así mismo el jugo continua a un segundo tamiz que termina de separar el polvo de caña, las fibras separadas vuelven al proceso para extraer mayor cantidad del líquido que contiene la sacarosa preciada del proceso productivo, el jugo termina en un tanque donde posteriormente se bombea a la planta de elaboración para continuar con el proceso productivo, la caña al final del molino 6 es denominada bagazo y es enviada al área de generación de vapor.

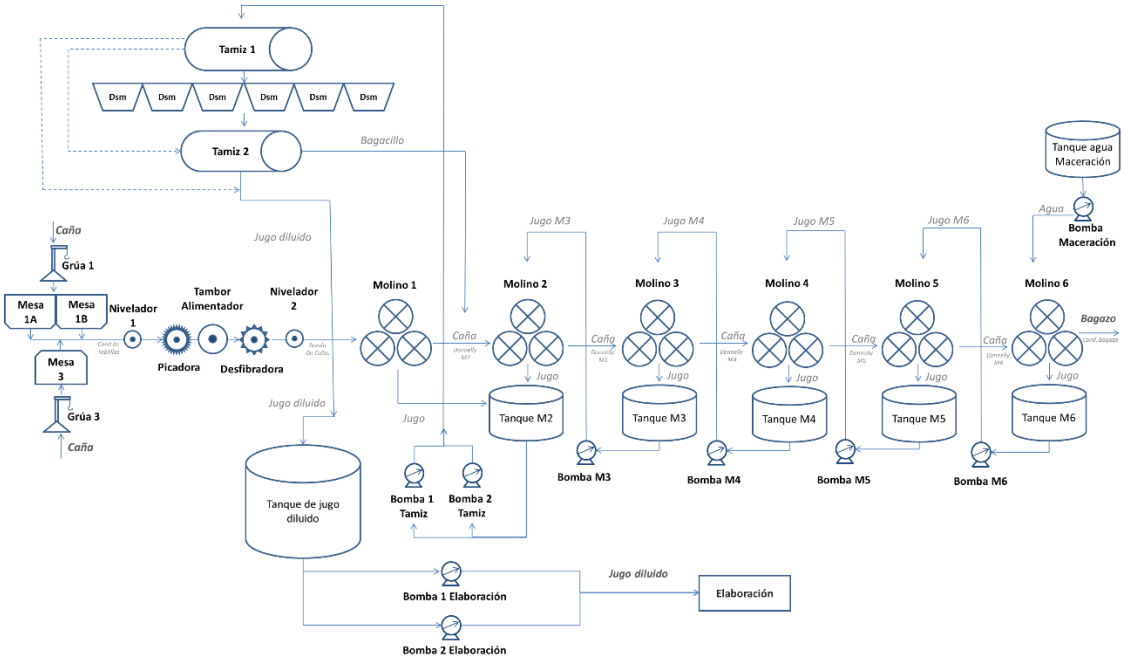


Figura 19. Diagrama de flujo de patios y molinos de caña
Fuente: Los autores

Dentro de la empresa se programan periodos de tiempo para desarrollar actividades de reparaciones definidas en el mantenimiento de los equipos, durante este tiempo la fábrica detiene sus actividades de producción, de igual forma se presentan tiempos perdidos durante los cuales el proceso de molienda se detiene, este tiempo es calculado con base en el tiempo hábil programado de producción.

Se plantea elaborar un modelo de simulación en 2 fases, en la primera se incluye análisis de disponibilidad a cada uno de los equipos críticos definidos entre los que se encuentran el

conjunto conformado por el conductor de tablillas, banda de caña, desfibradora, molino 1 y Donnelly 2. Durante esta fase inicial se recolectan datos del comportamiento de las variables TBF, TTR y proporción de trabajos según su categoría ya sean eléctricos, mecánicos o de instrumentación y metrología de cada equipo. El flujo de entidades está dado por la distribución de la cantidad de fallas que se presentan en el equipo y se clasifican según su naturaleza para durar según la distribución determinada en cada una de ellas según sea falla eléctrica, mecánica y de instrumentación.

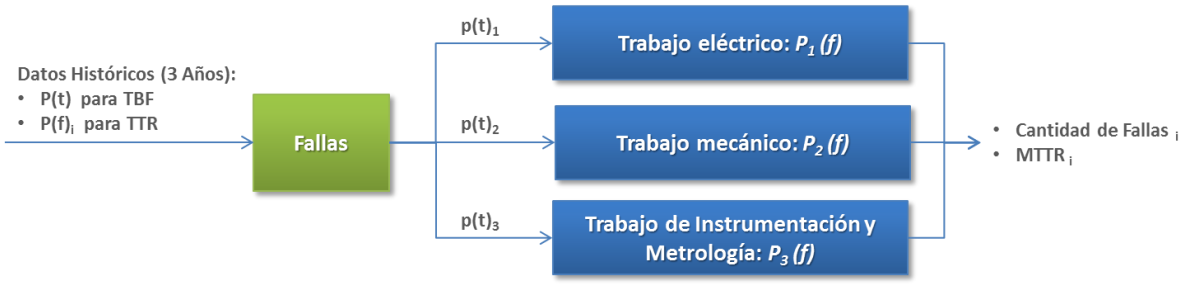


Figura 20. Modelo de fallas por equipos
Fuente: Los autores

En la segunda fase se plantea simular el sistema productivo de patios y molinos con el fin de analizar la cantidad de toneladas de caña que se dejarían de moler durante el tiempo de fallas de los equipos críticos, por tanto la primera fase arrojará la información del tiempo de simulación para un sistema productivo que contempla la entrada probabilística de materia prima.

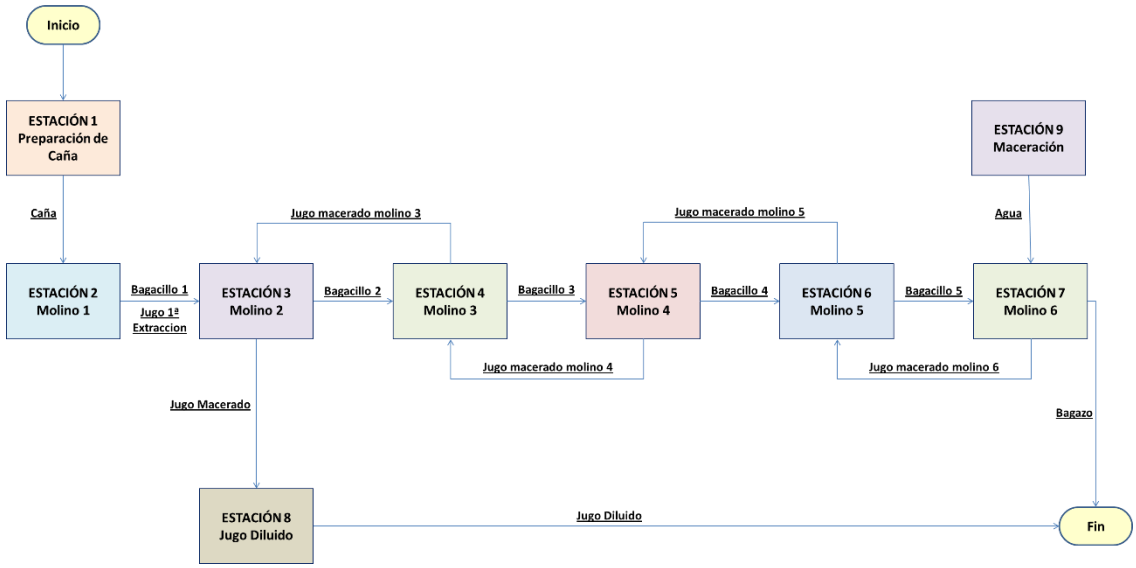


Figura 21. Diagrama de flujo de entidades
Fuente: Los autores

Tabla 29. Parámetros del modelo

	FASE 1 Modelo por Equipos	FASE 2 Modelo del Sistema Productivo
EVENTOS	• Se presenta una falla a la vez en el sistema • La falla es asignada a un equipo • La falla se categoriza según su naturaleza • Inicia reparación de la falla. • Termina reparación de la falla	• Llegada de la caña de azúcar al sistema • Falta de materia prima • Inicio del proceso productivo • Finalización del proceso productivo
VARIABLES	• Tiempo entre fallas (TBF) • Tiempo entre reparaciones (TTR) • Cantidad de fallas presentadas	• Toneladas de caña entrada por hora • Toneladas de caña molida por hora (TCM)
ENTIDADES	• Fallas	• Toneladas de caña de azúcar

Nota. Fuente: Los autores

6.3. SUPUESTOS DEL MODELO

FASE 1

- Solo presentan fallas los equipos críticos objeto de análisis: conductor de tablillas, desfibradora, banda de caña, molino 1 y donnelly 2; para el resto de equipos no se consideran fallas.
- La falla es reparada siempre con tiempo variable según distribución de probabilidad del comportamiento histórico analizado durante tres años.
- El tiempo entre fallas se basa en el comportamiento de los últimos tres años de los equipos objeto de análisis.
- No se presentan fallas simultáneas debido a que los equipos se encuentran en serie, por tanto la falla de uno detiene el proceso productivo.
- Una falla detiene el proceso productivo, por lo tanto la suma de todos los tiempos de reparación de cada tipo de falla en cada equipo generan el consolidado de tiempo perdido en el sistema.

FASE 2

- Se asume velocidad de molienda variable para los equipos objeto de análisis con base en el rendimiento global del sistema, el resto de equipos se asignan con velocidad promedio constante.
- No se presentan fallas en los recursos del sistema durante el tiempo que corre la simulación.
- La cantidad de toneladas de caña se basa en distribución de probabilidad tomada del comportamiento de los últimos 3 años.
- La velocidad de molienda se establece según el comportamiento de los últimos 3 años mediante una distribución de probabilidad.

6.4. DATOS ESTADÍSTICOS DE ENTRADA AL MODELO

Se define el tamaño de muestra para analizar las observaciones durante los días de operación del sistema productivo.

Tabla 30. Datos estadísticos de entrada del modelo

Nivel de Confianza 95%	$(Z\alpha_{/2})^2$	1,96
Variabilidad Positiva	P	0,5
Variabilidad Negativa	Q	0,5
Precisión	E	5%
Tamaño de muestra	n	384,16

Nota. Fuente: Los autores

Con un 95% de confianza y una precisión del 5% se determina recolectar una muestra de las observaciones de por lo menos 384,16 eventos para lo cual se aproxima a 385, sin embargo al analizar los datos existentes en el sistema de información de la empresa sobre los paros presentados por los equipos críticos del sistema, se encuentra que dichas maquinas han generado 390 eventos durante los últimos 3 años, por esta razón se decide tomar los registros de este periodo de tiempo en el caso de la fase 1 del modelo.

Para la segunda fase se toma una muestra piloto de 30 observaciones de las velocidades de molienda y del ritmo de entrada de caña al proceso productivo para calcular el tamaño de la muestra con parámetros de distribución T-Student con 95% de confianza y un error de 8 toneladas de caña.

Tabla 31. Datos de velocidad de molienda y velocidad de caña entrada

VARIABLE	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	N
Velocidad Molienda (TC/h)	355,57	27,11	48,02
Velocidad Entrada (TC/h)	318,41	41,97	115,13

Nota. Fuente: Los autores

Aproximando el valor máximo se obtiene una muestra de 116 observaciones por lo cual los analistas del caso definen realizar 120 observaciones de las variables objeto de estudio.

6.4.1. Datos estadísticos

Al analizar los registros estadísticos de los equipos objeto de análisis se obtiene la proporción de fallas (ver tabla 32).

