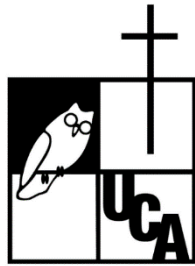


UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA JOSÉ SIMEÓN CAÑAS
UNIVERSIDAD DON BOSCO



**“PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA
CONFIABILIDAD PARA EQUIPOS DE CENTRIFUGACIÓN EN LA
INDUSTRIA AZUCARERA DE EL SALVADOR”**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREPARADO PARA LA FACULTAD DE
POSTGRADOS UCA Y**

FACULTAD DE INGENIERÍA UDB

**PARA OPTAR AL GRADO DE:
MAESTRO EN GERENCIA DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

AUTORES:

ELIAS ALEJANDRO CANTADERIO MOLINA

ERICK ALFREDO CASTRO OTERO

KEVIN GIOVANNI RAMIREZ CAMPOS

ASESOR:

CARLOS LIQUEZ

ANTIGUO CUSCATLÁN, EL SALVADOR, C. A.

OCTUBRE 2025

Rectores

Mario Ernesto Cornejo, S.J.

Mario Rafael Olmos Argueta, SDB.

Secretarias Generales

Lidia Gabriela Bolaños Teodoro

Yesenia Xiomara Martínez Oviedo

Decana de Postgrados UCA

Ingrid Evangelina Gómez Aguilar

Decano de Facultad de ingeniería

Moisés Roberto Guerra Menjívar

Directores de la Maestría en Gerencia del Mantenimiento Industrial

Diana Carolina Cruz UCA

José Luis Martínez UDB

Director de Tesis

Carlos Liquez

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación desarrolla una propuesta de plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) aplicado a las centrífugas discontinuas de un ingenio azucarero de El Salvador. El estudio parte de un diagnóstico inicial de las condiciones actuales de mantenimiento, caracterizado por prácticas correctivas y preventivas tradicionales, que han mostrado limitaciones frente a la elevada criticidad de los equipos de centrifugación durante la zafra.

La metodología empleada incluyó la aplicación de la auditoría AMORMS, el análisis de modos de falla, efectos y criticidad, así como la evaluación de costos asociados a mano de obra, materiales, consumibles y pérdidas por paros de producción. Con base en estos insumos, se diseñó un plan de mantenimiento orientado a reducir la frecuencia de fallas y los tiempos de inactividad, priorizando las tareas según impacto en seguridad, confiabilidad y costos.

Los resultados proyectados evidencian que la aplicación del RCM contribuirá a optimizar el uso de los recursos, aumentar la disponibilidad de los equipos y mejorar la eficiencia global del proceso productivo.

Además, se establece que la propuesta podrá implementarse en el período de no zafra identificado como Z2526, sujeto a la decisión gerencial, con la finalidad de medir sus beneficios durante la zafra Z2627.

INDICE GENERAL

Contenido

RESUMEN EJECUTIVO	i
INDICE GENERAL	ii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	vii
SIGLAS	viii
NOMENCLARUTA	x
CAPITULO 1 INTRODUCCION.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3 PROBLEMA CIENTIFICO	4
1.4 JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION	4
1.5 OBJETIVOS.....	5
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.5.2 OBJETIVO ESPECIFICOS	5
1.6 ALCANCE.....	5
1.7 LIMITACIONES	5
1.8 ESTADO DEL ARTE.....	6
CAPITULO 2 MARCO TEORICO	9
2.1 TIPOS DE MANTENIMIENTO	9
2.2 PROCESO DE PRODUCCION DE AZUCAR.....	10
2.2.1 COSECHA DE LA CAÑA	10
2.2.2 TRANSPORTE DE LA CAÑA	10

2.2.3 MOLIENDA DE LA CAÑA	10
2.2.4 GENERACIÓN DE VAPOR Y CALENTAMIENTO	11
2.2.5 CLARIFICACIÓN DEL JUGO	11
2.2.6 FILTRACIÓN.....	11
2.2.7 EVAPORACIÓN.....	11
2.2.8 CRISTALIZACIÓN.....	12
2.2.9 CENTRIFUGADO Y SEPARACIÓN DE CRISTALES.....	12
2.2.10 SECADO Y ALMACENAMIENTO	12
2.3 PROCESO DE CENTRIFUGADO	13
2.3.1 SEPARACIÓN DEL AZÚCAR CRISTALIZADO DEL JARABE (MIEL)	13
2.3.2 DIFERENCIAS ENTRE CENTRIFUGAS DE PRIMERA, SEGUNDA Y TERCERA EXTRACCIÓN	14
2.3.3 IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA EN ESTA ETAPA	14
2.3.4 PRINCIPIOS FÍSICOS DEL PROCESO DE CENTRIFUGADO	15
2.3.5 PARÁMETROS OPERACIONALES CLAVE.....	15
2.4 EQUIPOS DE CENTRIFUGADO	16
2.4.1 TIPOS DE EQUIPO.....	16
2.4.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	17
2.5 RELEVANCIA EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR	19
2.6 FALLOS COMUNES EN EQUIPOS DE CENTRIFUGADO	20
2.6.1 CORROSIÓN	20
2.6.2 DAÑO DE CANASTA ROTATORIA	20
2.6.3 DESBALANCEO Y VIBRACIONES	21
2.6.4 PROBLEMAS DE LAVADO	22
2.6.5 FALLAS DE AISLANTE DE MOTOR PRINCIPAL	23

2.6.6 PROBLEMAS EN EL ARADO	23
2.7 CENTRIFUGA DISCONTINUA	23
2.7.1 GRUPO CONSTRUCTIVO.....	25
2.8 MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD.....	30
2.8.1 EVOLUCION Y APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA.....	30
2.8.2 PRINCIPIOS DE LA METODOLOGIA RCM.....	31
CAPITULO 3 METODOLOGIA PLAN DE MANTENIMIENTO APLICANDO RCM.....	34
3.1 IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA RCM.....	34
3.2 DIAGRAMA DE DECISIÓN	35
3.3 PATRON DE FALLA	36
3.4 AMFEC.....	37
3.4.1 ETAPAS FUNDAMENTALES DEL AMFEC	37
3.4.2 ANÁLISIS DE CRITICIDAD Y EVALUACIÓN CUANTITATIVA	38
3.5 ANÁLISIS DE MODOS DE FALLOS, EFECTOS Y CRITICIDAD.....	39
3.5.1 INDICES PARA LA EVALUACION DE CRITICIDAD	39
3.5.2 CÁLCULO DEL NÚMERO DE PONDERACIÓN DE RIESGO	41
CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1 FICHA TECNICA	42
4.2 ANÁLISIS DE MODOS DE FALLOS, EFECTOS Y CRITICIDAD.....	44
4.3 PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO	45
4.4 ANALISIS DE COSTOS	47
4.4.1 COSTOS DE MANTENIMIENTO ACTUAL.....	48
4.4.2 COSTOS DE MANTENIMIENTO PROPUESTO.....	49
4.4.4 REDUCCIÓN DE COSTOS	50
4.5 CALCULO ROI Y PERIODO DE RECUPERACION.....	51

4.6 IMPACTO EN OEE DEL PLAN DE MANTENIMIENTO RCM PROPUESTO	51
4.7 PLAN DE IMPLEMENTACION DE LA PROPUESTA	52
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
5.1 CONCLUSIONES.....	54
5.2 RECOMENDACIONES.....	54
REFERENCIAS	55
ANEXO A, REPORTES GENERADOS POR LA APLICACIÓN INTERNA	A-1
ANEXO B, MATRIZ AMFEC	B-1
ANEXO C, CALCULO DE COSTOS DE MANTENIMIENTO ACTUAL	C-1
ANEXO D, CALCULO DE COSTOS DE MANTENIMIENTO POPUESTOS	D-1
ANEXO E, AUDITORIA AMORMS	E-1

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1. PROCESO DE FABRICACIÓN DE AZÚCAR CON SUS SUBPRODUCTOS (ASOCIACIÓN AZUCARERA DE EL SALVADOR, 2009).....	1
FIG. 2. ORGANIGRAMA DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO DEL INGENIO (ELABORACIÓN PROPIA).....	3
FIG. 3. DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA FÁBRICA DE AZÚCAR CRUDO (CHEN, 1985)	13
FIG. 4. CENTRÍFUGA TITAN DISCONTINUA.(WESTERN STATES MACHINE COMPANY, 2020)	16
FIG. 5. CENTRÍFUGA CONTINUA ROBERTS SERIE I.(WESTERN STATES MACHINE COMPANY, 2020) ..	17
FIG. 6 TÍPICOS DEFECTOS DE TAMIZ Y AROS DE CANASTA (BROADBENT, 1997).....	21
FIG. 7. CANASTAS DESBALANCEADAS.(BROADBENT, 2001)	22
FIG. 8. GRUPOS CONSTRUCTIVOS CENTRIFUGA DISCONTINUA (BMA, 2018).....	24
FIG. 9. DESCARGADOR CON CILINDRO DE GIRO (BMA, 2018).....	25
FIG. 10. CABEZAL DE ACCIONAMIENTO (BMA, 2018)	25
FIG. 11. ACOPLAMIENTO (BMA, 2018)	26
FIG. 12. OBTURADOR (BMA, 2018)	27
FIG. 13. TUBO PORTA TOBERA DE AGUA (BMA, 2018).....	28
FIG. 14. PALPADOR DE CARGA MECÁNICO (BMA, 2018)	29
FIG. 15. DISPOSITIVO DE CARGA (BMA, 2018).....	29
FIG. 16. DIAGRAMA DE DECISIÓN EN RCM.(MOUBRAY, 1997)	35
FIG. 17. PATRONES DE FALLAS (MOUBRAY, 1997)	36
FIG. 18. TAREAS IMPORTANTES DEL AMFEC (BEN-DAYA ET AL., 2009).....	38
FIG. 19. FICHA TÉCNICA CENTRIFUGA (ELABORACIÓN PROPIA)	43
FIG. 20. PLAN DE IMPLEMENTACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA)	53

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COMPARACIÓN DE CENTRIFUGAS WESTERN STATES VS BROADBENT. (ELABORACIÓN PROPIA).....	18
TABLA 2. GRUPOS CONSTRUCTIVOS CENTRIFUGA DISCONTINUA (ELABORACIÓN PROPIA)	24
TABLA 3. CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE GRAVEDAD (GARDELLA GONZÁLEZ, 2011).....	39
TABLA 4. CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE FRECUENCIA DE FALLA (GARDELLA GONZÁLEZ, 2011).	40
TABLA 5. CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE DETECTIBILIDAD (GARDELLA GONZÁLEZ, 2011)	40
TABLA 6. PONDERACIÓN DE RIESGO PARA TODOS LOS COMPONENTES DE LA CENTRIFUGA DISCONTINUA (ELABORACIÓN PROPIA)	41
TABLA 7. PONDERACIÓN DE RIESGO PARA TODOS LOS COMPONENTES DE LA CENTRIFUGA TIPO DISCONTINUA (ELABORACIÓN PROPIA).	45
TABLA 8. PROPUESTA PARA MODO DE FALLAS NO CRITICO (ELABORACIÓN PROPIA).	46
TABLA 9. PROPUESTA PARA MODO DE FALLAS CRITICO (ELABORACIÓN PROPIA).	46
TABLA 10. COSTOS DE LA EJECUCIÓN DE LOS DOS PLANES PROPUESTOS (ELABORACIÓN PROPIA).	47
TABLA 11. COSTOS DE MANO DE OBRA PERSONAL DE CENTRIFUGADO (ELABORACIÓN PROPIA) .	48
TABLA 12. RESUMEN DE COSTOS ACTUALES POR MANTENIMIENTO (ELABORACIÓN PROPIA).....	49
TABLA 13. RESUMEN DE COSTOS PROPUESTOS POR MANTENIMIENTO (ELABORACIÓN PROPIA) ...	50
TABLA 14. PROYECCIÓN DE AHORRO 5 AÑOS (ELABORACIÓN PROPIA)	50

SIGLAS

CAFTA-DR	Tratado de Libre Comercio entre Centroamérica y Estados Unidos
RCM	Reliability Centered Maintenance (Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad)
CM	Mantenimiento Correctivo
PM	Mantenimiento Preventivo
PdM	Mantenimiento Predictivo
TPM	Total Productive Maintenance (Mantenimiento Productivo Total)
IA	Inteligencia Artificial
NPR	Numero de Ponderación de Riesgo
G	Gravedad de falla
F	Frecuencia de falla
D	Detectabilidad
OT	Orden de Trabajo
SAP	Systemanalyse Programmentwicklung (Desarrollo de programas para sistemas de análisis)
AMFEC	Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad
AMORMS	Auditoria de Mantenimiento Orientada a la Confiabilidad y Mejora de Resultados en Sistemas.
FMEA/ AMEF	Failure Mode and Effects Analysis (Análisis de Modo de Falla)
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotrices)
CMMS	Computerized Maintenance Management System (Sistema Computarizado de Gestión del Mantenimiento)
MTBF	Mean Time Between Failures (Tiempo Medio Entre Fallas)
MTTR	Mean Time To Repair (Tiempo Medio para la reparación)
OEE	Overall Equipment Effectiveness (Eficiencia General de los Equipos)

ISO	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)
RTF	Run to Failure (Operación hasta falla)

NOMENCLARUTA

RPM	Revoluciones por minuto.
mm	Milímetros
kg	Kilogramos
MTPH	Tonelada métrica por hora
\$ (USD)	Dólar estadounidense
kW	Kilowatt
t	Tonelada
min	Minuto
h	Horas

CAPITULO 1 INTRODUCCION

1.1 ANTECEDENTES

La industria azucarera en El Salvador es uno de los sectores agrícolas más relevantes, desempeñando un papel clave en la economía nacional. Su importancia radica no solo en la producción de azúcar y sus derivados, sino también en su contribución al empleo, beneficiando económicamente a numerosas familias salvadoreñas. Los principales destinos de exportación incluyen Estados Unidos y la Unión Europea, así como mercados emergentes en Asia, que han sido aprovechados gracias a acuerdos comerciales como el CAFTA-DR.