Tabla 32. Distribución de probabilidad de fallas de los equipos

EQUIPO	CANTIDAD DE FALLAS	PROPORCIÓN	DISTRIBUCIÓN DE TIEMPO ENTRE FALLAS
Conductor de tablillas	179	45,90%	-0.001 + WEIB(40.3, 0.557)
Banda de caña	68	17,44%	
Donnelly 2	56	14,36%	
Desfibradora	45	11,54%	
Molino 1	42	10,77%	
Total general	**390**	**100,00%**	

Nota. Fuente: Los autores

De igual forma, durante el periodo histórico analizado la proporción de fallas y la distribución asignadas para el tiempo de reparación de cada una de ellas según su naturaleza entre mecánica, eléctrica e instrumentación y metrología se encuentra definida, como se muestra en la tabla 33.

Tabla 33. Distribución de probabilidad de tiempo de reparación de los equipos

EQUIPO	TIPO DE FALLA	PROPORCIÓN	DISTRIBUCION - TTR
CONDUCTOR DE TABLILLAS	Eléctrica	10,61%	LOGN(0,13; 0,113)
	Mecánica	86,59%	LOGN(0,542; 0,612)
	Instrumentación y metrología	2,79%	LOGN(0,357; 0,551)
BANDA DE CAÑA	Eléctrica	4,41%	0.2 + 0,31 * BETA(0,0785; 0,0474)
	Mecánica	94,12%	LOGN(0,404; 0,48)
	Instrumentación y metrología	1,47%	0,3833
DONNELLY 2	Eléctrica	0%	---
	Mecánica	92,86%	LOGN(0,739; 1,02)
	Instrumentación y metrología	7,14%	0,31 + 1,69 * BETA(1,04; 0,947)

DESFIBRADORA	Eléctrica	4,44%	0,1 + 0,9 * BETA(0,628; 0,613)
	Mecánica	73,33%	WEIB(0,833; 0,807)
	Instrumentación y metrología	22,22%	0.04 + EXPO(0,272)
MOLINO 1	Eléctrica	0%	---
	Mecánica	66,67%	LOGN(0,221; 0,15)
	Instrumentación y metrología	33,33%	0,02 + LOGN(0,202; 0,146)

Nota. Fuente: Los autores

Los datos de entrada para la segunda fase del modelo son la cantidad de caña que entra al proceso de molienda y la velocidad de molienda en (Ton/Hora), estos se comportan según las distribuciones de probabilidad mostradas en la tabla 34.

Tabla 34. Variables del sistema de producción de patio y molinos de caña

DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD - FASE 2	
Caña entrada	NORM(323; 36,7)
Velocidad de molienda	NORM(355; 21,8)

Nota. Fuente: Los autores

6.5. VALIDACIÓN DEL MODELO

Se definen como medidas de interés la cantidad total de fallas generadas y el tiempo promedio total de reparación de todas las fallas del sistema analizado debido a que estos son los datos de mayor impacto para el indicador de tiempos perdidos en la empresa y se convierte en KPI gerencial en la compañía.

Al tomar una muestra piloto de 30 corridas durante 8760 horas equivalentes a 3 años los cuales fueron el tiempo durante el cual se analizaron los datos para obtener las distribución, se logran los siguientes datos aplicando el concepto de tamaño de muestra según la distribución T-Student con una confianza del 95% y un error estimado de 1 falla y 1 minuto (0,017 horas) de tiempo entre reparaciones.

Tabla 35. Parámetros de validación del modelo

PARAMETROS (T)	CANTIDAD DE FALLAS	TIEMPO ENTRE FALLAS
Alfa	5%	5%
T (2 Colas)	2,05	2,05
Error	1	0,017

Nota. Fuente: Los autores

Tabla 36. Tamaño de la corrida de simulación

VARIABLE	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	N
Cantidad de Fallas Totales	385	44,8	8395,38
Tiempo entre reparaciones	0,504	0,0341	17,51

Nota. Fuente: Los autores

Se define realizar 8396 corridas de simulación durante 8760 horas para obtener suficientes datos estadísticos para validar el modelo. De esta forma se obtienen los siguientes datos.

Tabla 37. Datos estadísticos de validación del modelo

	TIEMPO ENTRE REPARACIONES (HORAS)	CANTIDAD TOTAL DE REPARACIONES
Dato Histórico	0,549	390
Promedio	0,503	393
Desviación Estándar	20,1	38,5
C.I. 95% Ancho Intervalo	0,43	0,823
Límite Inferior	0,073	389,177
Límite Superior	0,933	393,823
Variación	-8,32%	0,77%

Nota. Fuente: Los autores

Se puede observar que cada uno de los datos históricos de las variables de interés se ubican dentro del intervalo de confianza que el análisis estadístico arrojó, por este motivo se puede establecer que el modelo de simulación propuesto representa la situación real y se puede modificar para obtener variables de interés según sea la necesidad.

Para la segunda fase se realizan 30 réplicas para obtener una muestra piloto del comportamiento de las toneladas de caña molida durante 24 horas, de esta forma se plantea aplicar el concepto de tamaño de muestra para distribuciones T-Student con un 95% de confianza y un error de 10 toneladas de caña molida, los datos obtenidos son los siguientes:

Tabla 38. Tamaño de la muestra para la variable de caña molida

VARIABLE	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR	N
Toneladas de Caña Molida	7650	9,79	6,26

Nota. Fuente: Los autores

Se determina continuar el estudio con la muestra de 7 observaciones para calcular los parámetros estadísticos requeridos.

Tabla 39. Datos estadísticos de variación del modelo

	TONELADAS DE CAÑA MOLIDA
Dato Histórico	7614
Promedio	7646
Variación	0,42%

Nota. Fuente: Los autores

El valor histórico correspondiente al promedio entre las 120 observaciones registradas y el promedio del dato simulado durante las 7 réplicas tienen una variación del 0,42% por lo cual se puede aceptar el modelo como representación de la realidad del sistema productivo objeto de análisis.

6.6. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Se plantea correr el modelo de la fase 1 el cual corresponde al comportamiento de fallas de los equipos durante un periodo de análisis de un año en tiempo del sistema, por tanto se conocerá el comportamiento que se podría presentar en el sistema de equipos críticos en el aspecto de fallas mecánicas, eléctricas e instrumentación y electricidad durante 8760 horas con 300 réplicas. Se propone simular un tiempo de 8760 horas debido a que es el equivalente a un año de operación ya que durante este tiempo la compañía evalúa la gestión de sus sistemas productivos y de mantenimiento, además porque durante este periodo se acumula el tiempo perdido y se arroja el consolidado del indicador de mayor interés del área de mantenimiento del ingenio azucarero. Para ser consistentes con el planteamiento de metas de un plan de mejoramiento, se propone reducir el tiempo entre reparaciones de las fallas mecánicas del conductor de tablillas gradualmente generando 10 escenarios posibles los cuales inician con una mejora de un 10% de reducción del periodo entre reparaciones de fallas mecánicas de dicho equipo hasta la eliminación de las mismas.

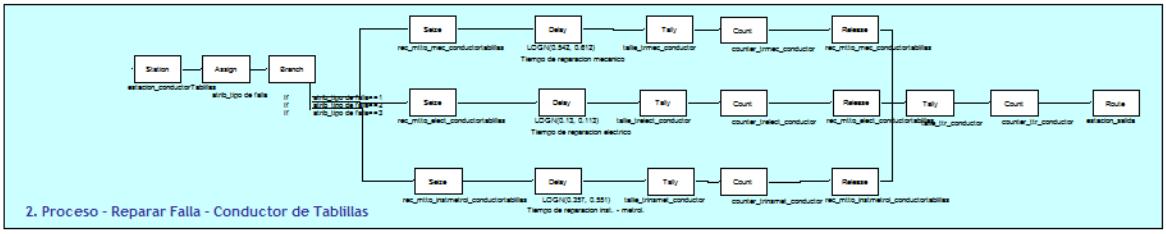


Figura 22. Representación parcial de bloques de SIMAN – Fase 1
Fuente: Los autores

En la fase 2 del modelo se establece correr el modelo durante las horas en las cuales el sistema presentó fallas para generar datos de caña molida, quintales producidos y la suma de dinero que se podría perder por tener equipos averiados en el sistema, de esta forma se pretende conocer el impacto de los equipos críticos en el proceso productivo. Para esta fase se establecen las siguientes ecuaciones:

Cantidad de Quintales Producidos

$$QQ = 20 * TCM * R$$
$$QQ: Cantidad\ de\ Quintales\ de\ Azucar$$
$$TCM: Toneladas\ de\ Caña\ Molida$$
$$R: Rendimiento\ de\ Caña\ de\ Azucar\ (\%)$$

Ecuación 10. Quintales producidos

Valor en pesos por Hora

$$Valor = QQ * (PV - CF) - TCM * CMP$$
$$PV: Precio\ de\ Venta\ de\ Quintal\ de\ Azucar\ (\$/QQ)$$
$$CF: Costos\ de\ Fabricacion\ por\ Quintal\ (\$/QQ)$$
$$CMP: Costo\ de\ Materia\ Prima\ (\$/Tonelada\ de\ Caña)$$

Ecuación 11. Estimado del margen de utilidad operativa

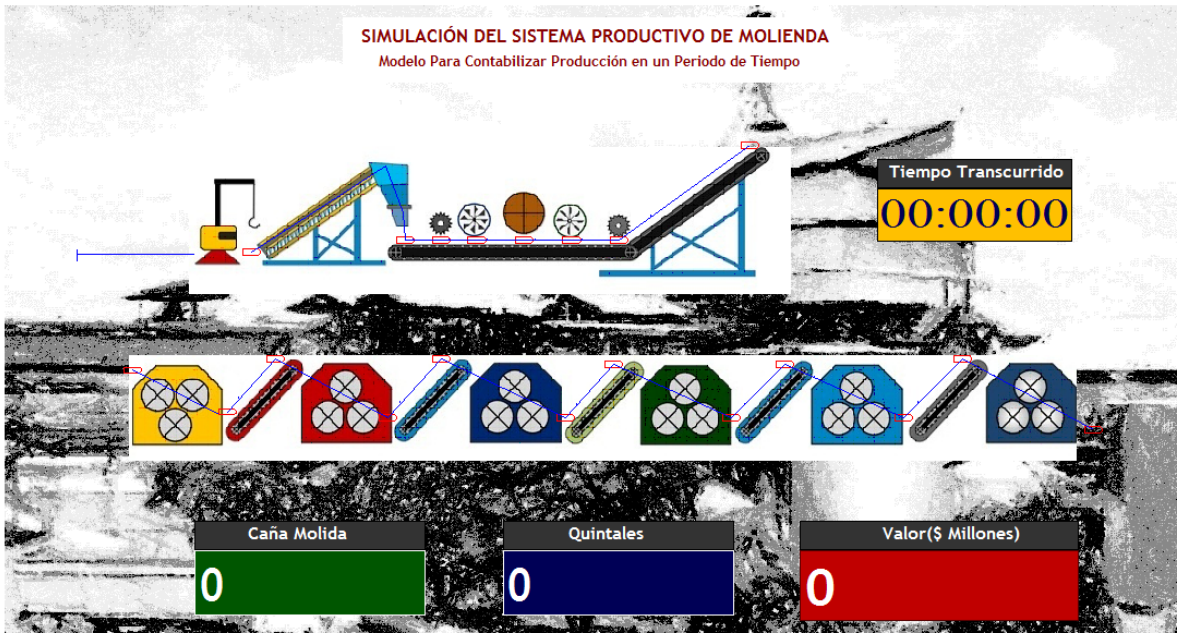


Figura 23. Animación del modelo del sistema productivo en SIMAN – Fase 2
Fuente: Los autores

Las medidas de productividad analizadas en la simulación son la caña molida (Ton/Hora) y Unidades Monetarias ($Millones), estas se derivan de la siguiente información.

Tabla 40. Valores de costos y precio de venta

CATEGORIA	VALOR	UNIDAD
Costos de producción unitarios	8.000	$/QQ
Costos de materia prima unitarios	45.000	$/TCM
Precio de venta unitarios	60.000	$/QQ

Nota. Fuente: Los autores

6.7. RESULTADOS

Al correr el experimento en un escenario donde no hay variación del tiempo entre reparaciones mecánicas del conductor de tablillas se obtiene el siguiente informe de SIMAN:

ARENA Simulation Results
License: STUDENT
Output Summary for 300 Replications

Project: FASE 1 | Run execution date :11/ 9/2013
Analyst: JR KB Model revision date:31/ 3/2013

OUTPUTS

Identifier	Average	Half-width	Minimum	Maximum	# Replications
TRMec Conductor	,56352	,01052	,34158	,98761	300
TRElect Conductor	,13151	,00545	,04282	,36524	300
TRInsMet Conductor	,28415	,05245	,00000	4,9102	300
TTR Conductor	,51237	,00954	,30853	,87885	300
TRMec Banda	,41303	,01770	,16267	1,8164	300
TRElect Banda	,32371	,01829	,00000	,51000	300
TRInsMet Banda	,16610	,02164	,00000	,38330	300
TTR Banda	,40834	,01486	,18312	1,5873	300
TRMec Donn2	,74619	,03714	,24989	2,9901	300
TRElect Donn2	,00000	,00000	,00000	,00000	300
TRInsMet Donn2	,17538	,05230	,00000	1,9848	300
TTR Donn2	,75132	,03672	,25685	2,9901	300
TRMec Desfib	,92487	,04306	,20088	2,4594	300
TRElect Desfib	,27505	,03839	,00000	,99869	300
TRInsMet Desfib	,28935	,02011	,00000	1,2366	300
TTR Desfib	,77100	,03242	,18801	1,9592	300
TRMec Mol1	,21839	,00442	,12808	,37614	300
TRElect Mol1	,00000	,00000	,00000	,00000	300
TRInsMet Mol1	,21893	,00664	,00000	,56858	300
TTR Mol1	,21807	,00361	,13926	,35361	300
TTR Total	,50231	,00716	,36370	,76686	300
CRMec Conductor	52,883	1,2763	26,000	84,000	300
CRElect Conductor	6,4566	,29034	1,0000	14,000	300
CRInstMet Conductor	1,5833	,14544	,00000	6,0000	300
CR Conductor	60,923	1,4155	29,000	100,00	300
CRMec Banda	16,516	,54396	2,0000	31,000	300
CRElect Banda	2,1766	,17792	,00000	7,0000	300
CRInsMet Banda	,56667	,08568	,00000	4,0000	300
CR Banda	19,260	,61976	5,0000	35,000	300
CRMec Donn2	15,053	,51141	5,0000	31,000	300
CRElect Donn2	,00000	,00000	,00000	,00000	300
CRInsMet Donn2	,18000	,05021	,00000	2,0000	300
CR Donn2	15,233	,51372	5,0000	31,000	300
CRMec Desfib	10,583	,42551	2,0000	22,000	300
CRElect Desfib	,65333	,08824	,00000	4,0000	300
CRInsMet Desfib	3,1833	,21685	,00000	11,000	300
CR Desfib	14,420	,49218	4,0000	30,000	300
CRMec Mol1	15,643	,53416	4,0000	29,000	300
CRElect Mol1	,00000	,00000	,00000	,00000	300
CRInsMet Mol1	7,4533	,36376	,00000	20,000	300
CR Mol1	23,096	,71494	9,0000	40,000	300
CR Total	132,93	2,7337	74,000	211,00	300

Figura 24. Resultados de simulación - Fase 1 - Escenario 0% de reducción
Fuente: Los autores

En un escenario con un 20% de reducción en variable objeto de estudio se obtienen los siguientes datos:

ARENA Simulation Results
I | License: STUDENT
Output Summary for 300 Replications

Project: FASE 1 — Run execution date :11/12/2013
Analyst: JR - KB — Model revision date:31/ 3/2013

Identifier	OUTPUTS Average	Half-width	Minimum	Maximum	# Replications
TRMec Conductor	.44860	.00824	.27241	.73115	300
TRElect Conductor	.13110	.00537	.04282	.36524	300
TRInsMet Conductor	.28646	.05330	.00000	4.9102	300
TTR Conductor	.41257	.00749	.25206	.68544	300
TRMec Banda	.41306	.01769	.16267	1.8164	300
TRElect Banda	.32378	.01829	.00000	.51000	300
TRInsMet Banda	.16610	.02164	.00000	.38330	300
TTR Banda	.40838	.01485	.18312	1.5873	300
TRMec Donn2	.74623	.03718	.24989	2.9901	300
TRElect Donn2	.00000	.00000	.00000	.00000	300
TRInsMet Donn2	.17538	.05230	.00000	1.9848	300
TTR Donn2	.75138	.03676	.25685	2.9901	300
TRMec Desfib	.92385	.04230	.20088	2.1452	300
TRElect Desfib	.27505	.03839	.00000	.99869	300
TRInsMet Desfib	.28993	.02014	.00000	1.2366	300
TTR Desfib	.77050	.03182	.18801	1.7875	300
TRMec Mol1	.21845	.00442	.12808	.37614	300
TRElect Mol1	.00000	.00000	.00000	.00000	300
TRInsMet Mol1	.21900	.00660	.00000	.56858	300
TTR Mol1	.21816	.00362	.13926	.35361	300
TTR Total	.45643	.00666	.32359	.67494	300
CRMec Conductor	52.883	1.2762	26.000	84.000	300
CRElect Conductor	6.4533	.29049	1.0000	14.000	300
CRInstMet Conductor	1.5833	.14544	.00000	6.0000	300
CR Conductor	60.920	1.4150	29.000	100.00	300
CRMec Banda	16.513	.54467	2.0000	31.000	300
CRElect Banda	2.1766	.17792	.00000	7.0000	300
CRInsMet Banda	.56667	.08568	.00000	4.0000	300
CR Banda	19.256	.62058	5.0000	35.000	300
CRMec Donn2	15.050	.51205	5.0000	31.000	300
CRElect Donn2	.00000	.00000	.00000	.00000	300
CRInsMet Donn2	.18000	.05021	.00000	2.0000	300
CR Donn2	15.230	.51428	5.0000	31.000	300
CRMec Desfib	10.590	.42560	2.0000	22.000	300
CRElect Desfib	.65333	.08824	.00000	4.0000	300
CRInsMet Desfib	3.1833	.21645	.00000	11.000	300
CR Desfib	14.426	.49141	4.0000	30.000	300
CRMec Mol1	15.640	.53506	4.0000	29.000	300
CRElect Mol1	.00000	.00000	.00000	.00000	300
CRInsMet Mol1	7.4500	.36328	.00000	20.000	300
CR Mol1	23.090	.71465	9.0000	40.000	300
CR Total	132.92	2.7333	74.000	211.00	300

Figura 25. Resultados de simulación - Fase 1 - Escenario 20% de reducción
Fuente: Los autores

De igual forma se pueden observar los siguientes resultados en un escenario con un 70% de reducción:

ARENA Simulation Results
License: STUDENT
Output Summary for 300 Replications

Project: FASE 1 — Run execution date :11/ 9/2013
Analyst: JR KB — Model revision date:31/ 3/2013

Identifier	OUTPUTS Average	Half-width	Minimum	Maximum	# Replications
TRMec Conductor	,16598	,00298	,10049	,27370	300
TRElect Conductor	,13105	,00536	,04282	,36524	300
TRInsMet Conductor	,28657	,05331	,00000	4,9102	300
TTR Conductor	,16730	,00299	,11172	,30825	300
TRMec Banda	,41296	,01770	,16267	1,8164	300
TRElect Banda	,32361	,01828	,00000	,51000	300
TRInsMet Banda	,16610	,02164	,00000	,38330	300
TTR Banda	,40829	,01486	,18312	1,5873	300
TRMec Donn2	,74500	,03710	,24989	2,9901	300
TRElect Donn2	,00000	,00000	,00000	,00000	300
TRInsMet Donn2	,17538	,05230	,00000	1,9848	300
TTR Donn2	,75010	,03668	,25685	2,9901	300
TRMec Desfib	,92501	,04246	,20088	2,1452	300
TRElect Desfib	,27505	,03839	,00000	,99869	300
TRInsMet Desfib	,28958	,02013	,00000	1,2366	300
TTR Desfib	,77089	,03187	,18801	1,7875	300
TRMec Mol1	,21841	,00442	,12808	,37614	300
TRElect Mol1	,00000	,00000	,00000	,00000	300
TRInsMet Mol1	,21903	,00655	,00000	,56858	300
TTR Mol1	,21817	,00361	,13926	,35361	300
TTR Total	,34386	,00623	,22330	,54574	300
CRMec Conductor	52,903	1,2798	26,000	84,000	300
CRElect Conductor	6,4566	,29064	1,0000	14,000	300
CRInstMet Conductor	1,5866	,14631	,00000	6,0000	300
CR Conductor	60,946	1,4179	29,000	100,00	300
CRMec Banda	16,523	,54411	2,0000	31,000	300
CRElect Banda	2,1833	,17832	,00000	7,0000	300
CRInsMet Banda	,56667	,08568	,00000	4,0000	300
CR Banda	19,273	,62101	5,0000	35,000	300
CRMec Donn2	15,060	,51149	5,0000	31,000	300
CRElect Donn2	,00000	,00000	,00000	,00000	300
CRInsMet Donn2	,18000	,05021	,00000	2,0000	300
CR Donn2	15,240	,51376	5,0000	31,000	300
CRMec Desfib	10,590	,42539	2,0000	22,000	300
CRElect Desfib	,65333	,08824	,00000	4,0000	300
CRInsMet Desfib	3,1900	,21698	,00000	11,000	300
CR Desfib	14,433	,49168	4,0000	30,000	300
CRMec Mol1	15,656	,53541	4,0000	29,000	300
CRElect Mol1	,00000	,00000	,00000	,00000	300
CRInsMet Mol1	7,4666	,36067	,00000	20,000	300
CR Mol1	23,123	,71356	9,0000	40,000	300
CR Total	133,01	2,7380	74,000	211,00	300

Figura 26 Resultados de simulación - Fase 1 - Escenario 70% de reducción
Fuente: Los autores

A partir del modelo planteado se analizan los datos en Output Analyzer de Rockwell Software (versión estudiantil) y de acuerdo al tiempo de observación determinado para el modelo de simulación se obtiene los siguientes datos.

Tabla 41. Impacto en de la mejora en el tipo de causa de falla del equipo analizado

FALLA MECÁNICA - CONDUCTOR DE TABLILLAS				
REDUCCIÓN EN TIEMPO DE REPARACIÓN PROPUESTO	**TIEMPO PROMEDIO DE REPARACIÓN (HORAS)**	**CANTIDAD PROMEDIO DE FALLAS**	**TIEMPO TOTAL REPARACIÓN (HORAS)**	**VARIACIÓN – TIEMPO TOTAL DE REPARACIÓN**
0%	0,5635	53	29,8006	Referencia
10%	0,5057	53	26,7440	-10,26%
20%	0,4486	53	23,7233	-20,39%
30%	0,3916	53	20,7125	-30,50%
40%	0,3345	53	17,6894	-40,64%

50%	0,2780	53	14,7022	-50,66%
60%	0,2218	53	11,7283	-60,64%
70%	0,1660	53	8,7808	-70,53%
80%	0,1102	53	5,8335	-80,43%
90%	0,0549	53	2,9041	-90,25%
100%	0,0000	53	0,0000	-100,00%

Nota. Fuente: Los autores

De igual forma se analizan los efectos de la mejora en el funcionamiento del equipo y se obtienen los siguientes datos.