El Salvador se ha consolidado como un exportador destacado de azúcar a nivel global. La relación comercial con Europa y la creciente demanda en Asia han generado nuevas oportunidades para la industria azucarera salvadoreña. Este posicionamiento estratégico en mercados internacionales demuestra la capacidad del país para competir globalmente y subraya la relevancia del sector en la economía nacional. (*Hacia Los Mercados Globales Del Azúcar – Azucar*, 2016)

Además del azúcar refinado y crudo, la industria salvadoreña produce diversos subproductos que agregan valor y diversifican la oferta del sector, como se muestra esquemáticamente en la Figura 1. Entre estos subproductos destacan la melaza, utilizada en la producción de etanol y como aditivo en la alimentación animal, y el bagazo, empleado como fuente de energía renovable en los ingenios, contribuyendo a la matriz energética nacional. “La ceniza resultante de la cogeneración se esparce en los campos como fertilizante natural, contribuyendo a prácticas agrícolas más sostenibles”. (Asociación Azucarera de El Salvador, 2009, p. 203)

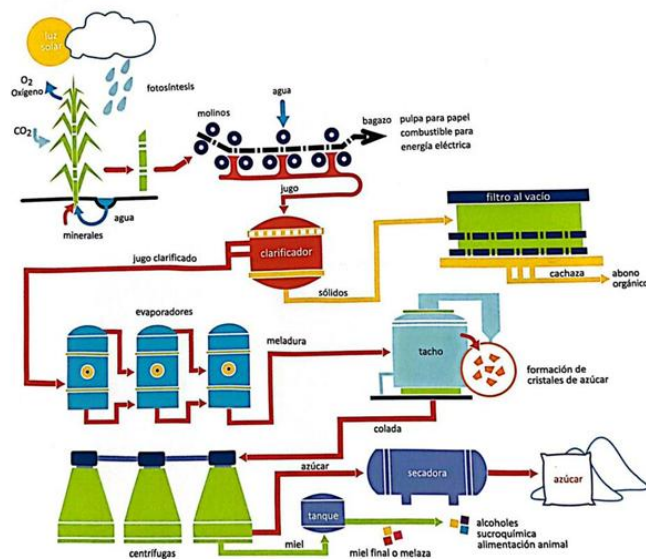


Fig. 1. Proceso de fabricación de azúcar con sus subproductos (Asociación Azucarera de El Salvador, 2009)

La innovación en la industria azucarera ha impulsado la adopción de tecnologías avanzadas y prácticas sostenibles, mejorando la eficiencia productiva y minimizando el impacto ambiental. Los ingenios azucareros han implementado programas de responsabilidad social corporativa y prácticas agrícolas ecológicas para reducir su huella ambiental y fomentar la sostenibilidad.

Paralelamente, el sector muestra un creciente interés por la sostenibilidad medioambiental y la responsabilidad social. Esta tendencia subraya la necesidad de considerar el impacto ambiental y social de la industria en el país. En este contexto, el compromiso con prácticas sostenibles y socialmente responsables se ha convertido en una prioridad, fortaleciendo la percepción positiva y la contribución de la industria azucarera salvadoreña en el ámbito global.

La diversificación de productos, como la producción de etanol y energía a partir de biomasa, ha agregado valor al sector y reforzado su sostenibilidad. La innovación y la implementación de prácticas sustentables serán fundamentales para mantener la competitividad y garantizar el crecimiento a largo plazo de la industria azucarera en El Salvador.

El Ingenio, es una entidad clave en el sector azucarero del país, dedicada a la producción y procesamiento de caña de azúcar. Su papel es fundamental en la economía local y nacional, generando empleo y promoviendo el desarrollo económico del país.

Fundado en la década de 1980, el Ingenio mantuvo sus instalaciones sin modificaciones significativas hasta el año 2004, cuando un cambio de administración introdujo una visión innovadora. La nueva dirección realizó importantes inversiones en maquinaria, capacitación de personal, tecnología y optimización de procesos. Estas mejoras hicieron que la producción fuera más eficiente y rentable, alcanzando un rendimiento físico de 256.15 libras de azúcar por tonelada de caña “rompiendo los históricos a nivel nacional”.(Asociación Azucarera de El Salvador, 2009, p. 170)

Además de la producción de azúcar, el Ingenio genera diversos subproductos de alto valor agregado. Entre ellos se encuentran la melaza, utilizada en la fabricación de etanol y como suplemento alimenticio para el ganado; el bagazo, empleado como fuente de energía; y la ceniza, utilizada como fertilizante natural, promoviendo una agricultura más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

El Ingenio exporta azúcar a varios continentes, incluyendo América del Norte, Europa y Asia. La creciente demanda en países asiáticos ha abierto nuevas oportunidades de expansión, reflejando la capacidad del Ingenio para competir en el mercado global y su impacto en la economía nacional.

En la Figura 2 se presenta el organigrama de la Dirección Industrial, en el que se puede identificar la rama de Mantenimiento y el personal operativo.

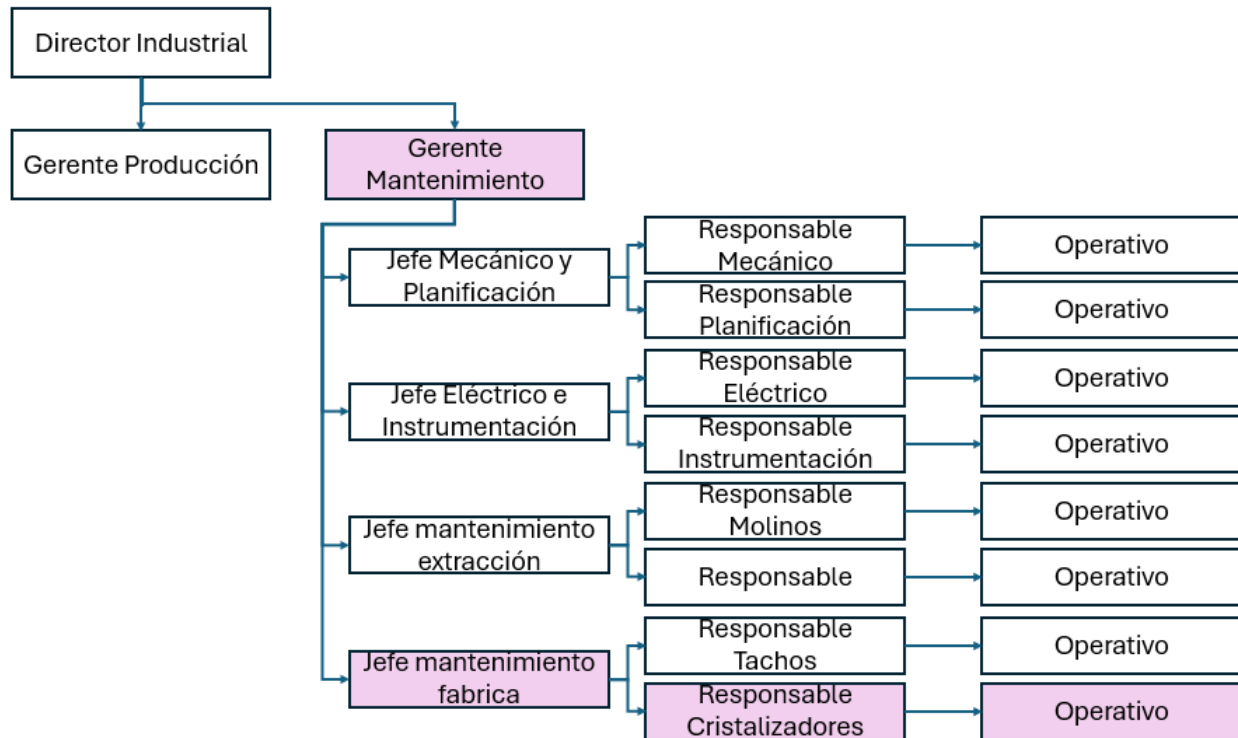


Fig. 2. Organigrama del departamento de Mantenimiento del Ingenio (Elaboración Propia).

El Ingenio cuenta con cristalizadores diseñados para generar las condiciones óptimas para el crecimiento de cristales de azúcar a partir de un cristal madre insertado en la miel. Con el tiempo, estas mieles se vuelven más espesas y presentan granos de azúcar visibles. Es importante destacar que los tiempos de crecimiento están calculados para garantizar una alimentación continua en la siguiente etapa del proceso.

Una vez transcurrido el tiempo establecido, las mieles pasan por tres procesos de centrifugado, conocidos como primera, segunda y tercera centrifuga. En cada una de estas etapas, se separa la miel líquida del grano de azúcar. Durante la época de zafra, este proceso se lleva a cabo de manera ininterrumpida, operando 24/7. La salida de operación de cualquiera de estos equipos podría generar pérdidas significativas, ya que el grano de azúcar continuaría creciendo, afectando la calidad del producto y generando incumplimientos en los estándares establecidos.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El ingenio cuenta con cristalizadores encargados de generar las condiciones ideales para la proliferación del cristal a partir de un cristal madre insertado en la miel. Luego de un tiempo estas mieles se vuelven más espesas y con granos de azúcar visibles. Es importante mencionar que los tiempos de crecimiento están calculados de tal forma de mantener una alimentación constante al siguiente paso. Luego de transcurrido el

tiempo las mieles pasan por 3 procesos de centrifugado, que son conocidos como centrifuga de primera, segunda y tercera, cada uno de ellos separa la miel líquida del grano. Este proceso en época de zafra se realiza 24/7 y al tener uno de estos equipos fuera podría significar pérdidas ya que el grano podría seguir creciendo, teniendo incumplimiento de calidad del producto y acumulación que representaría un paro mayor

1.3 PROBLEMA CIENTIFICO

¿De qué manera puede la aplicación de la metodología RCM contribuir a identificar y priorizar modos de falla, mejorar la gestión del mantenimiento y reducir los costos operativos?

1.4 JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION

La elección de este tema de investigación surge a partir de la identificación de un número significativo de fallas en el área de centrifugado del ingenio. El departamento encargado del mantenimiento de estos equipos cuenta con una estructura robusta y realiza sustituciones de piezas bajo condición, basándose en el monitoreo de los componentes. Sin embargo, durante la época de zafra las labores se limitan principalmente a rutinas de inspección y limpieza, establecidas en función de la experiencia práctica de los operadores, lo que podría dejar al equipo en una situación vulnerable frente a fallas inesperadas.

En este contexto, resulta prioritario realizar un estudio exhaustivo de las centrifugas discontinuas, ya que, según los reportes generados por la aplicación interna del ingenio (véase anexo A), son los equipos que registran la mayor incidencia de fallas dentro de la fábrica en las últimas dos zafras. Dicho análisis busca disminuir la frecuencia de fallas y reducir los tiempos de inactividad, garantizando al mismo tiempo la confiabilidad y eficiencia operativa. Para ello, se plantea la aplicación de la metodología de RCM, como una estrategia orientada a optimizar los recursos destinados al área de mantenimiento.

Al estar en periodo no productivo los equipos están desarmados y se realizan cambios de piezas con daños aparentes o anomalías identificadas al final de la temporada productiva.

La metodología RCM exige que la seguridad sea prioridad, por lo que estos planes de mantenimiento permitirán que los trabajadores desarrollen sus actividades en ambientes más seguros. Así también implica que el personal que desarrolla las actividades de mantenimiento se encuentre debidamente capacitados y sus tareas las realicen con todas las medidas de seguridad debidas.

Internacionalmente se conoce y se aplica RCM pero en base a una exhaustiva investigación realizada no se encuentran casos de estudio enfocados en máquinas de centrifugado en ingenios azucareros. El desarrollo de esta tesis ayudará mucho a quien necesite desarrollar planes de mantenimiento con mejores resultados y que permitan prolongar la vida de sus equipos.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un plan de mantenimiento para centrífugas discontinuas, utilizando la metodología RCM en un ingenio azucarero de El Salvador, orientado a optimizar la disponibilidad operativa, incrementar la confiabilidad y reducir los costos asociados a fallas inesperadas, para mejorar la eficiencia del proceso productivo

1.5.2 OBJETIVO ESPECIFICOS

- Identificar los modelos de mantenimiento aplicables a centrífugas en la industria azucarera.
- Formular la estrategia metodológica para la aplicación de RCM en centrífugas discontinuas en un ingenio azucarero de El Salvador.
- Evaluar el impacto económico potencial del plan de mantenimiento propuesto para centrífugas discontinuas en un ingenio azucarero de El Salvador.

1.6 ALCANCE

El presente estudio propone diseñar un plan de mantenimiento completo en máquinas de centrifugado discontinuas en un ingenio azucarero de El Salvador. Se aplicará la metodología de RCM para desarrollar este plan.