Tabla 42. Impacto en de la mejora en el equipo analizado

CONDUCTOR DE TABLILLAS				
REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE REPARACIÓN PROPUESTO	**TIEMPO PROMEDIO DE REPARACIÓN (HORAS)**	**CANTIDAD PROMEDIO DE FALLAS**	**TIEMPO TOTAL REPARACIÓN (HORAS)**	**VARIACIÓN – TIEMPO TOTAL DE REPARACIÓN**
0%	0,5124	61	31,2151	Referencia
10%	0,4622	61	28,1542	-9,81%
20%	0,4126	61	25,1338	-19,48%
30%	0,3631	61	22,1234	-29,13%
40%	0,3136	61	19,1058	-38,79%
50%	0,2646	61	16,1184	-48,36%
60%	0,2158	61	13,1444	-57,89%
70%	0,1673	61	10,1963	-67,34%
80%	0,1189	61	7,2500	-76,77%
90%	0,0709	61	4,3247	-86,15%
100%	0,0233	61	1,4210	-95,45%

Nota. Fuente: Los autores

A partir del comportamiento de un solo equipo en un sistema productivo se pueden obtener mejoras en el sistema global, esto contribuye a analizar bajo la perspectiva del enfoque sistémico los datos del impacto en el comportamiento del sistema objeto de análisis.

Tabla 43. Impacto en de la mejora en el sistema de equipos críticos analizados

SISTEMA DE EQUIPOS CRÍTICOS				
REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE REPARACIÓN PROPUESTO	**TIEMPO PROMEDIO DE REPARACIÓN (HORAS)**	**CANTIDAD PROMEDIO DE FALLAS**	**TIEMPO TOTAL REPARACIÓN (HORAS)**	**VARIACIÓN – TIEMPO TOTAL DE REPARACIÓN**
0%	0,5023	133	66,7721	Referencia
10%	0,4792	133	63,6899	-4,62%

20%	0,4564	133	60,6687	-9,14%
30%	0,4337	133	57,6578	-13,65%
40%	0,4109	133	54,6155	-18,21%
50%	0,3884	133	51,6288	-22,68%
60%	0,3661	133	48,6697	-27,11%
70%	0,3439	133	45,7368	-31,50%
80%	0,3217	133	42,7950	-35,91%
90%	0,2996	133	39,8911	-40,26%
100%	0,2778	133	36,9934	-44,60%

Nota. Fuente: Los autores

Al analizar el tiempo promedio de reparación desde las perspectivas de falla, equipo y total del sistema se obtiene que el MTTR inherente a la falla es mayor en el escenario actual durante el cual no se realizan mejoras que puedan significar impactos importantes en el sistema. Al aplicar gradualmente mejoras se puede observar que cuando se cumple una meta de mejorar en un 20% el promedio de reparación de fallas se hace menor al promedio total, esto indica que la mejora en este punto empieza a influenciar sobre el comportamiento general del sistema y comienza a mejorar sus condiciones al alcanzar metas establecidas. En el punto correspondiente a una mejora del 70% del tiempo promedio de reparación de fallas mecánicas del conductor de tablillas dicho tiempo se hace menor que el promedio de reparación del equipo estableciendo que en este punto la mejora propuesta ha sido impactante en el sistema. Es así como se establece un intervalo crítico de reducción del tiempo de reparación de fallas mecánicas del conductor de tablillas entre un 20% y un 70% para obtener resultados visibles en el equipo y el sistema productivo.

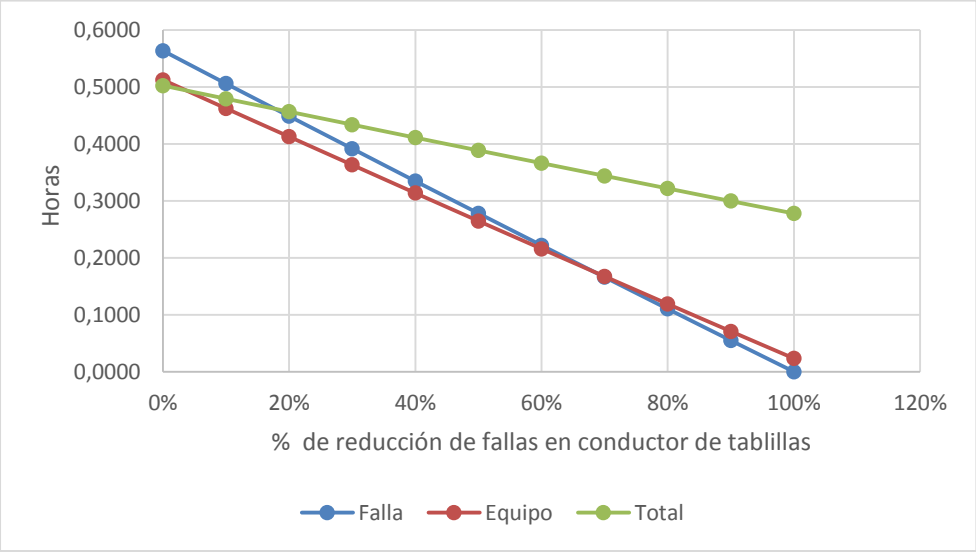


Figura 27. Tiempo promedio de reparación del conductor de tablillas
Fuente: Los autores

Mediante la aplicación de la prueba t pareada con un 95% de confianza para analizar la diferencia entre tiempo promedio del escenario sin mejoras (0%) y cada uno de los escenarios se obtiene la siguiente información:

$$\boldsymbol{D_i = Dato\ de\ Control_i - Dato\ de\ Propuesto_i}$$
$$\boldsymbol{Si\ D_i > 0: Si\ hay\ reducción\ de\ tiempo\ de\ reparación}$$
$$\boldsymbol{Si\ D_i < 0: No\ hay\ reducción\ de\ tiempo\ de\ reparación}$$
$$\boldsymbol{Si\ D_i = 0: Es\ incierto\ lo\ que\ sucede}$$

Ecuación 12. Criterios de decisión en prueba t pareada

Si los promedios para las medidas de interés son iguales entonces al plantear la prueba de hipótesis se tiene:

$$\boldsymbol{H_o: \mu_1 = \mu_2}$$

Ecuación 13. Hipótesis nula de comparación de medias aplicada al caso de estudio

Si los promedios para las medidas de interés son diferentes:

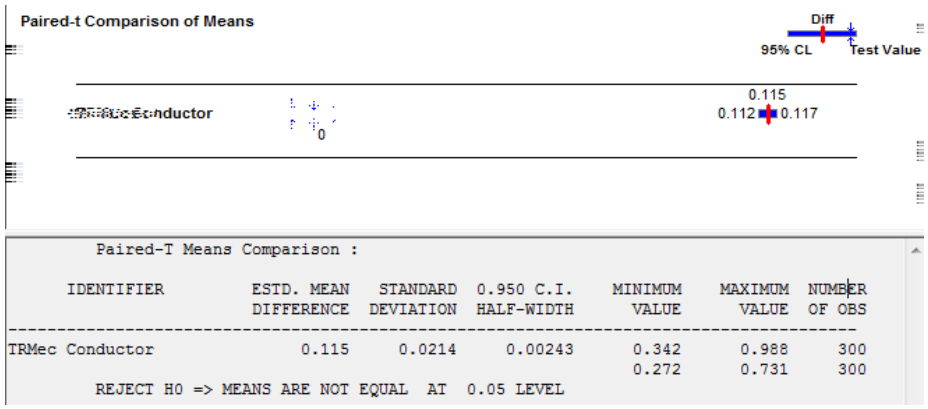
$$\boldsymbol{H_1: \mu_1 \neq \mu_2}$$

Ecuación 14. Hipótesis alterna de comparación de medias aplicada al caso de estudio

Tabla 44. Resultados estadísticos de la prueba t pareada

Escenario de Control VS Escenario Propuesto	Media de la Diferencia	Desviación Estándar	Ancho del Intervalo	Límite Inferior	Límite Superior
Control - 10%	0,0578	0,0127	0,0014	0,0564	0,0592
Control - 20%	0,1150	0,0214	0,0024	0,1126	0,1174
Control - 30%	0,1720	0,0306	0,0035	0,1685	0,1755
Control - 40%	0,2290	0,0402	0,0046	0,2244	0,2336
Control - 50%	0,2850	0,0492	0,0056	0,2794	0,2906
Control - 60%	0,3420	0,0581	0,0066	0,3354	0,3486
Control - 70%	0,3980	0,0673	0,0077	0,3904	0,4057
Control - 80%	0,4530	0,0760	0,0086	0,4444	0,4616
Control - 90%	0,5090	0,0843	0,0096	0,4994	0,5186
Control - 100%	0,5640	0,0925	0,0105	0,5535	0,5745

Nota. Fuente: Los autores

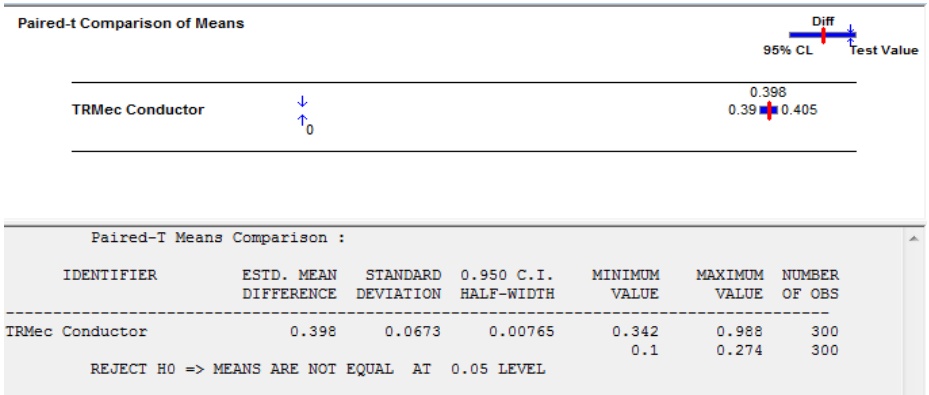



```
        Paired-T Means Comparison :

     IDENTIFIER          ESTD. MEAN   STANDARD  0.950 C.I.    MINIMUM    MAXIMUM  NUMBER
                         DIFFERENCE  DEVIATION  HALF-WIDTH      VALUE      VALUE  OF OBS
-----------------------------------------------------------------------------------------
TRMec Conductor               0.115     0.0214     0.00243      0.342      0.988     300
                                                                0.272      0.731     300
        REJECT H0 => MEANS ARE NOT EQUAL  AT  0.05 LEVEL
```

Figura 28. Prueba T pareada escenarios 0% y 20% de reducción – Output Analizer
Fuente: Los autores

Para la comparación entre los escenarios de control y de reducción del 20% en el tiempo de reparación mecánico del conductor de tablillas se rechaza la hipótesis nula ($\boldsymbol{H_o}$) a un nivel de confianza del 95%.




```
        Paired-T Means Comparison :

     IDENTIFIER          ESTD. MEAN   STANDARD  0.950 C.I.    MINIMUM    MAXIMUM  NUMBER
                         DIFFERENCE  DEVIATION  HALF-WIDTH      VALUE      VALUE  OF OBS
-----------------------------------------------------------------------------------------
TRMec Conductor               0.398     0.0673     0.00765      0.342      0.988     300
                                                                  0.1      0.274     300
        REJECT H0 => MEANS ARE NOT EQUAL  AT  0.05 LEVEL
```

Figura 29. Prueba T pareada escenarios 0% y 70% de reducción – Output Analizer
Fuente: Los autores

Para la comparación entre los escenarios de control y de reducción del 70% en el tiempo de reparación mecánico del conductor de tablillas se rechaza la hipótesis nula ($\boldsymbol{H_o}$) a un nivel de confianza del 95%.