Como parte del estudio, se realizará un análisis de modos de falla que tienen el impacto más significativo en el desempeño de las máquinas de centrifugado. Se desarrollarán estrategias de mantenimiento proactivo para anticipar, minimizar o eliminar fallas, para aumentar la confiabilidad de estos activos en un ingenio azucarero de El Salvador.

El estudio culminará con el diseño del plan de mantenimiento basado en RCM, pero no incluirá su implementación. Es importante señalar que este estudio no abarcará el entrenamiento del personal en la implementación del plan diseñado. Además, aunque se estimará el impacto económico potencial del plan propuesto, no se realizará un seguimiento a largo plazo de los resultados de su implementación. El alcance de esta investigación se limitará a las máquinas de centrifugado discontinuas en un ingenio azucarero de El Salvador. Si bien los resultados podrían ser útiles para otras industrias similares, no se realizarán adaptaciones para otros tipos de maquinaria o sectores industriales como parte de este estudio.

1.7 LIMITACIONES

La propuesta de un plan de RCM para equipos de centrifugado discontinuo en un ingenio azucarero de El Salvador enfrenta diversas limitaciones que podrían influir en el desarrollo de la investigación y en la interpretación de los resultados finales.

Una limitación significativa es el tiempo disponible para realizar el estudio. El proceso de recopilación de datos, análisis y redacción de una propuesta detallada y bien fundamentada requiere un periodo extenso.

Además, se enfrenta a la limitación relacionada con la calidad y cantidad de datos disponibles. Los datos sobre fallos, tiempos de inactividad y costos de mantenimiento pueden ser incompletos o no estar disponibles en la medida necesaria. Esta escasez de datos completos y precisos puede comprometer la precisión de los análisis y, en consecuencia, afectar la solidez de la propuesta del plan de mantenimiento.

Los ingenios azucareros operan bajo dos periodos definidos: el productivo, denominado zafra, y el de no zafra, durante el cual la planta entra en paro total a la espera de la siguiente cosecha y se aprovecha para ejecutar los mantenimientos necesarios. En este contexto, el periodo de zafra correspondiente al presente ciclo iniciará en noviembre de 2025 y finalizará en abril de 2026, dando paso al periodo de no zafra, que se extenderá hasta octubre de 2026. Dicho ciclo operativo se identifica como Z2526, cuya planificación y presupuesto fueron establecidos a finales de agosto de 2025.

Considerando lo anterior, el plan de mantenimiento propuesto en esta investigación será presentado a la gerencia del ingenio azucarero para su evaluación. La implementación del mismo durante el periodo de no zafra en Z2526, o en un ciclo posterior, quedará sujeta a la decisión gerencial, con el propósito de valorar sus resultados en el periodo productivo inmediato.

1.8 ESTADO DEL ARTE

El mantenimiento siempre ha tenido una importancia crucial en la industria global, ya que su correcta ejecución puede posicionar estratégicamente a una organización de manera positiva. Para que las empresas se mantengan competitivas, la optimización de los procesos de mantenimiento es uno de los pilares fundamentales en la búsqueda de la reducción de costos de productividad. Según la (BSI, 2017) , el mantenimiento es la combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión realizadas durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o a devolverlo a un estado en el que pueda desempeñar la función requerida. Decidir cómo, cuándo, cuánto costará y hasta qué punto valdrá la pena realizar actividades de mantenimiento en un activo debe ser siempre objeto de evaluación por parte de los gestores de mantenimiento. Esta toma de decisiones debe estar respaldada por indicadores como el índice de productividad, el tiempo de disponibilidad del activo, el tiempo de retorno de la inversión en la actividad de reparación y el tipo de mantenimiento más adecuado para cada activo.

El mantenimiento ha evolucionado y se ha intensificado en los últimos años por el aumento de la mecanización, la creciente complejidad de equipos, activos e infraestructuras, la adopción de nuevas técnicas de mantenimiento y un enfoque renovado por las organizaciones y sus responsabilidades, tal como se resume a continuación:

Primera generación: Hasta la Segunda Guerra Mundial, el mantenimiento se enfocaba únicamente en la corrección de fallos después de su ocurrencia, sin estrategias preventivas. Las industrias dependían de reparaciones reactivas debido a la simplicidad de los equipos y la mecanización total de los procesos industriales.

Segunda generación: Con el aumento de la mecanización se hizo más complejo la reparación de las máquinas. Era muy importante que fallaran poco o que se pudieran reparar rápidamente. Esto llevó a la implementación de programas de mantenimiento preventivo para asegurar la operatividad continua y eficiente de las máquinas.

Tercera generación: Desde los sesenta se empezó un enfoque de confiabilidad y disponibilidad. Entre las técnicas y conceptos se incluye el RCM que busca optimizar las estrategias de mantenimiento basadas en el análisis de fallos y sus consecuencias.

Cuarta generación: En la era de la Industria 4.0, la digitalización de todos los activos físicos es la clave para poder monitorear y predecir las fallas de los equipos y esto permite menos tiempos fuera de servicio y un mejor mantenimiento.

La Industria 4.0 utiliza tecnologías como el manejo de datos en servidores virtuales, monitoreo y tránsito de información de variables con internet de las cosas para la mejora del rendimiento y eficiencia de los procesos de fabricación. Hoy se está volviendo una necesidad que las empresas deben incorporar y desarrollar paulatinamente.

Se conoce que en mantenimiento existen los siguientes tipos: preventivo, condicional y correctivo. El mantenimiento preventivo se emplea con el fin de evaluar o disminuir la degradación de los equipos y así reducir la probabilidad de fallas.

El mantenimiento condicional se basa en evaluar, observar y monitorear condiciones para tomar acciones de mantenimiento posteriormente. En cambio, el mantenimiento correctivo es el que se realiza después de ocurrida las fallas con el fin de restaurar los elementos o componentes dañados.

Ante la rápida evolución tecnológica y organizacional, los encargados de la gestión del mantenimiento buscan un enfoque estratégico que integre estos avances en un modelo coherente. Este enfoque permite evaluar y aplicar de manera racional las técnicas que aporten mayor valor tanto a los gestores como a las empresas. Una metodología que proporciona esta estructura de trabajo es el RCM (Moubray, 2001).

Desde la década de 1970, el concepto de tiempo fuera de servicio (Downtime) se volvió crucial en la filosofía de gestión de inventarios y producción (Just in Time), donde la reducción de inventarios significaba que pequeñas interrupciones en la producción podían paralizar toda la instalación. El crecimiento de la mecanización y la automatización hizo que la fiabilidad y la disponibilidad fueran esenciales en sectores como la salud, telecomunicaciones y procesamiento de datos. Este cambio de enfoque evidenció la relación entre la edad operativa de los activos y su probabilidad de fallar.

El RCM es una metodología lógica que utiliza el análisis de criticidad, efecto y modo de falla para identificar los requisitos de mantenimiento en función de las consecuencias operativas y de seguridad de cada falla (Faragalla et al., 2016). Este enfoque optimiza la combinación de tareas de mantenimiento reactivas, basadas en tiempo, en condiciones y proactivas. Ha sido ampliamente adoptado tanto en el ámbito académico como profesional para desarrollar planes de mantenimiento que integren estrategias como el mantenimiento CM, PM y PdM.

Todos los esfuerzos que se hacen en mantenimiento tienen un objetivo claro y preciso de tener los equipos disponibles y confiables, que realicen la función destinada de manera eficaz y con calidad. El mantenimiento debe ser rentable económicamente por ello no se debe exceder el ciclo de vida de los activos.

La gestión de activos es un proceso que integra personas, tecnología y datos para conectar activos físicos e instalaciones a un sistema central para el desarrollo, implementación, mantenimiento y optimización efectivos de estrategias de activos.

En la industria alimentaria, las líneas de producción están compuestas por máquinas interconectadas mediante mecanismos de transferencia comunes, que presentan diferentes modos de falla. Cuando ocurre una falla en algún equipo, gran parte de la línea detiene su proceso, y el producto no terminado puede ser descartado debido a su deterioro o problemas de calidad. Este tipo de fallas tiene un impacto negativo, disminuyendo la confiabilidad y la producción (Tsarouhas, 2012).

De manera similar, en una planta de producción de azúcar, los gestores deben ver la gestión del mantenimiento como una parte estratégica de la organización. Un mantenimiento inadecuado puede resultar en frecuentes paradas no programadas para reparaciones correctivas, lo cual reduce la productividad y aumenta los costos asociados con mantenimientos constantes (Fernandes, 2019). Implementar un plan de mantenimiento preventivo y eficiente es esencial para evitar interrupciones costosas y asegurar un funcionamiento continuo y efectivo de las instalaciones.

En los ingenios es una de las industrias que más recursos tecnológicos requiere para que los procesos sean mejor controlados.

En los ingenios azucareros se están empleando cantidad de tecnologías que permiten un mejor desempeño y control del mantenimiento de los equipos. Un ejemplo de ello es la instrumentación instalada en el proceso de centrifugado de azúcar, como sensores de flujo que monitorean la alimentación a los equipos, monitoreo de corriente para proteger a los motores de un sobre esfuerzo, entre otros.

En relación con las técnicas de mantenimiento predictivo que se están utilizando en máquinas centrifugas se pueden señalar termografía, análisis de vibraciones y monitoreo de variables eléctricas. Esta información se puede llevar en línea para tener un monitoreo en tiempo real y detecten operaciones anormales de los componentes y se tomen decisiones. Hoy en día estas decisiones pueden ser tomadas con algoritmos de IA o aprendizaje automático (machine learning).

CAPITULO 2 MARCO TEORICO

2.1 TIPOS DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento industrial ha transitado por distintas etapas históricas, cada una asociada a los retos y avances tecnológicos de su tiempo. La fase más básica corresponde al mantenimiento correctivo, donde los equipos solo se reparaban después de la avería. En esta modalidad no existía previsión alguna, lo que ocasionaba paradas prolongadas de producción, elevados costos imprevistos y pérdidas de confiabilidad en los procesos (Moubray, 1997). Si bien era un enfoque sencillo, pronto se identificó que su dependencia exclusiva de la reacción ante fallas limitaba la competitividad industrial.

En un segundo momento apareció el mantenimiento reactivo, el cual incorporó la preparación de recursos y repuestos para intervenir tan pronto surgiera una falla. Aunque significó un avance respecto al correctivo, este modelo seguía sin prever las averías y, por tanto, no lograba reducir los riesgos de interrupciones prolongadas en la operación (Kelly, 2006). Su aporte principal radicó en la organización de los medios de respuesta, pero mantuvo las limitaciones en cuanto a la confiabilidad de los equipos.

El siguiente paso lo constituyó el mantenimiento preventivo, ampliamente difundido en la industria durante la segunda mitad del siglo XX. Este enfoque se fundamenta en ejecutar intervenciones planificadas de forma periódica, independientemente de que los equipos presenten fallas o no (Smith, 2003). Su objetivo es disminuir la probabilidad de averías mediante inspecciones, lubricaciones, ajustes o reemplazo de componentes antes de que fallen. Sin embargo, una de sus debilidades radica en que, al basarse en intervalos fijos, puede generar intervenciones innecesarias y costos adicionales.

Con los avances tecnológicos y la implementación de sistemas de monitoreo de condición, se desarrolló el mantenimiento predictivo. Este tipo se centra en evaluar continuamente el estado de los equipos a través de técnicas como análisis de vibraciones, termografía, ultrasonido y análisis de aceites, lo que permite detectar signos tempranos de falla (Moubray, 1997). De esta manera, las reparaciones se ejecutan únicamente cuando se identifican indicios de deterioro, reduciendo costos y evitando mantenimientos innecesarios. Este enfoque, por lo tanto, representa un cambio significativo hacia una gestión basada en datos.

El mantenimiento proactivo surge como un complemento del predictivo, orientado no solo a detectar fallas, sino a eliminar sus causas raíz. Mediante esta filosofía, se buscan soluciones permanentes que eviten la recurrencia de averías, como mejoras en diseño, condiciones de operación o prácticas de montaje. Según Kelly (Kelly, 2006), el carácter proactivo impulsa la confiabilidad de los activos industriales, ya que promueve la corrección de deficiencias desde la fuente del problema.

Finalmente, en la cúspide de la evolución, se encuentra el mantenimiento de clase mundial, caracterizado por integrar metodologías avanzadas como el RCM, el Análisis de Causa Raíz y TPM. Este enfoque busca no solo garantizar la confiabilidad de los equipos, sino también alinear la gestión del mantenimiento con los

objetivos estratégicos de la empresa, optimizando recursos, reduciendo costos y generando ventajas competitivas sostenibles (Nakajima, 1989). En este nivel, el mantenimiento deja de ser únicamente un soporte técnico y se convierte en un factor estratégico de productividad y competitividad global.

2.2 PROCESO DE PRODUCCION DE AZUCAR

El proceso de producción de azúcar a partir de la caña es un proceso industrial complejo que involucra varias etapas, desde la cosecha de la caña hasta la obtención del azúcar en sus diferentes variables. Cada una de estas etapas debe ser cuidadosamente gestionada para maximizar la eficiencia, reducir pérdidas y garantizar la calidad del producto final. A continuación, se describen detalladamente las principales etapas involucradas en este proceso.

2.2.1 COSECHA DE LA CAÑA

La primera etapa en la producción de azúcar es la cosecha de la caña, que puede realizarse de manera manual o mecanizada. La cosecha manual, utilizada principalmente en terrenos accidentados o donde los costos laborales son relativamente bajos, consiste en cortar los tallos de caña con machetes. Este método, aunque más lento, permite una recolección más cuidadosa y reduce la inclusión de impurezas como hojas o tierra en el proceso (Bakker, 1999). La cosecha mecanizada, más común en terrenos planos y grandes plantaciones, utiliza cosechadoras que cortan, trocean y cargan la caña en camiones o trenes para su transporte al ingenio. Este método es más rápido y eficiente, aunque puede aumentar el contenido de impurezas debido a la manipulación mecánica (Meade & Chen, 1977)

2.2.2 TRANSPORTE DE LA CAÑA

Una vez cosechada, la caña debe transportarse rápidamente al ingenio azucarero para evitar la pérdida de sacarosa. Según Rein, P. W. (2012, p. 123), "el transporte rápido y eficiente es crucial para reducir la pérdida de azúcar debido a la fermentación y la respiración de la caña una vez cortada". El transporte puede realizarse mediante camiones, trenes o sistemas más avanzados, como cintas transportadoras en instalaciones muy grandes. En este punto, la logística es clave, ya que retrasos o fallas en el transporte pueden reducir significativamente el rendimiento de sacarosa en la molienda.

2.2.3 MOLIENDA DE LA CAÑA

El proceso de molienda es el primer paso para extraer el jugo de la caña de azúcar. Durante la molienda, la caña es primero preparada al pasar por desfibradoras que la cortan en trozos pequeños, lo que facilita la extracción del jugo. Luego, los tallos pasan por una serie de molinos que aplican presión para exprimir el jugo. Estos molinos son grandes rodillos que giran en direcciones opuestas y que extraen el jugo mientras

separan el bagazo, el material fibroso sobrante en la molienda (Meade & Chen, 1977) La eficiencia de la molienda es crucial, ya que cualquier pérdida de jugo en esta etapa representa una pérdida directa de sacarosa. El bagazo sobrante se utiliza a menudo como combustible para generar vapor en las calderas del ingenio, lo que hace que este subproducto sea útil para la autosuficiencia energética de la planta. (Bakker, 1999)

2.2.4 GENERACIÓN DE VAPOR Y CALENTAMIENTO

Uno de los aspectos únicos de la industria azucarera es su capacidad para generar gran parte de la energía que necesita a partir de los subproductos del proceso. El bagazo, que es el material fibroso restante después de la extracción del jugo, se utiliza como combustible en las calderas para generar vapor. Este vapor es utilizado tanto para generar electricidad como para calentar el jugo durante varias etapas del proceso (Meade & Chen, 1977; P. Rein, 2017)

El uso del vapor es crítico, ya que el jugo de caña debe calentarse para eliminar bacterias y otros microorganismos que puedan interferir con la posterior cristalización de la sacarosa. Además, el calentamiento facilita la clarificación, que es el siguiente paso en el proceso.

2.2.5 CLARIFICACIÓN DEL JUGO

El jugo de caña recién extraído contiene una serie de impurezas, como partículas de tierra, fibra, compuestos orgánicos y minerales, que deben ser eliminadas para garantizar un producto final de calidad. El proceso de clarificación tiene como objetivo eliminar la mayor cantidad de impurezas posible mediante la adición de cal y otros productos químicos que precipitan las partículas sólidas. Durante este proceso, el jugo se calienta y se añaden agentes coagulantes para formar flóculos que luego son eliminados por sedimentación o filtración (Meade & Chen, 1977)

2.2.6 FILTRACIÓN

Una vez que las impurezas se han precipitado, el jugo pasa por un proceso de filtración para eliminar las partículas restantes. Existen varios tipos de filtros utilizados en la industria azucarera, incluyendo filtros de presión y filtros de vacío. Este proceso garantiza que el jugo clarificado esté listo para la siguiente etapa, la evaporación (Bakker, 1999).

2.2.7 EVAPORACIÓN

El jugo clarificado contiene una alta proporción de agua, por lo que debe concentrarse antes de que pueda cristalizarse. La evaporación es el proceso mediante el cual se reduce el contenido de agua del jugo, aumentando la concentración de azúcar. El jugo pasa por una serie de evaporadores al vacío, donde se elimina el agua sin aumentar demasiado la temperatura, lo que podría caramelizar el azúcar y afectar su

calidad. Al final de este proceso, el jugo concentrado se convierte en una meladura, que es una solución mucho más densa y rica en sacarosa (P. W. Rein, 2012; Bakker, 1999)

2.2.8 CRISTALIZACIÓN

Una vez que el jugo ha sido concentrado a través de la evaporación, está listo para ser cristalizado. La cristalización es el proceso mediante el cual la sacarosa se convierte en cristales sólidos. Esto se logra mediante un enfriamiento controlado y la adición de pequeñas partículas de azúcar que actúan como núcleos para la formación de cristales más grandes. Este proceso se lleva a cabo en recipientes de cristalización o tachos, donde se controla cuidadosamente la temperatura y la sobresaturación del jugo para maximizar la formación de cristales (Meade & Chen, 1977)

2.2.9 CENTRIFUGADO Y SEPARACIÓN DE CRISTALES

Después de la cristalización, los cristales de azúcar se separan del líquido restante, conocido como miel o jarabe, mediante el uso de centrifugas. Estas máquinas giran a alta velocidad, utilizando la fuerza centrífuga para separar los cristales sólidos del jarabe líquido. El jarabe restante se puede reutilizar en el proceso para extraer más azúcar, mientras que los cristales se lavan y se secan para obtener el producto final (Bakker, 1999)

2.2.10 SECADO Y ALMACENAMIENTO

Los cristales de azúcar obtenidos tras el centrifugado contienen aún algo de humedad, por lo que deben ser secados antes de su almacenamiento. Este secado se realiza en secadores rotativos, donde se utiliza aire caliente para eliminar la humedad residual. Una vez secos, los cristales de azúcar están listos para ser envasados y comercializados o para ser refinados en azúcar blanco (P. W. Rein, 2012) (Bakker, 1999)

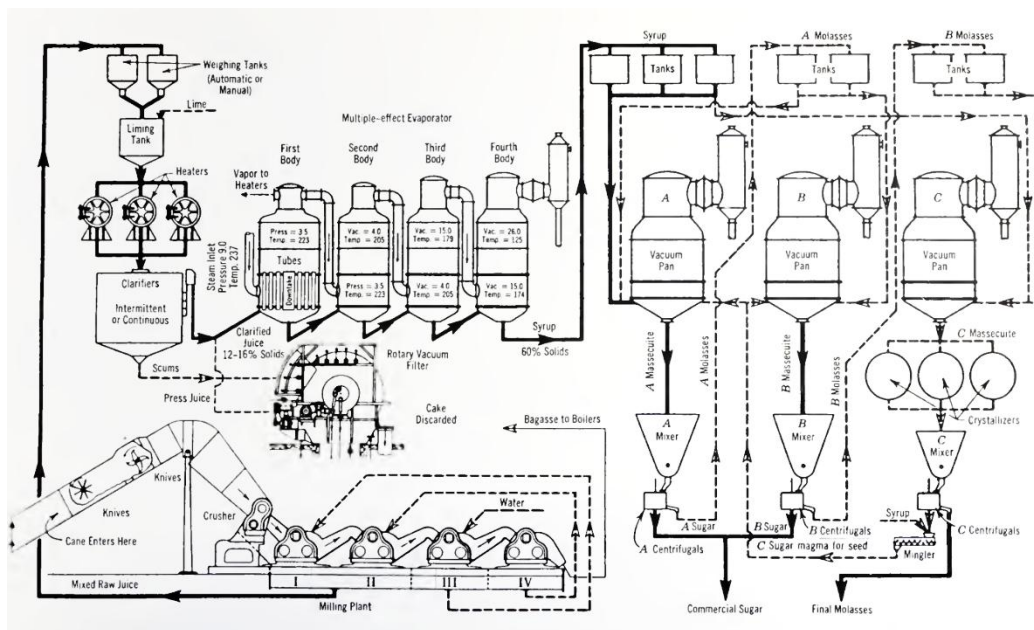


Fig. 3. Diagrama de flujo de una fábrica de azúcar crudo (Chen, 1985)

La producción de azúcar es un proceso complejo y tecnológicamente avanzado que requiere un manejo preciso de cada etapa, desde la cosecha de la caña hasta la obtención del producto final en Figura 3 se muestra un esquema visual de los procesos. Los avances tecnológicos en equipos y técnicas de control han permitido mejorar la eficiencia y la calidad del azúcar producido, haciendo que la industria sea más competitiva y sostenible.

2.3 PROCESO DE CENTRIFUGADO

El centrifugado es una de las etapas más críticas en el proceso de producción de azúcar, ya que permite la separación del grano de azúcar cristalizado del jarabe o miel residual. Este proceso es clave para obtener cristales de alta pureza, tamaño y maximizar la eficiencia del uso de la materia prima. En esta sección, se describirán en detalle los principios físicos y operacionales que intervienen en el centrifugado, así como las diferencias entre las extracciones de primera, segunda y tercera

2.3.1 SEPARACIÓN DEL AZÚCAR CRISTALIZADO DEL JARABE (MIEL)

El proceso de centrifugado se lleva a cabo después de la cristalización del jugo de caña concentrado. En esta etapa, el material que se centrifuga es conocido como masa cocida, que es una mezcla densa de cristales de sacarosa y miel (jarabe residual). Las centrífugas industriales en ingenios azucareros, son dispositivos que operan a altas velocidades para separar los cristales de azúcar del jarabe mediante la fuerza centrífuga. A medida que la masa cocida ingresa a la centrífuga, esta gira a velocidades que varían entre 1,000 y 1,800 RPM, dependiendo del tipo de centrífuga y el volumen de producción (Meade & Chen, 1977).

Durante la operación, los cristales de azúcar se adhieren a las paredes perforadas del tambor de la centrífuga, mientras que la miel es expulsada a través de las perforaciones, separándose del azúcar. Esta separación se produce debido a las diferencias de densidad entre los cristales sólidos y el jarabe líquido. Para asegurar la máxima pureza del azúcar, se realiza un lavado de los cristales con agua a altas temperaturas, lo que elimina cualquier residuo de miel que pueda quedar adherido a los cristales. El uso de agua caliente o vapor húmedo en el proceso de lavado es fundamental, ya que facilita la eliminación de impurezas sin afectar la estructura de los cristales.(Meade & Chen, 1977)

2.3.2 DIFERENCIAS ENTRE CENTRIFUGAS DE PRIMERA, SEGUNDA Y TERCERA EXTRACCIÓN

Existen tres etapas de extracción de azúcar a través del centrifugado, cada una con diferentes niveles de pureza y calidad del azúcar. En la primera extracción, la masa cocida proviene de la primera cristalización del jugo de caña. Esta es la fase más eficiente en términos de recuperación de sacarosa, ya que el azúcar obtenido en esta etapa es de alta pureza. El jarabe que queda tras esta primera centrifugación, conocido como miel A, se envía a un nuevo proceso de cristalización para extraer más azúcar (Meade & Chen, 1977).

La segunda extracción se lleva a cabo sobre masa cocida B, formado a partir de la cristalización del jarabe residual de la primera extracción. El azúcar obtenido en esta etapa tiene una calidad y pureza ligeramente inferior, ya que el jarabe contiene más impurezas y una menor concentración de sacarosa. El jarabe restante después de la segunda extracción, miel B, se somete a una tercera cristalización.

Finalmente, la tercera extracción utiliza la masa cocida C, que es el producto de la cristalización de la miel B. El azúcar obtenido en esta fase es de calidad inferior y puede contener más impurezas, por lo que generalmente se utiliza para productos secundarios o se refina posteriormente. El jarabe que queda después de esta última centrifugado se conoce como melaza, y su contenido de azúcar es tan bajo que no es económicamente viable continuar extrayendo más sacarosa (Meade & Chen, 1977).

2.3.3 IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA EN ESTA ETAPA

La eficiencia del proceso de centrifugado tiene un impacto directo en la rentabilidad y calidad del azúcar producido. Una centrífuga bien calibrada puede maximizar la recuperación de sacarosa, minimizando la cantidad de azúcar que se pierde en la miel residual. La pureza del azúcar cristalizado depende de varios factores, incluyendo la velocidad de rotación, el tiempo de ciclo, y la calidad del lavado de los cristales. Si estos parámetros no están correctamente ajustados, pueden ocurrir problemas como la rotura de cristales, lo que reduce la calidad del azúcar y aumenta la cantidad de impurezas en el producto final (Meade & Chen, 1977).

Además, la eficiencia del proceso afecta la cantidad de energía utilizada, ya que las centrífugas son equipos que requieren un consumo considerable de energía debido a sus altas velocidades de operación. La utilización de centrífugas modernas, que están diseñadas para optimizar el uso de energía y maximizar la eficiencia de separación, es clave para mantener bajos costos operativos y reducir el impacto ambiental del proceso (Meade & Chen, 1977)

2.3.4 PRINCIPIOS FÍSICOS DEL PROCESO DE CENTRIFUGADO

El principio fundamental de la centrifuga es la fuerza centrífuga, que actúa sobre la masa cocida al girar rápidamente dentro de la centrífuga. La fuerza centrífuga genera una aceleración radial que separa las fases sólida y líquida, aprovechando la diferencia de densidad entre los cristales de azúcar y el jarabe residual. Cuanto mayor es la velocidad de rotación, mayor es la fuerza centrífuga, lo que mejora la eficiencia de la separación. Sin embargo, un exceso de velocidad puede dañar los cristales de azúcar, por lo que es crucial encontrar un equilibrio entre la velocidad y la integridad de los cristales (Meade & Chen, 1977).