Al ser intervalos de confianza ubicado dentro del lado positivo de la recta numérica y sin contener el cero entre sus valores, se establece que las mejoras si pueden tener impactos positivos dentro del sistema productivo durante un periodo de análisis de 8760 horas, esto se basa en que el tiempo del escenario de control donde no se aplicaron mejoras es mayor y si el escenario propuesto tiene tiempos menores la diferencia será positiva.

En la segunda fase del modelo se ejecuta el escenario de producción durante el tiempo que se podría perder en cada uno de los escenarios planteados obteniendo los siguientes resultados:

```
                    ARENA Simulation Results
                  IRON MAN - License: STUDENT

              Output Summary for 7 Replications

Project: FASE 2                                   Run execution date :11/14/2013
Analyst: KB JR                                    Model revision date:11/14/2013

                              OUTPUTS

Identifier                  Average    Half-width Minimum    Maximum # Replications
------------------------------------------------------------------------------------

Cana Molida                  9503.0     10.117     9481.0     9515.0     7
QQ                           22807.     24.281     22754.     22836.     7
Valor Pesos                  758.33     .80737     756.58     759.29     7
```

Figura 30. Resultados de simulación - Fase 2 - Escenario 0% de reducción
Fuente: Los autores

Tabla 45. Resultados del modelo de producción en toneladas de caña

TONELADAS DE CAÑA MOLIDA					
% MEJORA - REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE REPARACIÓN	**TIEMPO TOTAL DE REPARACIÓN DE LA FALLA**	**PROMEDIO**	**C.I. 95% ANCHO INTERVALO**	**LÍMITE INFERIOR**	**LÍMITE SUPERIOR**
0%	29,80	9503,00	10,12	9492,88	9513,12
10%	26,74	8524,80	8,14	8516,66	8532,94
20%	23,72	7557,00	6,13	7550,87	7563,13
30%	20,71	6595,40	6,77	6588,63	6602,17
40%	17,69	5632,20	4,62	5627,58	5636,82
50%	14,70	4679,40	51,46	4627,95	4730,86
60%	11,73	3732,00	5,18	3726,82	3737,18
70%	8,78	2790,50	7,06	2783,44	2797,56
80%	5,83	1849,80	6,74	1843,06	1856,54
90%	2,90	918,42	44,95	873,47	963,37
100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota. Fuente: Los autores

De igual forma se obtienen resultados de los quintales que se dejarían de producir durante cada periodo de tiempo.

Tabla 46. Resultados del modelo de producción en quintales de azúcar

QUINTALES DE AZUCAR					
% MEJORA - REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE REPARACIÓN	**TIEMPO TOTAL DE REPARACIÓN DE LA FALLA**	**PROMEDIO**	**C.I. 95% ANCHO INTERVALO**	**LÍMITE INFERIOR**	**LÍMITE SUPERIOR**
0%	29,80	22807,00	24,18	22794,91	22819,09
10%	26,74	20459,00	19,54	20449,23	20468,77
20%	23,72	18136,00	14,72	18128,64	18143,36
30%	20,71	15829,00	16,25	15820,87	15837,13

40%	17,69	13517,00	11,08	13511,46	13522,54
50%	14,70	11230,00	12,35	11223,83	11236,17
60%	11,73	8956,80	12,43	8950,59	8963,01
70%	8,78	6697,30	16,95	6688,83	6705,77
80%	5,83	4439,60	16,18	4431,51	4447,69
90%	2,90	2204,20	10,79	2198,81	2209,59
100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota. Fuente: Los autores

El impacto de la mejora sobre la producción de quintales de azúcar se visualiza en la Tabla 46, de tal forma que la empresa puede tomar decisiones referentes a su capacidad y los métodos para aumentar la eficiencia de tiempo a través de la reducción del tiempo de reparación de fallas mecánicas del conductor de tablillas.

7. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DEL PLAN DE MEJORA PROPUESTO

7.1. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO

Se plantea utilizar el modelo correspondiente a la segunda fase del estudio de simulación para obtener datos financieros ligados directamente a la producción para calcular el equivalente en pesos colombianos del margen de utilidad operativa que se dejaría de percibir por el tiempo en que no hay producción por un fallo mecánico del conductor de tablillas.

Se utiliza la siguiente tabla de datos para configurar los parámetros en el modelo.

Tabla 47. Margen de utilidad operativa por hora – Año 2012

AÑO 2012		
CATEGORÍA	**VALOR**	**UNIDAD**
Producción	5.286.393,00	QQ/año
Toneladas de azúcar	264.319,65	ton az/año
Caña molida	2.203.950,23	TCM/año
Tiempo total	8.760,00	Horas
Tiempo hábil	6.936,00	Horas
Tiempo perdido	574,70	Horas
Tiempo producción	6.361,30	Horas
Costos de producción unitarios	8.000,00	$/Q
Costos de materia prima unitarios	45.000,00	$/TCM
Precio de venta unitarios	60.000,00	$/QQ
Costos de producción totales	42.291.144.000,00	$/año
Costos de materia prima totales	99.177.760.350,00	$/año
Ingresos totales	317.183.580.000,00	$/año

Costos de producción por hora	6.097.339,10	$/hora
Costos de materia prima por hora	14.298.985,06	$/hora
Ingresos por hora	45.730.043,25	$/hora
Margen de utilidad $/hora	25.333.719,10	$/hora
Perdidas por hora de parada	25.333.719	$/hora

Nota. Fuente: Los autores

Al correr la simulación durante los tiempos propuestos según cada escenario se obtiene:

Tabla 48. Margen de utilidad operativa por falla mecánica en el Conductor de tablillas

MARGEN DE UTILIDAD (Millones de Pesos Colombianos)					
% REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE REPARACIÓN	**TIEMPO TOTAL REPARACIÓN**	**PROMEDIO**	**ANCHO INTERVALO (C.I. 95%)**	**LÍMITE INF.**	**LÍMITE SUP.**
0%	29,80	758,33	0,81	757,93	758,73
10%	26,74	680,28	0,65	679,96	680,60
20%	23,72	603,04	0,49	602,80	603,28
30%	20,71	526,31	0,54	526,04	526,58
40%	17,69	449,45	0,37	449,27	449,63
50%	14,70	373,41	0,41	373,20	373,62
60%	11,73	297,81	0,41	297,60	298,02
70%	8,78	222,68	0,56	222,40	222,96
80%	5,83	147,61	0,54	147,34	147,88
90%	2,90	73,29	0,36	73,11	73,47
100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota. Fuente: Los autores

Las mejoras propuestas influencian directamente el tiempo de operatividad del sistema productivo por lo tanto puede significar la continuidad de la producción en determinados periodos de tiempo, lo cual significa que el proceso productivo puede transformar una mayor cantidad de materia prima, en este caso caña de azúcar convirtiéndola jugo diluido, al impactar directamente sobre la cantidad de caña molida la empresa se encuentra en capacidad de transformar una mayor proporción de materia prima en producto terminado. Según el intervalo crítico de mejora establecido se aprecia que entre el 20% y el 70% se pueden moler entre 2790,5 y 7557 toneladas de caña de azúcar significando una producción entre 6687,3 y 18136 quintales de azúcar lo cual representa un margen operativo para la empresa entre 222,68 y 603,04 millones de pesos.

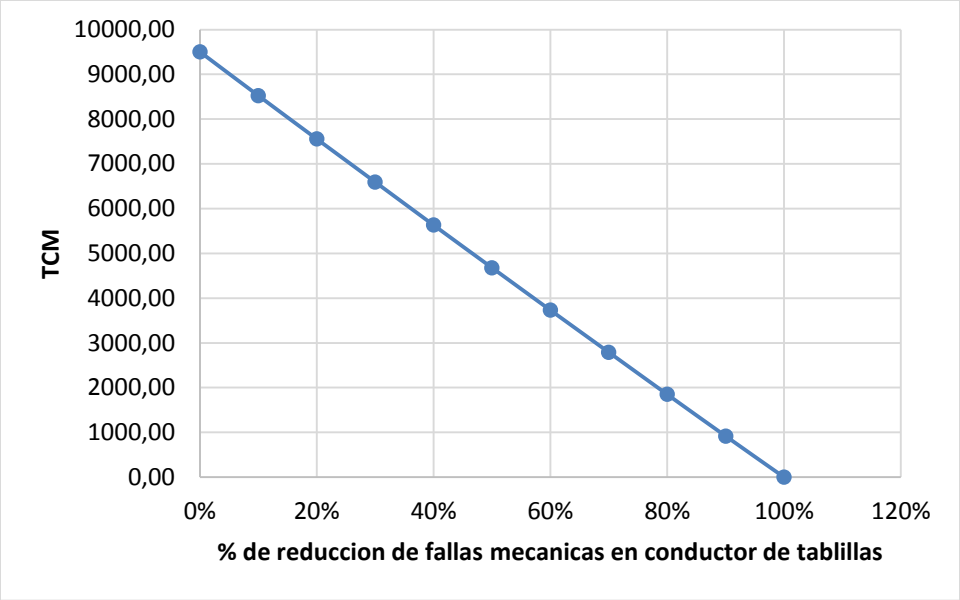


Figura 31. Toneladas promedio de caña molida
Fuente: Los autores

Los costos estimados para implementar el proyecto durante el primer año para mejorar la eficiencia del tiempo promedio entre reparaciones se aproxima como se muestra en la tabla 49.

Tabla 49. Costos de implementación del plan de mejora

COSTOS	CANTIDAD	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
Personal			
Analista TPM	1	$ 2.700.000	$ 32.400.000
Practicante Ingeniería Mecánica	1	$ 1.275.000	$ 15.300.000
Practicante Ingeniería Industrial	1	$ 1.275.000	$ 15.300.000
Capacitación			$ 20.000.000
Materiales			
Material de oficina			$ 1.000.000
Tablero de capacitación	4	$ 65.000	$ 260.000
Tablero de gestión visual	2	$ 90.000	$ 180.000
Adecuación de equipos y lugares			
Otros			$ 281.399
Computador portátil			$ 1.400.000
Mesa de juntas con sillas			$ 3.200.000
Presupuesto motivación			
Premios			$ 5.000.000
Bonos	12	$ 600.000	$ 7.200.000
Imprevistos			$ 10.152.140
TOTAL			**$ 111.673.539**

Nota. Fuente: Los autores

Calculando el ingreso que puede obtener la compañía restando al promedio de margen operativo del escenario donde no hay mejora el mismo concepto en cada uno de los escenarios donde se presentan mejoras se obtienen las siguientes cifras:

Tabla 50. Análisis beneficio-costo de la implementación

% MEJORA - REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE REPARACIÓN	PROMEDIO (MILLONES DE PESOS)	DIFERENCIA (MILLONES DE PESOS)	BENEFICIOS/COSTOS
0%	758,33		
10%	680,28	78,05	0,70
20%	603,04	155,29	1,39
30%	526,31	232,02	2,08
40%	449,45	308,88	2,77
50%	373,41	384,92	3,45
60%	297,81	460,52	4,12
70%	222,68	535,65	4,80
80%	147,61	610,72	5,47
90%	73,29	685,04	6,13
100%	0	758,33	6,79

Nota. Fuente: Los autores

La eficiencia de las operaciones de reparación del conductor de tablillas se reflejan en dinero, de la anterior tabla se puede concluir que el escenario mínimo requerido de los propuestos para que el proyecto sea viable es el correspondiente al 20% de mejora ya que a partir de este la relación costo/beneficio es mayor a 1.