Además de la fuerza centrífuga, la viscosidad del jarabe y el tamaño de los cristales influyen en la eficiencia del proceso. El jarabe con una alta viscosidad es más difícil de separar de los cristales, lo que puede reducir la eficiencia del centrifugado. Por esta razón, es importante mantener una temperatura adecuada durante el proceso para reducir la viscosidad del jarabe sin dañar los cristales (Meade & Chen, 1977).

2.3.5 PARÁMETROS OPERACIONALES CLAVE

Para que el proceso de centrifugado sea eficiente, es fundamental controlar varios parámetros operacionales. La velocidad de rotación es uno de los factores más importantes. Una velocidad demasiado baja puede resultar en una separación incompleta, mientras que una velocidad demasiado alta puede causar daño a los cristales de azúcar. Las centrífugas modernas permiten ajustar la velocidad de rotación para optimizar el rendimiento en función del tipo de masa cocida procesada.

El tiempo de ciclo es otro parámetro clave que se refiere a la duración total de cada ciclo de centrifugado. Este tiempo incluye la carga de la masa cocida, la separación, el lavado de los cristales y la descarga del azúcar. Ajustar el tiempo de ciclo es crucial para maximizar la producción sin comprometer la calidad del producto. Por último, las temperaturas operativas también juegan un papel importante. El uso de temperaturas elevadas para lavar los cristales de azúcar ayuda a disolver las impurezas, mejorando la pureza del azúcar final sin comprometer su estructura física. (Meade & Chen, 1977)

2.4 EQUIPOS DE CENTRIFUGADO

2.4.1 TIPOS DE EQUIPO

El proceso de centrifugado se lleva a cabo mediante dos tipos de equipos, cada uno con aplicaciones específicas según el tipo de azúcar producido(P. Rein, 2012):

- Centrifugas discontinuas: Estas centrifugas son utilizadas en la producción de azúcares de alta pureza Figura 4, como el azúcar blanco o refinado, donde se requiere un control riguroso sobre el tamaño del grano. Su diseño permite obtener cristales más grandes y uniformes, con un menor riesgo de rompimiento durante el proceso de centrifugado, lo que representa una de sus principales ventajas. Sin embargo, presentan algunas desventajas, entre ellas, el alto costo de mantenimiento y una menor productividad en comparación con las centrifugas continuas, debido a que sus ciclos de operación son más complejos.



Fig. 4. Centrifuga TITAN discontinua.(Western States Machine Company, 2020)

- Centrifugas continuas: Son empleadas principalmente en la producción de azúcares de menor pureza, Figura 5 como el azúcar crudo o productos intermedios que posteriormente serán refinados. Entre sus principales ventajas destacan la capacidad de procesar de forma continua, lo que resulta en una mayor productividad, y los bajos costos de mantenimiento, ya que los elementos no se someten a altos niveles de estrés debido a la simplicidad de su operación. No obstante, un inconveniente significativo es la tendencia a dañar los cristales, lo que las hace menos adecuadas para productos de alta pureza.



Fig. 5. Centrífuga continua Roberts serie I.(Western States Machine Company, 2020)

Se han implementado diversas modificaciones a las centrífugas continuas con el objetivo de superar su principal limitación, que es el rompimiento de cristales, razón por la cual tradicionalmente no se utilizan en la producción de azúcares de alta pureza. Entre los avances más destacados se encuentran, (C. Grimwood et al., 2002).

- Deflectores especiales, diseñados para desviar suavemente los cristales al salir de la canasta, reduciendo así el impacto y el daño a los mismos.
- Reducción del ángulo de la canasta, lo que incrementa el tiempo de residencia de los cristales dentro de la centrífuga y permite un mejor lavado.
- Reducción de la velocidad de rotación, con el fin de minimizar el impacto de los cristales y prevenir su rompimiento.

A pesar de estos avances, las centrífugas continuas para azúcares de alta pureza aún presentan desventajas, como la necesidad de utilizar mayores cantidades de agua de lavado para garantizar la eliminación adecuada de las mieles, lo que puede comprometer la eficiencia del proceso en términos de consumo de agua y energía.

2.4.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

El dimensionamiento adecuado de las centrífugas constituye un factor crítico para la eficiencia operativa de un ingenio azucarero. Una máquina sobredimensionada implica invertir en una capacidad de procesamiento que no será aprovechada, lo que se traduce en mayores costos de adquisición y operación innecesarios. En contraste, una centrífuga subdimensionada genera un cuello de botella en la línea de producción, limitando el rendimiento global de la planta y provocando pérdidas significativas durante la zafra. Por ello, la selección

del equipo debe responder estrictamente a las necesidades de procesamiento en MTPH, garantizando un equilibrio entre capacidad instalada y demanda real.

En este contexto, las centrifugas discontinuas se utilizan preferentemente en las etapas finales del proceso, ya que permiten obtener un producto de mayor calidad y pureza, mientras que las centrifugas continuas desempeñan un papel clave en los pasos intermedios, donde la prioridad es manejar mayores volúmenes con un flujo estable y constante. Cada tipo cumple, por tanto, una función específica dentro de la cadena productiva, y su correcta aplicación asegura la eficiencia tanto en calidad como en capacidad de procesamiento.

Tomando como referencia dos de los fabricantes más reconocidos a nivel mundial, Western States y Broadbent, se identifican diferencias en Tabla 1. (*Centrifuge Applications in Sugar Refining*, 2014) (Sugar Centrifuge Machines, s. f.). Estos parámetros permiten establecer una comparación objetiva sobre el desempeño esperado de cada equipo y constituyen un punto de partida para el análisis de mantenibilidad y confiabilidad que debe acompañar a su operación.

WESTERN STATES	BROADBENT
Centrifugas Discontinuas (Batch) Serie TITAN	Centrifugas Discontinuas (Batch)
Velocidad de rotación ofrece un rango de 1100 a 1140 RPM	Velocidad de rotación ofrece un rango de 1200 a 1500 RPM
Capacidad de volumen dinámico Varía entre 1269 kg a 2442 kg	Capacidad de volumen dinámico Varía entre 710 kg a 1300 kg
Dimensiones de la canasta 1372 a 1829x 1016 a 1143 x 3642 a 4608 mm	Dimensiones de la canasta 1220 a 1300x 765 a 1067mm
Ciclo por hora 26 a 30	Ciclo por hora 25
Producción 42.6 a 63.5 MTPH	Producción 17 a 32 MTPH
Centrifugas Continuas Roberts Serie I	Centrifugas Continuas Serie SPV
Velocidad de rotación ofrece hasta 2000 RPM	Velocidad de rotación ofrece hasta 2000 RPM
Capacidad de volumen dinámico más alto que las discontinuas	Capacidad de volumen dinámico más alto que las discontinuas
Dimensiones de la canasta 1220 a 1575 mm	Dimensiones de la canasta 1220 a 1575 mm
Continua	Continua
Producción 25 a 48 MTPH	Producción 25 a 48 MTPH

Tabla 1. Comparación de centrifugas Western States vs Broadbent. (Elaboración Propia)

La selección de las centrífugas no debe basarse únicamente en las capacidades nominales, sino en el grado de ajuste a las condiciones operativas de cada ingenio. Cumplir con las especificaciones técnicas de diseño y operación es fundamental para garantizar la confiabilidad, evitar fallas prematuras y, en consecuencia, prolongar la vida útil del equipo a través de prácticas de mantenimiento preventivo y predictivo.

2.5 RELEVANCIA EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR

Las centrífugas desempeñan un papel esencial en la producción de azúcar debido a su capacidad para separar los cristales de azúcar, de producto terminado o para reprocesos, del licor madre, este proceso se lleva a cabo luego de la cristalización. La eficiencia de este proceso es clave para lograr la pureza, color y granulometría deseada en el producto final.

- Eficiencia de separación

Las centrífugas tanto discontinuas como continuas utilizan la fuerza centrífuga para separar los cristales de azúcar de la melaza de manera rápida y precisa. Este proceso es fundamental para maximizar la recuperación de azúcar y minimizar las pérdidas, lo que aumenta el rendimiento operativo.

- Mejora de la calidad del producto

Las centrífugas ayudan a mejorar la calidad de los cristales de azúcar producidos, al eliminar las impurezas y producir cristales de mayor pureza y uniformidad. (*Sugar Centrifuge Machines*, s. f.) Las centrífugas son las encargadas de darle el último proceso al grano de azúcar donde define su pureza y tamaño según el requerimiento del cliente.

- Costos de producción y reducción de pérdidas

Las centrífugas no solo mejoran la eficiencia de separación, sino que también contribuyen a la reducción de costos en el proceso de producción. Al reducir las pérdidas de azúcar durante la separación de la melaza, las plantas pueden mejorar su rendimiento económico. Además, las centrífugas modernas permiten recuperar hasta el 90% de la energía utilizada durante el frenado, lo que contribuye a importantes ahorros energéticos (*Sugar Centrifuge Machines*, s. f.)

- Costos de operación

Las centrífugas constituyen la última etapa del proceso de producción de azúcar antes de que el producto sea enviado para su empaque y almacenamiento en las bodegas. Estos equipos suelen contar con sistemas de redundancia, diseñados para evitar interrupciones en caso de fallas. Sin embargo, cuando se presenta un paro en uno o varios equipos, se puede desencadenar una serie de problemas que impactan las fases anteriores del proceso. Uno de los principales desafíos que surge durante un paro prolongado es la saturación de los tanques de almacenamiento de mieles. Estas mieles, que deben ser separadas en las centrífugas, comienzan a acumularse en los tanques, los cuales tienen una capacidad limitada. Si no se centrifugan a tiempo, la saturación de los tanques puede provocar una interrupción en cadena, afectando no solo el área

de centrifugado, sino también procesos clave como la molienda. Cuando un paro prolongado impacta la molienda, el ingenio se ve forzado a detener calderas y otros equipos vitales para la operación. Esto no solo compromete la eficiencia productiva, sino que también genera pérdidas económicas considerables. En algunos casos, los costos asociados al arranque de todos los equipos y la desconexión de la red eléctrica nacional pueden alcanzar hasta 1 millón de dólares (USD). Estas pérdidas incluyen los costos por reactivación de equipos y sistemas, consumo adicional de energía, y el tiempo de inactividad, que afecta directamente los ingresos del ingenio.

2.6 FALLOS COMUNES EN EQUIPOS DE CENTRIFUGADO

Las máquinas centrifugas discontinuas operan en ambientes hostiles y dada a su naturaleza de proceso son equipos susceptibles a muchas fallas que de no monitorearse, controlarse y evitarse pueden ocasionar graves riesgos físicos, económicos y ambientales que repercutan en los intereses de las industrias.

A continuación, se señalan alguna de las fallas que comúnmente suelen presentarse en las máquinas centrifugas discontinuas:

2.6.1 CORROSIÓN

Debido al entorno de trabajo de las centrifugas la corrosión es comúnmente un problema que se presenta en muchas partes que pueden ocasionar serios daños en casos extremos irreversibles.

Las condiciones de humedad y calor son motivos suficientes para que las estructuras de soporte sufran de corrosión. En caso de no aplicar protecciones adecuadas, los problemas se pueden intensificar mucho.

El acero al carbón es el material más usado para las diferentes partes del equipo, es por ello que existe alto riesgo de corrosión. La ventaja es fácilmente detectable mientras tanto el acero inoxidable que también puede presentar corrosión no es tan visible y es por ello que es más susceptible a fallas catastróficas ocasionadas por rupturas repentinas (Broadbent, 1997).

Generalmente las partes que sufren en mayor medida de este problema de corrosión son la canasta y tamiz de la centrifuga, ejes y cojinetes, las boquillas de lavado, las válvulas de descarga y conductos y los soportes estructurales y carcasas.

Es importante destacar que la corrosión no se puede evitar totalmente por tal motivo es importante que se controle y se monitoree constantemente.

2.6.2 DAÑO DE CANASTA ROTATORIA

Las mallas filtrantes pueden presentar problemas de picaduras, grietas y rompimientos por chorro de agua o corrosión. Esto ocasiona un mal filtrado del azúcar.