CONCLUSIONES

- El diagnostico desarrollado en la empresa consolida el resultado en un nivel no satisfactorio según la matriz de mantenimiento clase mundial por lo cual se establece que la organización tiene falencias en planeación del mantenimiento preventivo y no planea a largo plazo, la administración del mantenimiento cuenta con poco personal especializado en la disciplina, realiza solo técnicas de inspección basadas en el tiempo, los indicadores de desempeño consisten en algunos registros de paradas y costos de mantenimiento no segregados, además el software de mantenimiento comprende algunos programas y registro de repuestos, se realizan algunas reuniones en seguridad en donde participa el personal de mantenimiento y finalmente los procesos de mantenimiento y los registros de fallas son usados y revisados con poca frecuencia.

- Se logran identificar focos de mejora clave como el fortalecimiento de la aplicación de metodologías de análisis de confiabilidad en los equipos, medidas de desempeño, análisis de procesos, recursos humanos, tácticas de mantenimiento, planeación de actividades y la consolidación de una estrategia organizacional de mantenimiento.

- Dentro de la dinámica del sistema de gestión de mantenimiento no se realizan suficientes actividades que fortalezcan la planeación, lo cual contribuye a generar un sistema reactivo ante fallas en lugar de preventivo a sucesos inesperados.

- Cada área perteneciente a la unidad de mantenimiento tiene establecido las políticas, objetivos, y planes para llevar a cabo sus funciones operacionales, sin embargo la empresa como unidad funcional no tiene establecido una política de mantenimiento y el plan estratégico no está definido claramente.

- En la fábrica no existe una metodología estructurada e implementada sistemáticamente permita modelar la confiabilidad y acceder a información precisa para planear las actividades de mantenimiento mediante sistemas de cálculo y aplicación de técnicas estadísticas.

- La gestión del talento humano a nivel operativo debe fortalecerse debido a que el conocimiento adquirido es en gran parte empírico y no se tienen procedimientos establecidos para transmitir el saber hacia otras generaciones. Además de esto los riesgos no se manejan adecuadamente y los empleados no identifican claramente las consecuencias de desviarse de la planeación.

- A pesar de que cuentan con un sistema de información (SAP) adaptado a las necesidades de gestión de mantenimiento y activos, este no es aprovechado debido a que los procedimientos que respaldan el ingreso de datos no son ejecutados cabalmente.

- Mediante análisis de criticidad se priorizan las áreas de patio de caña y molinos debido a que la cantidad fallas presentadas es de 50,11% y 37,06% respectivamente consolidando un total de 388 fallas equivalente a un 87,19% de las fallas de la fábrica. También se tienen en cuenta horas perdidas por mantenimiento, según este factor de evaluación el área de patio de caña reflejan un 54,16% y en molinos un 23,67% con un total de 148,54 horas abarcando una proporción del 77,83% del tiempo perdido por reparaciones de fallas en la planta.

- A partir de la evaluación de los criterios relevantes que comprenden diferentes metodologías de mantenimiento se elige una filosofía que abarca desde las técnicas para la planeación detallada de los equipos hasta las actividades fundamentales de todas las áreas funcionales de la compañía, siendo el Mantenimiento Productivo Total (TPM) la metodología acorde con las necesidades generales y específicas de la empresa

- Se determina la aplicación de un plan de mejora basado en TPM en el conductor de tablillas debido a que es el equipo con mayor índice de tiempo perdido por reparaciones.

- El plan de mejora se basa en los pilares de mantenimiento autónomo y mantenimiento planificado del TPM ya que contribuyen directamente a mejorar las condiciones del equipo en un determinado periodo de tiempo y mejora la capacidad de recolección y análisis de la información para realizar análisis de confiabilidad en los equipos.

- Para una implementación exitosa del plan TPM propuesto para el conductor de tablillas se debe aplicar primero un programa 5 S con el fin de mejorar el nivel de orden en la fábrica haciendo énfasis en la cultura corporativa para aceptar y adaptar cambios.

- El modelo de simulación propuesto es representativo de la realidad, por lo tanto puede ser utilizado para analizar el comportamiento de las variables derivadas de los equipos como tiempo entre fallas, cantidad de fallas, tiempo entre reparación, y, las variables del sistema productivo como cantidad de toneladas de caña molida, quintales procesados y margen de utilidad aproximado generado por hora.

- Las mejoras propuestas influencian directamente sobre el tiempo de operatividad del sistema productivo por lo tanto, puede significar la continuidad de la producción en determinados periodos de tiempo.

- Los escenarios propuestos de mejora se enfocan en la reducción del tiempo de reparación de fallas mecánicas demostrando que cambios focalizados inteligentemente impactan sobre la mejora del sistema general según los parámetros del enfoque sistémico.

- Se establece un intervalo crítico de mejora entre el 20% y 70% donde la proporción de reducción del tiempo promedio para reparación de fallas mecánicas en el conductor de

tablillas afecta directamente el sistema de equipos críticos y el equipo particular, reflejando una reducción gradual de dichas variables.

- Se debe realizar una mejora de al menos el 20% de reducción del tiempo de reparación de fallas mecánicas en el conductor de tablillas para que el proyecto sea rentable para la empresa.

- Se logra validar el objetivo del mantenimiento planificado de mejorar en un 50% la confiabilidad de las maquinas manteniendo bajo el principio de mantener la disponibilidad, ya que por medio del modelo de simulación se pudo establecer que al reducir el 50% del tiempo promedio de reparación de fallas mecánicas del conductor de tablillas se obtiene una mejora en el tiempo total de reparación del 50,67% pasando de 29,80 a 14,70 horas de reparación que a su vez aprovechan el tiempo productivo para generar ingresos adicionales equivalentes a 373,41 millones de pesos.

RECOMENDACIONES

- Ampliar la investigación con estudios complementarios para analizar el comportamiento de las variables de interés en diferentes escenarios donde se efectúen cambios simultáneos.

- Realizar la evaluación económica del proyecto considerando factores financieros relacionados con el comportamiento del entorno donde se desempeña la empresa.

- Alinearse a una norma internacional certificable en sistemas de gestión de mantenimiento.

- Desarrollar planes alternos que apunten al mejoramiento de los focos identificados para fortalecer los aspectos del sistema de gestión de mantenimiento.

- Realimentar el análisis de criticidad de equipos con datos actualizados del último periodo de tiempo.

- Fortalecer el manejo del sistema de información de administración de mantenimiento para mejorar el flujo de datos que impacten sobre el sistema de gestión de la fábrica.

- Aplicar el estudio en otros equipos de la fábrica para definir planes de mantenimiento según su comportamiento histórico y proyectado mediante el modelo de simulación.

- Actualizar los datos estadísticos de los parámetros del modelo de simulación.

- Ingresar la picadora al estudio cuando haya estabilizado su comportamiento.

BIBLIOGRAFÍA

A.J. De Ron y J.E. Rooda. (2005). OEE and equipment effectiveness: an evaluation.

Aldo Fábregas et al. (2003). Simulación de sistemas productivos con Arena. Barranquilla, Colombia: Universidad del Norte.

Alvaro Oquendo y Manuel Helguero. (2002). Elaboración de un programa de simulación de molienda en el Ingenio Azucarero San Carlos, para determinar la eficiencia por molinos de un Trapiche.

Amendola L. (2011). Gestión Integral de Activos como estrategia de negocios (Assessment, PAS 55 - ISO 55000).

Amendola L. (2011). Indicadores de Confiabilidad propulsores en la gestión de mantenimiento.

British Standars Institution. (2008). "Parte 1: Specification for the optimized management of physical assets" y "Guidelines for the application of PAS 55-1".

Bustamante, G. A. (2006). Situación actual e implementación de mejoras en el mantenimiento mecánico de los sistemas de enfriamiento por agua y de suministro de agua proceso de la Planta San Miguel, de Cementos Progreso S.A.

Cáceres, M. B. (2002). Cómo Incrementar la Competitividad del Negocio mediante Estrategias para Gerenciar el Mantenimiento.

Carrero, B. S. (2009). Implantación de la dinámica TPM en una línea de pintura de fabricación de vehículos.

Carson, J. S. (2005). Introduction to Modeling and Simulation.

Caselli, H. (2009). Manual de Simulación con Arena.

Dairo Mesa, Yesid Ortiz y Manuel Pinzón. (2006). La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad.

Duarte, J. C. (2006). Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad usando métodos de simulación del ciclo de vida.

Duffuaa Raouf Dixon. (2009). Sistemas de Mantenimiento: Planeación y Control. México: Limusa Wiley.

Duran, J. B. (2010). Gestión de Mantenimiento bajo estándares internacionales como PAS 55 Asset Management.

Emirio Vásquez y Sallik Villamizar. (2011). Modelo para auditar la gestión del mantenimiento de PDVSA.

Escudero, A. (2007). Implantación de la filosofía TPM en una planta de producción de envasado.

Giraldo, S. (2008). TPM como modelo de generación de valor en las industrias.

Gutiérrez, A. M. (2009). Mantenimiento, planeación, ejecución y control. México: Alfaomega.

Hortiales, M. A. (1997). Implementación del Mantenimiento Productivo Total. San Nicolas de los Garza, N. L.

Ingalls, R. G. (2011). Introduction to simulation.

Ingenio Objeto de Estudio. (2012). Informe de Sostenibilidad 2012.

Jorge Loor y Fernando Sandoya. (1996). Simulación y evaluación de la confiabilidad de un proceso del sistema de producción.

Juan A. Marín, M. Rosario Perello, Julian Maheut y Pilar Vidal. (2010). Causas de fallo en la implantación del TPM y modelo de puesta en marcha integrador.

Kit Fai Pun y Nigel Sookdeo. (2010). Adoption of an Effectiviness-Centered Approach to Improve Maintenance Operations: a Case Study.

Leonardo Montaña Riveros y Elkin Gustavo Rosas Niño. (2006). Diseño de un sistema de mantenimiento con base en análisis de criticidad y análisis de modos y efectos de falla en la Planta de Coque de fabricación primaria en la empresa Acerías Paz del Río S.A.

Luiz Augusto G. et al. (2011). Maintenance frome work to address the interaction of componentes using simulation.

Mª Carmen Carnero y Rafael López. (2010). Análisis de información oara la implantación de un programa de Manteniiento Productivo Total.

Marco Catena y Alessandro Persona. (2004). Accelerated TPM by Simulation.

Mendoza, J. A. (2007). Implementación TPM a líneas productivas en Dana- México Plantas ejes atractivos.

Montoya I.G. y Parra C.E. (2010). Implementación del Total Productive Management (TPM) como tecnología de gestión para el desarrollo de los procesos de Maquiavicola LTDA.

Murillo, W. M. (2008). Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Programa de Entrenamiento: Mantenimiento Clase Mundial. RCM Ingeniería.

Niebel B. W., Freivalds A. . (2004). Ingeniería Industrial, Métodos Estándares y Diseño del Trabajo. Mexico: Alfaomega.

Paola Andrea Parrado y Juliana Sánchez Botero. (2004). Estructuración e implementación del pilar mejora enfocada en Tetra Pack Colombia.

Quiroz, E. (2007). Simulación.

Rivera, F. R. (1997). Analisis de Confiabilidad de los departamentos de patio de caña, calderas y molinos de un Ingenio Azucarero. Guatemala.

Sacristán, F. R. (2005). Las 5S. Madrid: Fundación Confemetal.

Sacristán, F. R. (2012). Mantenimiento Total de la Producción. España: Fundación Confemetal.

Sargent, R. G. (2009). Verification and validation of simulation models.

Shamsuddin Ahmed y Masjuki Hj Hassan. (2012). Action plans for implementation of Total Productive Mantenace.

Sorabh Gupta, PC. Tewari y Avadhesh Kumar. (2006). TPM concept and implementation approach.

Sturrock, D. T. (2011). Tips for successful practice of simulation.

Tavares, L. (2000). Administración Moderna del Mantenimiento. Brasil: Novo Polo Publicações.

TD Jacobs y JK Visser. (2004). Evaluation of the Maintenance Management Fuction for a Control Plant a Substation.

The Institute of Asset Management. (2008). Asset Management: PAS 55:2008. British Standars.

Venkatesh J. (2005). An Introduction to Total Productive Maintenance (TPM).

Yodaira Pentón, Estrella María de la Paz y Fernando Marrero. (2006). El análisis multicriterio en la realización de la auditoria de mantenimiento en empresas de la agroindustria azucarera.

ANEXOS

Anexo 1. Formato de encuestas de la gestión de mantenimiento

EVALUACIÓN DE LA ORGANIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO
OBJETIVO: Evaluar el estado actual del área de mantenimiento para hacer un diagnóstico general del área en relación con la matriz de mantenimiento clase mundial. **PROCEDIMIENTO:** Leer la pregunta y calificarla de 1 a 10 en la columna puntaje, según su criterio.

ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO	PUNTAJE
¿Se tiene definida la estrategia del área de mantenimiento?	
¿El direccionamiento estratégico y la estructura organizacional de la empresa facilitan el desempeño adecuado del mantenimiento?	
¿Se planea a corto plazo en mantenimiento?	
¿Se planea a mediano plazo en mantenimiento?	
¿Se tienen planes de mejoramiento a largo plazo?	
¿Se ha cumplido con los objetivos y planes planteados en el área de mantenimiento?	
Observaciones:	

ADMINISTRACIÓN Y ORGANIZACIÓN	PUNTAJE
¿Se tienen delimitadas las funciones del área de mantenimiento?	
¿Existen procedimientos y se conocen por todos para la ejecución de los trabajos de mantenimientos?	
¿El área de mantenimiento se encuentra integrada con las áreas funcionales de la organización como logística, finanzas y producción?	
¿Está el área de mantenimiento sincronizada con la necesidad operativa del proceso principal?	
¿Son suficientes las herramientas y equipo de trabajo para desarrollar las actividades de mantenimiento?	
¿Se encuentran implementados sistemas de mejora continua en los procesos técnicos y administrativos del área de mantenimiento?	
¿Cómo calificar el desempeño de la organización y administración?	
Observaciones:	

PLANEACIÓN Y PROGRAMACIÓN	PUNTAJE
¿Existe soporte de ingeniería y mantenimiento a largo plazo?	
¿La planeación del trabajo y programación de mantenimiento se encuentran implementadas?	
¿Hay grupos de planeación e ingeniería y mantenimiento establecidos?	
¿Hay soporte para la Detección de fallas (planeación no profunda)?	
¿Se programan paros para el mantenimiento de los equipos?	
¿Existen rutinas prestablecidas de intervenciones diarias?	
¿Están documentados los trabajos pendientes por periodo?	

¿La planeación para las actividades de mantenimiento es una actividad permanente y controlada?	
¿Se cumple el programa de trabajos planificados de mantenimiento?	
Observaciones:	

TACTICAS DE MANTENIMIENTO	**PUNTAJE**
¿Se reconoce alguna metodología de mantenimiento estructurado como TPM, RCM, RBI entre otros?	
¿La metodología aplicada ofrece resultados satisfactorios?	
¿Se hacen planes de mantenimiento preventivo o alguna acción equivalente?	
¿Están definidos los procedimientos para realizar el mantenimiento preventivo?	
¿Se encuentran definidos los procedimientos para enfrentar el mantenimiento correctivo?	
¿Existe un control definido para las inspecciones con factores de tiempo y registros de actividades desarrolladas?	
¿Las órdenes de trabajo tienen un seguimiento riguroso?	
¿Se lleva control del estado de avance de las órdenes de trabajo?	
¿Se conoce el lapso de tiempo promedio entre la solicitud de atención por falla y la emisión de la orden de trabajo?	
Observaciones:	

MEDIDAS DE DESEMPEÑO	**PUNTAJE**
¿Cálculo de confiabilidad de los equipos y la planta?	
¿Buena base de datos de costos implementada?	
¿Índices de análisis estructurado RCM, MTBF, UT, MTTR, entre otros?	
¿Está cuantificado el tiempo de producción perdido por fallas?	
¿Se identifican los costos de pérdidas de producción por fallas?	
¿Las medidas de desempeño han contribuido a la mejora del mantenimiento?	
Observaciones:	

TECNOLOGÍA DE INFORMACIÓN	**PUNTAJE**
¿Basados en datos totalmente segregados?	
¿Se apoya en algún paquete computacional para la coordinación de mantenimiento?	
¿Gestión del Sistema de Mantenimiento Computarizado ligado a financieros y materiales?	
¿Se cuenta con información precisa para llevar índice de control de eficiencia?	
¿Los tiempos de paradas con modo, causa y elementos de falla, costos de mantenimiento disponibles son registrados?	
¿El sistema actual de manejo de la información muestra la disponibilidad, confiabilidad y costos de mantenimiento bien estructurados?	
¿Es confiable la información de los datos proporcionados?	
¿Se ha aplicado algunas mejoras en la manera de suministrar la información?	

Observaciones:

PARTICIPACIÓN DEL EMPLEADO	**PUNTAJE**
¿Las actividades que desarrolla el personal de mantenimiento están de acuerdo a sus potencialidades?	
¿El personal conoce las normas y políticas que se relacionan con sus actividades?	
¿El área de mantenimiento tiene definidos sus cargos y se respetan?	
¿Se ha desarrollado algún programa de capacitación en mantenimiento a los miembros del área?	
¿Se tienen programas de actualización, capacitación y adiestramiento del personal de mantenimiento?	
¿El personal de mantenimiento percibe que es tomado en cuenta para la toma de decisiones en la empresa?	
¿El personal de mantenimiento siempre sabe qué hacer, como hacerlo y cuando hacerlo?	
¿La rotación de personal siempre se efectúa de acuerdo a las necesidades del área de mantenimiento?	
¿El personal que hace parte de mantenimiento, el nivel de supervisión o coordinación es el adecuado?	
¿Los operadores de los equipos realizan tareas sencillas de mantenimiento?	
¿Se tienen métodos y procedimientos para evaluar el desempeño del personal de mantenimiento y se cumplen?	
¿Los aportes del empleado han mejorado el sistema de mantenimiento?	
Califique el grado de autonomía del personal de mantenimiento	
Observaciones:	

ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD	**PUNTAJE**
¿Programas de confiabilidad?	
¿Se hace el modelamiento de la confiabilidad?	
¿Se cuenta con un sistema de cálculos de confiabilidad de equipos y planta?	
¿Hay registros detallados con datos de tiempos, herramientas y repuestos de cada mantenimiento realizado?	
¿Se evalúa el remplazo o mantenibilidad de los equipos?	
¿El análisis de confiabilidad es confiable y efectivo?	
¿Se ha aplicado nuevas técnicas estadísticas para un mejor análisis de confiabilidad?	
Observaciones:	

ANÁLISIS DE LOS PROCESOS	**PUNTAJE**
¿Están las áreas de producción clasificadas por algún criterio?	
¿Se encuentran identificados los procesos productivos según su criticidad?	
¿Existe revisión regular de los procesos administrativos de mantenimiento (estratégico, táctico y operativo)?	

¿Se encuentra certificado en ISO 9000 los procesos de mantenimiento?	
¿Es continua la revisión de los procesos?	
Observaciones:	

INFORMACIÓN SOBRE INFRAESTRUCTURA E INSTALACIONES	**PUNTAJE**
¿Dispone los catálogos e información de los equipos?	
¿Existen códigos que identifiquen los equipos?	
¿Se encuentran clasificados los equipos según su criticidad ante una falla?	
¿Es posible cuantificar la incidencia de la falla de un equipo sobre otro (s)?	
¿Están identificados los riesgos del operario para cada equipo?	
¿Los equipos tienen fichas de inventarios?	
¿Posee cada equipo programa de trabajo de mantenimiento?	
¿Existen registros de la disponibilidad de repuestos en la bodega?	
¿Está implementado algún sistema de clasificación de repuestos?	
¿Está definido el tiempo de abastecimiento para cada grupo de repuestos?	
Observaciones:	

Anexo 2. Listado de preguntas de entrevistas de la gestión de mantenimiento

DIAGNÓSTICO DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO					
ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO					
	Si	**No**			
¿Existen políticas claras y establecidas de gestión de activos y mantenimiento?					
	Nacimiento	**Crecimiento**	**Madurez**	**Declive**	
¿En qué punto se encuentra el plan estratégico de mantenimiento?					
	Cumplidos	**En proceso**	**Pendientes**		
¿Cuántos objetivos cumplidos, en proceso y pendientes se registran al cerrar el año referente a la gestión del mantenimiento?					
	Bajo	**En crecimiento**	**Medio**	**Alto**	**Supremo**
¿En qué nivel se encuentra la integración del equipo de trabajo de gestión de mantenimiento con la alta gerencia?					
	Cantidad				
¿Cuántas reuniones mensuales se realizan con la alta gerencia para tratar temas de gestión de mantenimiento?					
	Nulo	**Débil**	**Parcial**	**Fuerte**	**TOTAL**
	0	**1**	**2**	**3**	**4**
Existen y son comprendidas las estrategias y objetivos de la gestión de activos					
Objetivos y metas de adquisición, uso, reparación y desecho de equipos					
Estrategias de área integradas con la estrategia corporativa					
OBSERVACIONES					

PLANEACIÓN Y PROGRAMACIÓN					
	Nulo	**Débil**	**Parcial**	**Fuerte**	**TOTAL**
	0	**1**	**2**	**3**	**4**
¿Se tiene en cuenta la estrategia corporativa para adquirir equipos o fundamentar procesos?					
¿Los activos tienen plan asignado y definido para su adquisición, uso, reparación y desmantelamiento?					
Nivel de programación a largo plazo					
Nivel de programación a mediano plazo					
Nivel de programación a corto plazo					
Nivel de mantenimiento reactivo					
Asignación de roles y responsabilidades definidas					
En la planeación se especifican los procedimientos y actividades específicas a desarrollar					
¿El tiempo para desarrollar las tareas se encuentra definido previamente?					
¿Se encuentran medidos los riesgos que afecten los equipos y procesos?					
¿Se tienen planes para situaciones de emergencia que afecten los activos de la empresa?					
¿Las órdenes de trabajo integran procedimientos, materiales y operadores?					
OBSERVACIONES					
	Nulo	**Débil**	**Parcial**	**Fuerte**	**TOTAL**
	0	**1**	**2**	**3**	**4**
¿Las funciones dentro del área referentes a mantenimiento se encuentran definidas?					
¿Se cumplen rigorosamente estas funciones?					
¿Qué nivel de apoyo recibe la planeación de mantenimiento en cuanto a recursos humanos, financieros y materiales?					