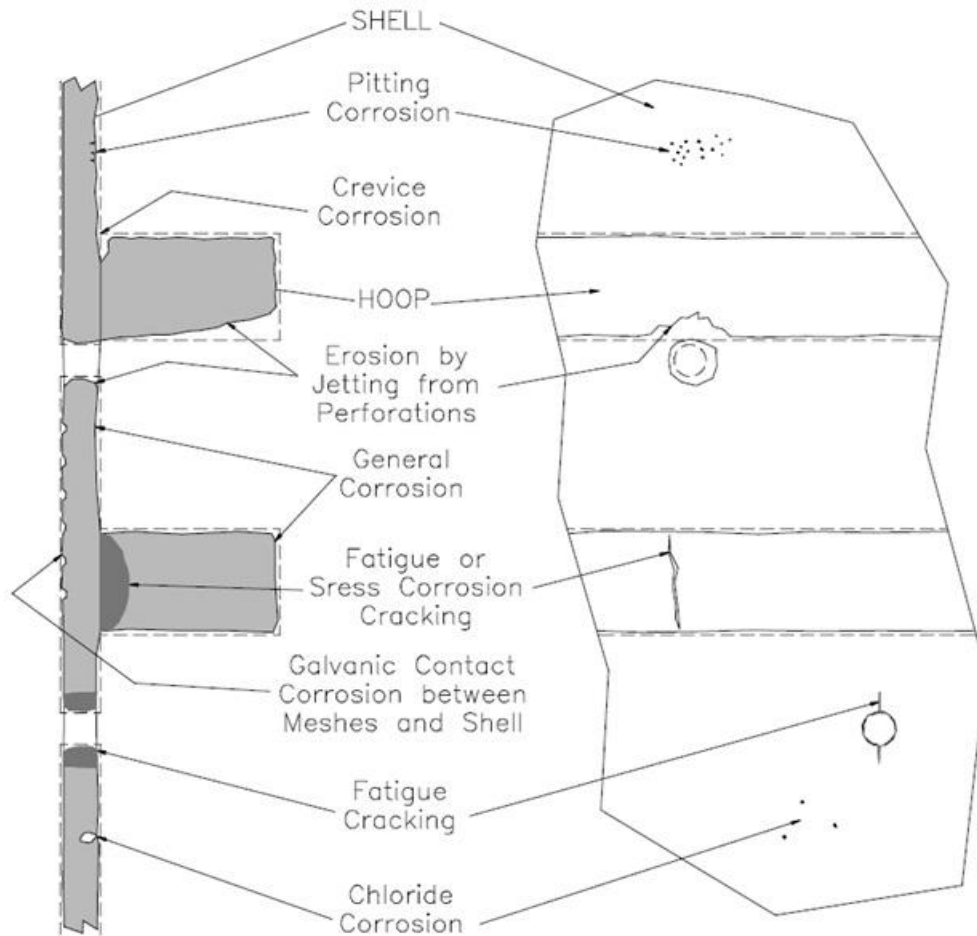


Fig. 6 Típicos defectos de tamiz y aros de canasta (Broadbent, 1997)

La corrosión en las canastas puede ocasionar agrietamientos superficiales y otros más profundos lo que puede producir grietas de fatiga que inicialmente son de pocos milímetros, pero puede convertirse en rupturas más grandes y peligrosas (Broadbent, 1997)

En la Figura 6 se muestran gráficamente algunas de las fallas que se presentan en la canasta. Muy importante hay que señalar que las canastas juegan un papel determinante en la operación de centrifugado. Una canasta dañada es sinónima a pérdidas económicas grandes.

2.6.3 DESBALANCEO Y VIBRACIONES

Debido a las elevadas velocidades de rotación que andan por encima de 1000 RPM cualquier tipo de desbalanceo puede generar graves consecuencias, como podemos ver en la Figura 7 en la estructura, aisladores, rodamientos y mucho de los componentes de las centrifugas (P. Rein, 2012, p. 425)

Fenómenos como la calidad de la masa, sobrecargas, velocidades de operación, mal estado de componentes puede ocasionar desbalanceo y vibraciones que son motivo de fallos en muchos de los componentes de la centrífuga.

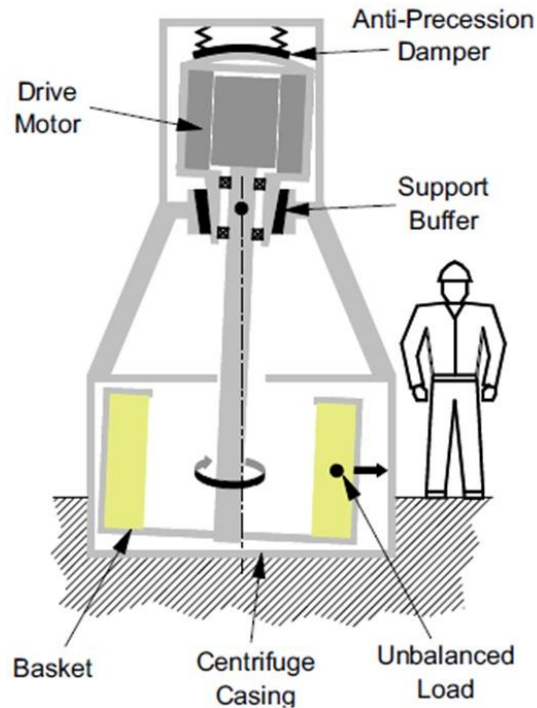


Fig. 7. Canastas desbalanceadas.(Broadbent, 2001)

El desbalance también se puede generar porque la torta se pega al tamiz y no gira conforme se necesita. Las velocidades de giro son muy importantes ya que pueden ocasionar resonancia en el eje y en la misma estructura y facilita la fatiga mecánica de los elementos además de fallos prematuros en rodamientos.

Estructuras muy flexibles pueden ocasionar un ambiente poco confortable para los operadores y si se encuentran más centrífugas en el entorno puede transmitirse a otras aumentando también el ruido. En vibraciones extremas pueden ocasionar fallas mecánicas prematuras por fatiga en estructuras y soportes.(G. C. Grimwood et al., 2003)

2.6.4 PROBLEMAS DE LAVADO

Un lavado deficiente puede generar problemas de disolución excesiva convirtiendo a melaza gran cantidad de la producción la cual tiene un precio de menos de la mitad de la azúcar pura. La melaza reprocesada conlleva mayor consumo de recursos y pérdida económica significativa. (C. Grimwood et al., 2002)

Las variaciones de la presión de agua, diseño deficiente de tuberías y boquilla, cargas de masa cocida no uniformes, sobrecarga de canastas son alguna de las variables que perjudican directamente los problemas de lavado de la masa cocida

2.6.5 FALLAS DE AISLANTE DE MOTOR PRINCIPAL

Intrínsecamente las centrifugas padecen de fallas eléctricas a causa de su operación intermitente de arranques y paros constantes. Son fenómenos comunes las fallas de conductores, protecciones, variadores y toda clase de componentes eléctricos de control y potencia.

Debido a los altos picos de corriente se suelen dar fallas en dispositivos eléctricos y también en el motor mismo. La denominada fatiga del aislador o falla prematura se da más comúnmente en motores sin ningún tipo de protección o mejora de los devanados o motores o variadores sencillos que inyectan muchos armónicos a la red (G. L. Grimwood et al., 1999).

Un fallo de motor ocasiona paro total de los equipos y una reparación de un motor es muy costosa. Es importante trabajar en la prevención de estos fallos.

2.6.6 PROBLEMAS EN EL ARADO

El arado suele tener problemas de encontrarse con obstrucciones que resultan arrastrados contra las telas ocasionando daños en ellas. Sufren de desgaste y si no se controla eso puede ocasionar que la azúcar procesada no se precipite adecuadamente. La falta de remoción del azúcar permite que las centrifugas haga cargas repetidas y recircule azúcar innecesariamente que conlleva a pérdidas económicas (G. C. Grimwood et al., 2003). El arado opera de muchas maneras, comúnmente son guiadas por cilindros neumáticos. Estos problemas ocasionan golpes y rompimientos de las telas y canasta que afectan la operación y calidad de la azúcar tratada.

2.7 CENTRIFUGA DISCONTINUA

Para una mejor comprensión, el fabricante BMA subdividió en 17 subsistema en figura 8 y los describe en la tabla 2, el cual nos servirá para explicar el funcionamiento de cada uno de ellos. Este tipo de equipo tiene elementos adicionales no adquiridos por la empresa. (BMA, 2018)

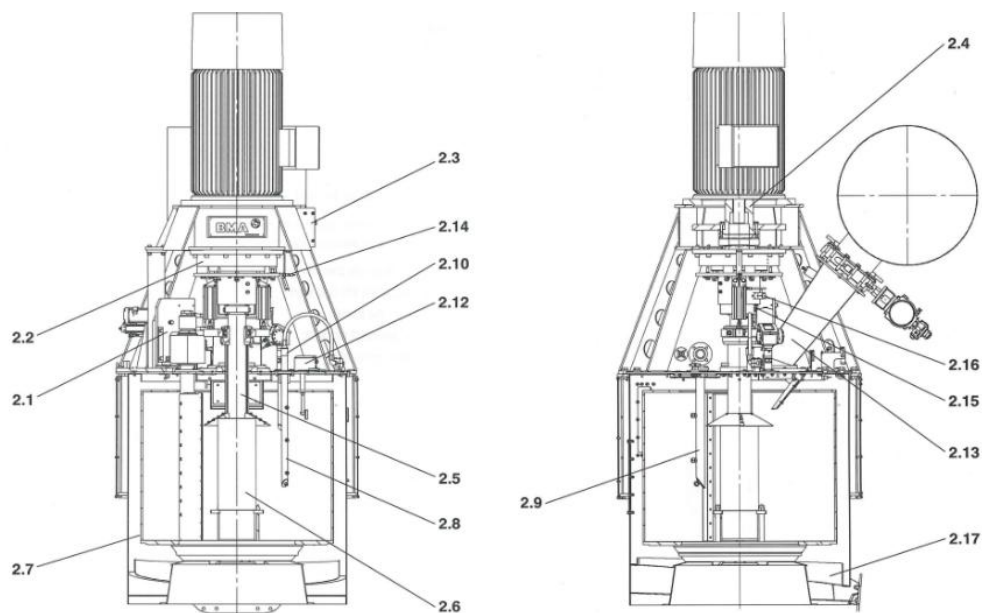


Fig. 8. Grupos constructivos centrifuga discontinua (BMA, 2018)

#	DESCRIPCIÓN
2.1	Descargador con cilindro de giro
2.2	Cabezal de accionamiento
2.3	Freno
2.4	Acoplamiento
2.5	Eje
2.6	Obturador
2.7	Canasta
2.8	Tubo porta tobera de agua
2.9	Tubo porta toberas de jarabe (N/A)
2.10	Valvuleria de agua y jarabe
2.11	Valvuleria de vapor (N/A)
2.12	Palpador de carga mecánico
2.13	Dispositivo de carga
2.14	Control de pendulaciones
2.15	Control de velocidad de giro
2.16	Control de vibración
2.17	Separador de mieles (N/A)

Tabla 2. Grupos constructivos centrifuga discontinua (Elaboración propia)

2.7.1 GRUPO CONSTRUCTIVO

- Descargador con cilindro de giro

Este conjunto de componentes mecánicos y electrónicos tiene la función de desprender la azúcar centrifugada que permanece adherida al tambor después del proceso de separación y lavado de la masa. Para cumplir esa tarea, incorpora dos cilindros: el primero desplaza el mecanismo hacia el tambor, mientras que el segundo acciona el descenso del arado (Fig. 9, elemento 2), asegurando que el azúcar sea completamente descargado hacia la salida ubicada en la parte inferior de la canasta. Su operación es esencial para la reducción de residuos en el tambor y mantener la eficiencia del ciclo productivo.

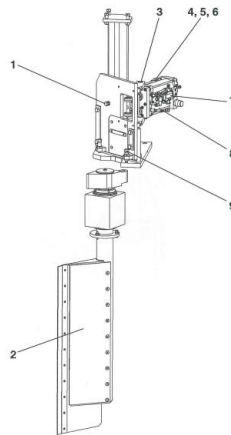


Fig. 9. Descargador con cilindro de giro (BMA, 2018)

- Cabezal de accionamiento

Este conjunto de componentes mecánicos aloja los rodamientos (Fig. 10, elemento 2,8y13), que soportan el eje, canasta, obturador y la masa. Posibilita su movimiento pendular, gracias a la acción combinada de cojinetes articulados y amortiguadores (Fig. 10, elemento 3,16y17), lo que contribuye a absorber vibraciones y a mantener la alineación del conjunto durante el ciclo operativo.

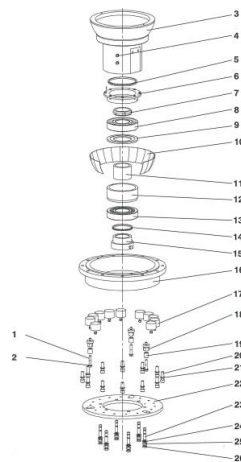


Fig. 10. Cabezal de accionamiento (BMA, 2018)

- Freno

El subsistema de freno tiene la función de detener el giro del tambor en situaciones de emergencia. El disco de freno este fijado al acoplamiento, mientras que las mordazas se encuentran ancladas al cabezal de accionamiento. Aunque la centrifuga cuenta con un motor regenerativo que permite desacelerar y detener el equipo controlando la energía electromagnética generada durante la desaceleración, el freno mecánico constituye un elemento redundante de seguridad. Asegurando la detención inmediata del equipo en caso de fallas em el sistema principal de desaceleración.

- Acoplamiento

Este conjunto de componentes mecánicos, conformado por dos mitades, establece la unión ente el motor y el eje. La conexión se realiza mediante un acope elástico (Fig. 11, elemento 6), diseñado para permitir un movimiento pendular dentro de un rango aceptable, lo que contribuye a la compensación de desalineaciones y vibraciones durante la operación. Además, el acople elástico actúa como un elemento de protección al funcionar como medida de seguridad ante sobreesfuerzos, cediendo y desacoplando el motor del eje cuando se excede el torque permitido, evitando daños mayores en el sistema.

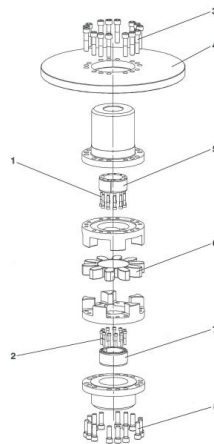


Fig. 11. Acoplamiento (BMA, 2018)

- Eje

El eje es un componente mecánico cuya función principal es transmitir el par de giro generado por el motor a la canasta. Está diseñado para soportar las cargas torsionales durante la operación y garantizar la transferencia eficiente de potencia necesaria para el proceso de centrifugado. Su correcta operación es fundamental para mantener el desempeño y la estabilidad del equipo durante el ciclo de trabajo.