¿Los equipos se encuentran clasificados según su importancia en el proceso productivo?					
¿El sistema de órdenes de trabajo facilita la ejecución de mantenimiento?					
¿Las listas de partes de los equipos a los que se les realiza mantenimiento se encuentran identificadas?					
¿Los contratistas referentes a mantenimiento desarrollan procesos que se integran a la estrategia de la organización?					
¿Se encuentra formalmente estructurado un sistema de comunicación y difusión de la información?					
¿La comunicación es efectiva?					
¿Se encuentra formalmente estructurado un sistema documental de organización de la información?					
¿El sistema de documentación es efectivo?					
OBSERVACIONES					
RECURSO HUMANO					
NIVEL	**CANTIDAD**	**%**	**CAPACITACIÓN**		**%**
	Definir el personal dentro del área		*Cantidad de capac. A las que asistió*	*Total de capacitaciones*	
ESTRATÉGICO					
TACTICO					
OPERATIVO					

GRUPOS DE MEJORAMIENTO	**CANTIDAD**	**%**
EMPRESA	19	100,00%
PLANTA	9	47,37%
P- MANTENIMIENTO	**5**	**55,56%**

NIVEL	PARTICIPACIÓN EN GRUPOS DE MEJORAMIENTO *Cant. de participantes del área en grupos de mejoramiento de mantenimiento*	%
ESTRATÉGICO		
TACTICO		
OPERATIVO		

	NIVEL DE CUMPLIMIENTO				
RECURSOS HUMANOS	**Nulo**	**Débil**	**Parcial**	**Fuerte**	**TOTAL**
ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
Mapa de riesgos de manejo de activos					
Definición de roles y responsabilidades					
Los trabajadores identifican consecuencias de desviarse de la planeación					
Las sugerencias de los empleados son escuchadas					
Los empleados enriquecen los procesos del área					
Se comunican resultados de investigaciones de Mantenimiento a los empleados					
OBSERVACIONES					

MEDIDAS DE DESEMPEÑO					
	Nulo	**Débil**	**Parcial**	**Fuerte**	**TOTAL**
	0	**1**	**2**	**3**	**4**
Índices de análisis estructurado en alguna metodología como TPM o RCM					
¿Está cuantificado el tiempo de producción perdido por fallas?					
Estructuración, implementación y funcionamiento de procesos de monitoreo de equipos y sistemas productivos					
Procesos de verificación de cumplimiento legal y del sistema en general					

¿Se desarrollan auditorias en determinados periodo de tiempo para evaluar la efectividad del sistema de mantenimiento?					
Nivel de implementación de acciones preventivas					
Nivel de implementación de acciones correctivas					
¿Se desarrollan proyectos de mejora en el sistema de mantenimiento?					
La documentación actual demuestra las acciones y procesos de la gestión de mantenimiento					
¿La gerencia revisa que los indicadores del área contribuyan al cumplimiento de los objetivos estratégicos de la organización?					
¿La participación de la gerencia en el sistema de mantenimiento contribuye al mejoramiento continuo del sistema?					
OBSERVACIONES					

TECNOLOGÍA DE INFORMACIÓN					
	Nulo	**Débil**	**Parcial**	**Fuerte**	**TOTAL**
	0	**1**	**2**	**3**	**4**
Cuenta con un sistema de información de gestión de activos y mantenimiento					
¿Se encuentran asignados perfiles de acceso al sistema con diferentes privilegios según el nivel de planeación?					
¿La información referente a los equipos se encuentra sistematizada?					
¿Cuál es el nivel de integración del sistema de información con gestión logística, almacén y compras?					
¿Se cuenta con información precisa para llevar índice de control de eficiencia?					
¿Los tiempos de paradas con modo, causa y elementos de falla, costos de mantenimiento disponibles son registrados?					
¿El sistema actual de manejo de la información muestra la disponibilidad, confiabilidad y costos de mantenimiento?					
OBSERVACIONES					

ANÁLISIS DE PROCESOS					
	Nulo	**Débil**	**Parcial**	**Fuerte**	**TOTAL**
	0	**1**	**2**	**3**	**4**
Nivel de clasificación de las áreas productivas para desarrollar procesos del área de mantenimiento					
Estandarización de procesos de mantenimiento					
Identificación de riesgos físicos de los procesos					
Identificación de riesgos operacionales de los procesos					
Identificación de riesgos ambientales de los procesos					
Identificación de los riesgos de los activos en su ciclo de vida					
Estructuración e implementación de métodos de manejo de riesgos de los procesos de mantenimiento					
Cumplimiento legal de los procesos del área de mantenimiento					
¿Los cambios en los procesos son asimilados fácilmente?					
¿Los activos se preparan y adaptan a cambios de gestión físicos o metodológicos?					
OBSERVACIONES					

TÁCTICAS DE MANTENIMIENTO					
	NIVEL DE CUMPLIMIENTO				
MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (RCM)	**Nulo**	**Débil**	**Parcial**	**Fuerte**	**TOTAL**
ELEMENTOS TÍPICOS	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
Revisión de las especificaciones del diseño					
Determinación de requerimientos ambientales					
Estudios de complejidad de los sistemas					
Reparto de confiabilidad y predicción de la confiabilidad de los sistemas					

Formación del personal en las metodologías del TPM y RCM					
Revisiones del diseño de los equipos					
Determinación de componentes críticos					
Calificación de componentes (mantenibilidad y calidad)					
Planificación de pruebas y ensayos					
Sistemas de datos y codificación de fallos a mínima expresión					
Análisis de datos (historiales de fallos y tiempos de funcionamiento)					
Análisis de componentes fallados					
Evaluación de datos y reportes de la acción correctiva					
Ensayos ambientales y de diseño					
Comparación con prototipos					
Ensayo de la confiabilidad hasta el fallo incluir el sistema					
Coordinación con control de calidad					
Coordinación con producción					
Coordinación con servicio post-compra					
Presentación de resultados					
	NIVEL DE CUMPLIMIENTO				
MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL (TPM)	**Nulo**	**Débil**	**Parcial**	**Fuerte**	**TOTAL**
ELEMENTOS TÍPICOS	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
Programa de mantenimiento					
Registros de fallas de equipo					
Registros Tiempo muerto por reparación y ajustes					
Trabajo en vacío y paros menores					
Reducción de la velocidad					
Defectos del proceso					
Rendimiento reducido					
Implementación de 5S					
Capacitación al personal de mantenimiento					
Mantenimiento Predictivo					
Mantenimiento Preventivo					

	NIVEL DE CUMPLIMIENTO				
INSPECCIÓN BASADA EN RIESGOS (RBI)	**Nulo**	**Débil**	**Parcial**	**Fuerte**	**TOTAL**
ELEMENTOS TÍPICOS	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**
Identificación de los riesgos industriales					
Diseño de estrategias de inspección					
Priorización de las inspecciones					
Revisión de las condiciones del proceso					
Revisión de los materiales					
Revisión del riesgo de los activos					
Medición de los riesgos					
	Nulo	**Débil**	**Parcial**	**Fuerte**	**TOTAL**
	0	**1**	**2**	**3**	**4**
Investigación de fallas, incidentes y no conformidades					
OBSERVACIONES					
INFRAESTRUCTURA E INSTALACIONES					
	Nulo	**Débil**	**Parcial**	**Fuerte**	**TOTAL**
	0	**1**	**2**	**3**	**4**
¿Se gestiona el mantenimiento en cada etapa del ciclo de vida de los equipos?					
¿Posee cada equipo programa de trabajo de mantenimiento?					
¿Se inspecciona la condición de los equipos frecuentemente?					
¿Según los hallazgos encontrados en los equipos, se emprenden acciones de mantenimiento priorizadas?					
Seguimiento y medición de los equipos y herramientas					
Codificación de los equipos					
Los activos se encuentran en la base de datos del CMMS					
¿Existen registros de la disponibilidad de repuestos en la bodega?					
¿Está definido el tiempo de abastecimiento para cada grupo de repuestos?					
OBSERVACIONES					

Anexo 3. Benchmarking TPM

IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO DEL TPM
1. ¿Por qué decidieron implementar el TPM?
2. ¿Cuál es la propuesta de valor del TPM dentro de su empresa y como afecta está a la estrategia corporativa?
3. ¿Cuál es la estructura organizacional de TPM en la empresa?
4. ¿Cómo fue el comienzo del proceso de implementación y desarrollo?
5. ¿Quiénes gestaron el proyecto TPM?
6. ¿Cómo fue asimilado la estrategia TPM a nivel gerencial y operacional?
7. ¿Cuáles son las responsabilidades de la oficina TPM?
8. ¿Cómo fue la designación de los responsables por pilar?
9. ¿Cada cuánto se reúnen para discutir temas TPM?
10. ¿Existen grupos de mejoramiento?
11. ¿Desarrollaron alianzas estratégicas para el desarrollo del proyecto TPM?
12. ¿Qué acciones se realizaron para lograr el cambio de cultura dentro de la empresa?
13. ¿Qué capacitaciones se realizaron para iniciar el proyecto?
14. ¿A quiénes fueron dirigidas dichas capacitaciones?
15. ¿Cómo gestionaron el conocimiento adquirido en las formaciones iniciales?
16. ¿Qué grupos de trabajos se conformaron para el TPM?
17. ¿Qué metodología de trabajo utilizan en cada equipo?
18. ¿Implementaron las 5s antes o paralelamente con Mantenimiento autónomo?
19. ¿Qué actividades se realizaron en 5s?
20. ¿Cuál fue el pilar inicial implementado?
21. ¿Cuántos pilares TPM actualmente se encuentran implantados?
22. ¿Qué actividades específicas se desarrollaron para los pilares
23. ¿Qué duración tuvo la implementación de los pilares?
24. ¿Qué área de la empresa seleccionaron como piloto?
25. ¿Qué razones soportaron la selección de ésta área piloto?
26. ¿Qué tiempo llevo desarrollar el plan en el área piloto?
27. ¿Cómo lograron sostener el cambio generado con la implementación?
28. ¿Cada cuánto se desarrollan auditorías al sistema TPM?
29. ¿En cuánto tiempo se obtuvieron resultados satisfactorios?
30. ¿Para la implementación del TPM fue necesario contratar más personas?
31. ¿Para qué actividades fueron contratados?
32. ¿Qué costos se han generado debido a la implantación del TPM?
33. ¿La oficina TPM tiene algún presupuesto?
34. ¿Cuáles han sido las principales dificultades de la implementación?
35. ¿Cómo ha facilitado el TPM la planeación y programación del mantenimiento?
36. ¿Cuánto tiempo duró el desarrollo del TPM?

37. ¿Disminuyeron los tiempos perdidos por TPM?
38. ¿Disminuyeron los paros en la planta?
39. ¿Aumentó la Productividad?
40. ¿Cómo afectó el TPM los aspectos logísticos de la compañía como gestión de inventarios?
41. ¿Cómo son las relaciones con los clientes después del TPM?
42. ¿Cómo integran a los proveedores en la estrategia TPM?
43. ¿Qué indicadores gerenciales evalúan los resultados del TPM?
44. ¿Cómo miden la condición de los equipos?
45. ¿La tecnología de información soportó la filosofía TPM?
46. ¿Se encuentran clasificados y priorizados los equipos dentro del sistema productivo?
47. ¿Cómo enfrentan las paradas de fábrica?
48. ¿Alguna técnica para el análisis?
49. ¿Cómo se encuentra integrada el sistema de información de mantenimiento con los sistemas productivos?
50. ¿Se hace análisis de Confiabilidad?
51. ¿Mediante que técnicas?
52. ¿Qué indicadores manejan para la disponibilidad y confiabilidad de los equipos?
53. ¿El TPM facilitó el análisis de confiabilidad?
54. ¿Qué recomienda para la implementación TPM?