- Obturador

Este conjunto de elementos mecánicos y electrónicos tiene la función de mantener cerrada la parte inferior de la canasta, evitando la fuga de masa cocida durante la carga y el proceso de centrifugado. Para ello, un muelle (Fig. 15, elemento 6), ejerce presión contante sobre el disco de cierre contra la canasta. Durante el

ciclo de desalojo del cristal centrifugado este muelle es vencido por dos pistones que permiten la apertura y evacuación del producto. Además, en este conjunto este acoplado el disco distribuidor (Fig. 12, elemento 5), que recibe la masa durante el ciclo de carga y la distribuye uniformemente a lo largo de toda la canasta, asegurando un proceso homogéneo.

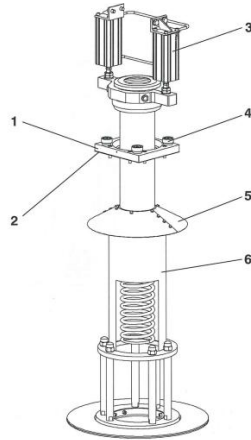


Fig. 12. Obturador (BMA, 2018)

- Canasta

Este conjunto de elementos mecánicos es responsable de tratar la masa cocida, separando la fase líquida de la sólida. Durante este proceso de centrifugado, permite que la miel atraviese sus paredes mientras que los cristales se adhieren a ellas. La canasta está equipada con telas intercambiables que se seleccionan según la calidad de cristal requerida. Debido al contacto directo con el producto final, estas telas están fabricadas en acero inoxidable para cumplir con los estándares de higiene y durabilidad.

- Tubo porta tobera de agua

Este subsistema conduce agua hacia el interior de la canasta mediante toberas de chorro plano (Fig. 13, elemento 2), las cuales realizan el lavado superficial de los cristales adheridos a las paredes mientras la canasta continúa girando. Este proceso de lavado contribuye a mejorar la pureza del azúcar al eliminar residuos de miel, optimizando la calidad del producto final.

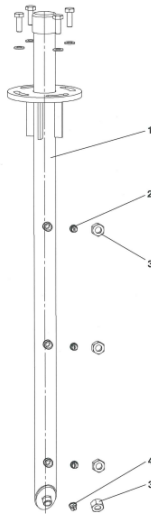


Fig. 13. Tubo porta tobera de agua (BMA, 2018)

- Tubo porta tobera de jarabe (N/A)

Elemento adicional no adquirido para este proceso

- Valvulería de agua y jarabe

Esta válvula regula la entrada, presión y caudal de agua hacia las toberas. Su automatización permite aplicar el lavado de manera precisa y programada, adaptándose a las condiciones específicas del ciclo de operación. Cabe mencionar que la válvula de jarabe no fue adquirida para este proceso.

- Valvulería de vapor (N/A)

Elemento adicional no adquirido para este proceso

- Palpador de carga mecánico

Este conjunto de elementos mecánicos es responsable de enviar la señal que indica cuando ha ingresado la cantidad adecuada de masa para optimizar el proceso. El palpador, accionado al inicio del ciclo de carga por un cilindro neumático, se desplaza hacia la pared de la canasta. A medida que la capa de masa se acumula y crece dentro de la canasta en movimiento, esta empuja el brazo del palpador (Fig. 14, elementos 3), que resiste gracias a un muelle (Fig. 14, elementos 1), hasta que regresa a su posición inicial, señalizando así la finalización del proceso de carga.

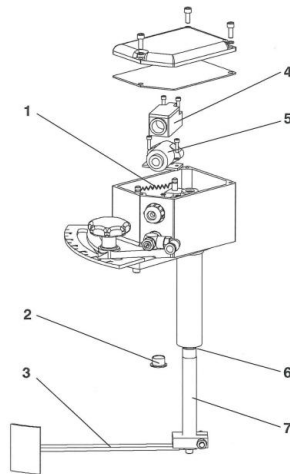


Fig. 14. Palpador de carga mecánico (BMA, 2018)

- Dispositivo de carga

Este elemento está fijado en la tapa y establece la unión entre la centrífuga y el distribuidor de la masa cocida. La válvula de mariposa (Fig. 15, elemento 1), regula el flujo de masa cocida, y su señal de cierre está sincronizada con el palpador de carga mecánico. La chapeta de carga (Fig. 15, elemento 4), funciona como guía para dirigir la masa hacia el cono distribuidor. Su cierre ocurre de forma desfasada respecto a la válvula de mariposa, permitiendo un vaciado completo y facilitando el lavado de la tolva (Fig. 15, elemento 3).

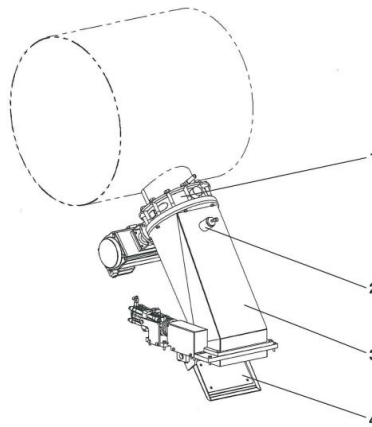


Fig. 15. Dispositivo de carga (BMA, 2018)

- Control de pendulaciones

El control de pendulaciones está compuesto por dos detectores de proximidad fijados en el cabezal de accionamiento. Su función es detectar de manera preventiva posibles movimientos excesivos para evitar el impacto de la canasta, el eje o el obturador contra la carcasa. Este sistema asegura la protección de la centrífuga principalmente en el rango de bajas velocidades, hasta aproximadamente 400 RPM. Una vez superada la primera velocidad crítica de vibración del eje, las amplitudes de pendulación disminuyen

considerablemente, volviendo ineficaces a los detectores de proximidad, momento en el cual el control de vibraciones asume la protección del equipo.

- Control de velocidad de giro

Este equipo cuenta con dos sensores que miden de forma simultánea y en tiempo real la velocidad de giro de la canasta. Su función es proporcionar una retroalimentación precisa al sistema electrónico del equipo, asegurando que la velocidad se ajuste correctamente según la fase del ciclo de operación.

- Control de vibración

El sistema de medición del transmisor de vibraciones utiliza un sensor de cuarzo piezoeléctrico para medir la aceleración del objeto monitoreado. Su función es detectar y cuantificar las vibraciones en la centrífuga, permitiendo al control de vibraciones proteger el equipo contra movimientos excesivos causados por desequilibrios en la canasta o deformaciones en el eje.

- Separador de mieles (N/A)

Elemento adicional no adquirido para este proceso

2.8 MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD

El RCM surge como una metodología diseñada para garantizar que los activos físicos continúen operando de manera eficiente y fiable dentro de su contexto de uso, reduciendo los tiempos de inactividad no planificada, la optimización de los costos de mantenimiento al centrar los esfuerzos en tareas de alto impacto. Su origen se remonta a la industria aeronáutica en la década de los 60, cuando se buscaban estrategias que optimizaran los planes de mantenimiento sin comprometer la seguridad ni la disponibilidad de las aeronaves. Los primeros estudios realizados por Nowlan (1978) demostraron que el mantenimiento basado únicamente en tiempo o ciclos de operación no siempre era la estrategia más efectiva, ya que la mayoría de las fallas no se debían al desgaste natural sino a factores aleatorios. Esto llevó a la creación de una metodología estructurada que analiza los modos de falla y sus consecuencias, permitiendo diseñar estrategias más precisas y eficientes (Moubray, 1997).

La metodología RCM ha evolucionado a lo largo del tiempo y se ha aplicado en diversas industrias, incluyendo la manufactura, la energía y la producción continua, como en el caso de la industria azucarera.

2.8.1 EVOLUCION Y APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA

El RCM ha sido implementado con éxito en múltiples sectores industriales, donde ha demostrado ser una herramienta clave para la optimización de la gestión de activos. Sifonte & Reyes-Picknell (2017) destaca que muchas organizaciones han invertido significativamente en programas de fiabilidad y gestión de activos, con el objetivo de evitar fallas inesperadas y optimizar costos de mantenimiento.

Para (Sjøholt, 2018) la evolución del RCM ha dado lugar a diversas metodologías que buscan su estandarización. Con el tiempo, surgió la necesidad de establecer normativas para asegurar que los procesos de mantenimiento cumplieran con los principios fundamentales de la confiabilidad. Las normativas más utilizadas incluyen:

- SAE JA 1011: Los criterios de evaluación para el proceso RCM
 - Define los requisitos que debe cumplir un proceso para ser considerado RCM.
 - Proporciona una base estructurada para evaluar si un programa de mantenimiento realmente sigue los principios del RCM.
- SAE JA 1012: Guía estándar para RCM
 - Proporciona guías detalladas sobre cómo implementar el RCM en distintos tipos de activos.
 - Detalla las mejores prácticas y ejemplos de aplicación en sectores industriales críticos.

Según Albuquerque (2016), la norma SAE JA 1011 fue la primera en consolidar los criterios de aplicación del RCM en cualquier tipo de activo físico, asegurando una gestión confiable y evitando la proliferación de metodologías no verificadas que no contribuyen a la mejora de la confiabilidad del proceso.

De acuerdo con Moubray (1997), cuando el RCM se implementa correctamente, se pueden obtener los siguientes beneficios:

- Mayor seguridad y protección ambiental: Reduce la probabilidad de fallas críticas que puedan poner en riesgo al personal o al entorno.
- Optimización del desempeño operativo: Permite mejorar la eficiencia de los equipos, asegurando una producción estable y de alta calidad.
- Reducción de costos de mantenimiento: Al identificar estrategias más eficientes, se minimizan los costos operativos asociados a fallas imprevistas.
- Aumento de la vida útil de los equipos: Evita el desgaste prematuro de los componentes mediante tareas de mantenimiento específicas y bien planificadas.
- Creación de una base de datos de mantenimiento: La recopilación sistemática de datos facilita la toma de decisiones basadas en evidencia y la mejora continua del proceso.
- Mayor motivación y eficiencia del personal técnico: La aplicación del RCM promueve una cultura de mantenimiento más analítica y estructurada, mejorando la cooperación entre equipos.

2.8.2 PRINCIPIOS DE LA METODOLOGIA RCM

La metodología RCM se basa en un conjunto de principios fundamentales que la diferencian de otros enfoques de mantenimiento. El RCM es un proceso de análisis sistemático que busca responder una serie de preguntas clave para determinar las mejores estrategias de mantenimiento para un activo específico

(Moubray, 1997). Estas preguntas permiten comprender a fondo las funciones del equipo, los modos de falla posibles y las acciones más adecuadas para mitigarlas.

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño del activo dentro de su contexto operativo actual?
2. ¿De qué manera el equipo puede fallar en el cumplimiento de sus funciones?
3. ¿Cuáles son las causas de cada modo de falla?
4. ¿Cuáles son las consecuencias de cada falla funcional?
5. ¿Cuál es la importancia de cada falla en términos de seguridad, costos y operación?
6. ¿Qué estrategias pueden predecir o prevenir estas fallas?
7. ¿Qué se debe hacer si no existe una tarea proactiva adecuada?

Según Bloom (2006) responder estas preguntas facilita la aplicación del RCM y lo hace más accesible para su implementación en industrias con altos requerimientos operativos. Para Smith (2003) la implementación del RCM debe seguir una serie de pasos estructurados que permiten su aplicación de manera eficiente y con resultados verificables.

La primera pregunta ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño del activo dentro de su contexto operativo actual? se enfoca en definir qué se espera de un equipo dentro de su entorno de operación. Esto no solo se limita a la función primaria del activo, sino que también incluye sus funciones secundarias y auxiliares. Un activo puede tener múltiples funciones, cada una con distintos criterios de desempeño, por lo que es esencial identificar qué se considera un funcionamiento óptimo y cuáles son los parámetros operativos que deben cumplirse. Establecer estos estándares permite diferenciar entre un desempeño adecuado y una posible falla funcional.

La segunda pregunta ¿De qué manera el equipo puede fallar en el cumplimiento de sus funciones? se centra en identificar todas las formas en las que el equipo podría dejar de operar correctamente. Las fallas pueden manifestarse de diferentes maneras, desde una incapacidad total para operar hasta una disminución en su rendimiento. En este sentido, se deben considerar tanto las fallas evidentes como aquellas que pueden no ser inmediatamente detectables pero que afectan el desempeño del equipo. Es crucial realizar un análisis detallado de los posibles modos de falla para comprender cómo pueden impactar la operación del activo.

La tercera pregunta ¿Cuáles son las causas de cada modo de falla? busca identificar los factores que pueden llevar a que un equipo deje de cumplir su función de manera óptima. Estas causas pueden derivar de múltiples fuentes, incluyendo desgaste natural, fallas en el diseño, errores operativos, deficiencias en el mantenimiento o condiciones ambientales adversas. Un análisis efectivo de las causas de falla permite establecer estrategias preventivas y predictivas que reduzcan la probabilidad de ocurrencia de estos eventos.

La cuarta pregunta ¿Cuáles son las consecuencias de cada falla funcional? examina el impacto que puede tener en la operación, la seguridad, el medio ambiente y los costos de mantenimiento. Dependiendo de la

criticidad del activo, una falla puede generar desde una simple disminución en la eficiencia operativa hasta eventos catastróficos que comprometan la seguridad del personal o la integridad de otros sistemas. Evaluar las consecuencias permite priorizar las fallas en función de su impacto y tomar decisiones sobre las estrategias de mitigación más apropiadas.

La quinta pregunta ¿Cuál es la importancia de cada falla en términos de seguridad, costos y operación? Implica un análisis de criticidad basado en la severidad, la frecuencia de ocurrencia y la capacidad de detección del problema. No todas las fallas tienen la misma relevancia en términos operacionales, por lo que es fundamental clasificarlas y asignar recursos de mantenimiento a aquellas que representan mayores riesgos. Este análisis permite diferenciar entre fallas que requieren una acción inmediata y aquellas que pueden ser monitoreadas sin necesidad de una intervención correctiva inmediata.

La sexta pregunta ¿Qué estrategias pueden predecir o prevenir estas fallas? Aquí es donde se definen las estrategias de mantenimiento más adecuadas, ya sea mediante inspecciones periódicas, mantenimiento preventivo basado en intervalos de tiempo o mantenimiento predictivo a través de tecnologías avanzadas como el monitoreo de condición. La selección de la estrategia depende de múltiples factores, incluyendo el costo-beneficio de cada enfoque y la viabilidad técnica de implementar métodos de detección temprana.

Finalmente, la séptima pregunta ¿Qué se debe hacer si no existe una tarea proactiva adecuada? En algunos casos, no existe una solución preventiva viable, ya sea porque la falla es impredecible o porque los costos de implementar estrategias proactivas superan los beneficios esperados. En estas situaciones, se debe considerar la posibilidad de permitir que el equipo opere hasta que falle y, posteriormente, aplicar un mantenimiento correctivo planificado. Esta decisión debe basarse en un análisis costo-riesgo que determine si es más eficiente asumir la falla y gestionarla de manera reactiva en lugar de tratar de evitarla a toda costa.

La responsabilidad de responder a las siete preguntas debe recaer en un equipo multidisciplinario dentro de la organización, compuesto por especialistas con conocimientos complementarios que permitan un análisis integral del activo. Este equipo debe incluir ingenieros de confiabilidad, técnicos de mantenimiento, operadores de planta, supervisores de producción y especialistas en seguridad y medio ambiente, cada uno aportando una perspectiva clave sobre el funcionamiento, las fallas y las implicaciones operativas del equipo en estudio. La toma de decisiones en el RCM no puede depender de una sola persona, ya que requiere la combinación de datos técnicos, experiencia operativa y criterios de gestión estratégica para determinar la mejor estrategia de mantenimiento. Por ello, el proceso es generalmente liderado por un facilitador de RCM, quien coordina sesiones de análisis estructuradas donde se identifican las funciones del activo, se establecen sus modos de falla y se evalúan las consecuencias de cada posible evento de fallo. Este enfoque colaborativo permite asegurar que las estrategias de mantenimiento seleccionadas sean técnicamente viables, económicamente sostenibles y alineadas con los objetivos globales de la organización, garantizando así la máxima confiabilidad y disponibilidad operativa del activo dentro de su contexto industrial.

CAPITULO 3 METODOLOGIA PLAN DE MANTENIMIENTO

APLICANDO RCM

3.1 IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA RCM

El desarrollo de un plan de RCM requiere, en primer lugar, la identificación detallada de los equipos y componentes que forman parte del sistema de centrifugado. Para lograrlo, es fundamental delimitar las condiciones operativas y estructurales del sistema siguiendo estándares internacionales, como la Norma ISO 14224:2016, la cual proporciona directrices para la recopilación y organización de datos relacionados con confiabilidad y mantenimiento en activos industriales. Aunque esta norma ha sido ampliamente aplicada en distintos sectores industriales, su estructura permite adaptarse a sistemas de centrifugado en la producción de azúcar, proporcionando una base sólida para el análisis y la toma de decisiones estratégicas en mantenimiento (ISO, 2016).

Dentro del proceso de identificación, la taxonomía establecida en la ISO 14224 es un recurso clave, ya que divide los activos en niveles jerárquicos, desde el más general hasta el más específico. En el contexto de los equipos de centrifugado en la industria azucarera, esta taxonomía facilita la segmentación del sistema en distintos subsistemas, permitiendo una evaluación detallada de cada componente y su rol en la confiabilidad operativa del proceso productivo. Los primeros niveles se enfocan en la ubicación y funcionalidad del activo dentro del proceso global, mientras que los niveles inferiores profundizan en su estructura, partes críticas y elementos susceptibles a fallas. Esta clasificación es esencial para establecer un esquema de mantenimiento efectivo y priorizar intervenciones en los activos más críticos (Campos-López et al., 2019).

Una vez identificados los equipos dentro del sistema de centrifugado, es necesario definir sus parámetros de operación actuales, lo que permitirá desarrollar un plan de mantenimiento alineado con la realidad operativa de la industria azucarera. Para esto, se realiza un análisis funcional que incluye la evaluación de modos de falla, efectos y consecuencias de cada fallo. Dicho análisis considera aspectos como impacto en la seguridad industrial, afectaciones al medio ambiente, reducción de eficiencia en la producción y costos asociados a fallos imprevistos. La recopilación de estos datos se apoya en registros históricos de mantenimiento y operación, proporcionando información clave para la elaboración de estrategias de intervención preventiva y predictiva (Gardella González, 2011).

Para garantizar la efectividad del RCM, es necesario aplicar herramientas analíticas como el Índice de Prioridad de Riesgo (NPR), el cual se calcula mediante la ponderación de tres variables: gravedad del fallo (G), frecuencia de ocurrencia (F) y detectabilidad (D).

La ecuación $NPR = G \times F \times D$ permite jerarquizar las fallas según su impacto y priorizar las acciones correctivas en función del nivel de criticidad de cada componente (Moubray, 1997). A partir de este análisis, se establece un esquema de mantenimiento estructurado, donde las tareas se asignan siguiendo un diagrama

3.2 DIAGRAMA DE DECISIÓN

Con este diagrama se responden las siguientes cuatro preguntas:

- Es importante para el análisis evitar sesgos y no polarizar las respuestas forzándolas ya que puede llevar a errores de resultados.

Tal como se ve en la figura 16 las respuestas son simples: SI o NO, por ello es susceptible a errores sistémicos.



3.3 PATRON DE FALLA

La aparición de fallos por naturaleza crea un patrón de fallos. Cada patrón describe como varia la tasa de fallos con el tiempo (Moubray, 1997).

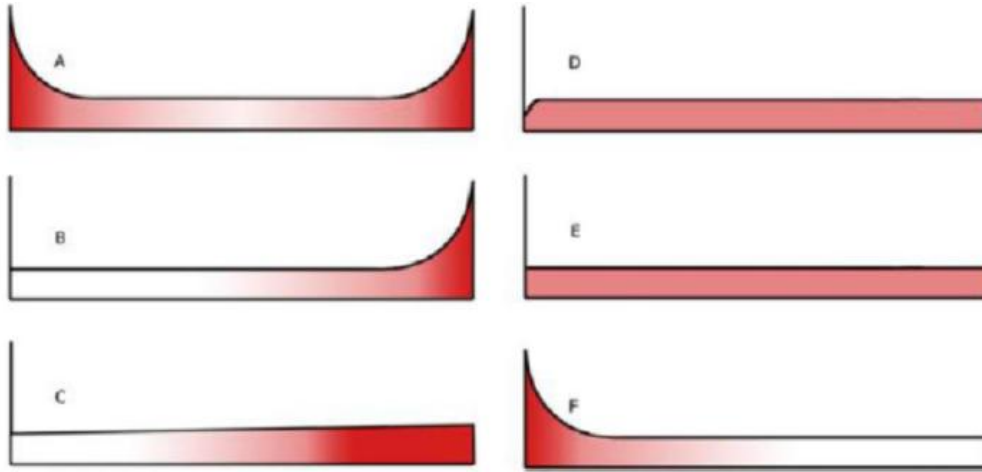


Fig. 17. Patrones de fallas (Moubray, 1997)

- Patrón A.

Es conocido como curva de la bañera. Comienza con una alta incidencia de fallos seguida de una tasa de fallos constantes y que aumenta gradualmente a una zona de desgaste.

- Patrón B.

Desgaste por edad. La tasa de fallas aumenta progresivamente con el tiempo

- Patrón C.

Fatiga progresiva. Cada vez es más probable que los equipos fallen con el tiempo.

- Patrón D.

Probabilidad condicional. El equipo nuevo es difícil que falle, pero aumenta drásticamente con el tiempo.

- Patrón E.

Fallo aleatorio. Tasa de fallos constante e impredecible

- Patrón F.

Mortalidad infantil. Muestra una tasa alta de fallos al inicio, luego disminuye rápidamente.

Todos estos patrones fueron observados en fallas presentadas en la industria de aviación civil y que pueden presentarse perfectamente el mismo patrón tal como los mostrados en la figura 17.

3.4 AMFEC

Constituye una metodología puente entre la comprensión funcional de un activo y la definición de tareas de mantenimiento que preservan su desempeño. Su objetivo es identificar de forma sistemática cómo puede fallar cada activo, qué efectos produciría la falla y con qué prioridad deben atenderse esos riesgos, de modo que la toma de decisiones sea trazable y coherente con los objetivos de seguridad, cumplimiento y producción. En el marco RCM, esta herramienta materializa el principio de decidir por consecuencias y eficacia y evita prácticas preventivas heredadas que no aportan valor (Moubray, 1997).

El proceso se estructura a partir de una delimitación clara del sistema (fronteras, interfaces, condiciones operativas) y la formalización de funciones y fallos funcionales; sobre esa base se identifican los modos de falla en un nivel causal accionable (p. ej., fatiga, desalineación, contaminación, deriva de calibración) y se describen los efectos a nivel de componente, subsistema, sistema y usuario/entorno. La guía IEC 60812 organiza esta secuencia y estandariza lenguaje, plantillas y salidas esperadas, lo que facilita la comparabilidad entre equipos y periodos y refuerza la trazabilidad del análisis (International Electrotechnical Commission [IEC], 2018).

La metodología AMFEC surge como respuesta a la necesidad industrial de desarrollar enfoques proactivos para la gestión del mantenimiento, alejándose de paradigmas reactivos tradicionales basados en la filosofía de "reparar cuando falla" hacia estrategias preventivas fundamentadas en criterios de riesgo y confiabilidad (Ben-Daya et al., 2016). Este enfoque sistemático permite identificar los modos de falla que representan mayor riesgo para la instalación, considerando aspectos de producción, seguridad, medio ambiente y costos operacionales. Estas mejoras al AMFE clásico resultan especialmente útiles en contextos con incertidumbre o escasez de datos. Estas extensiones no sustituyen al AMFE, sino que lo enriquecen en su capacidad de discriminar y justificar acciones cuando la evidencia es parcial (Liu et al., 2013).

3.4.1 ETAPAS FUNDAMENTALES DEL AMFEC

La metodología AMFEC se estructura en etapas secuenciales que garantizan un análisis sistemático y exhaustivo según los lineamientos establecidos por (Stamatis, 2003). Las etapas principales incluyen: definición de la intención de diseño, análisis funcional, identificación de modos de falla, análisis de efectos de falla, evaluación de criticidad o jerarquización del riesgo, y formulación de recomendaciones.

La definición del alcance del análisis constituye el primer paso crítico, estableciendo las fronteras del sistema estudiado y la profundidad de análisis requerida (Ben-Daya et al., 2016).

La recopilación de información implica la indagación exhaustiva de especificaciones técnicas, manuales de funcionamiento, datos experimentales y registros históricos de operación. El análisis funcional constituye la base conceptual del AMFEC, partiendo de la pregunta fundamental establecida por (Moubray, 1997) "¿Cuáles son las funciones deseadas y los estándares de desempeño asociados del activo en su contexto

operacional presente?". Este análisis distingue entre funciones primarias, que representan el propósito fundamental del activo, y funciones secundarias, que incluyen aspectos de seguridad, control, contención, estructurales, de protección y estéticas. La definición precisa de funciones requiere especificar estándares de desempeño cuantitativos y cualitativos, estableciendo límites claros entre operación satisfactoria e insatisfactoria (Ben-Daya et al., 2016). Estos estándares deben ser comprendidos y aceptados por usuarios y mantenedores del activo, asegurando consenso organizacional sobre expectativas de desempeño. La identificación de modos de falla responde a la pregunta formulada por (Moubray, 1997) "¿De qué maneras puede fallar al cumplir sus funciones?". Este proceso requiere definir todos los estados de falla asociados con cada función, considerando que cualquier activo puede sufrir múltiples fallas funcionales. La metodología requiere considerar no solo fallas por deterioro natural, sino también defectos de diseño, errores humanos de operadores y mantenedores, y factores ambientales adversos (Ben-Daya et al., 2009). La lista de modos de falla debe incluir únicamente aquellos considerados probables en el contexto operacional específico, evitando análisis excesivos de escenarios improbables.

3.4.2 ANÁLISIS DE CRITICIDAD Y EVALUACIÓN CUANTITATIVA

El NPR constituye el elemento diferenciador fundamental del AMFEC respecto al AMFE básico según establece (Stamatis, 2003). Este indicador cuantitativo se calcula mediante la multiplicación de tres factores: Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detección (D), expresado matemáticamente como: $NPR = Severidad \times Ocurrencia \times Detección$ e ilustrado en la figura 18. La Severidad evalúa la gravedad de los efectos del modo de falla en una escala típicamente de 1 a 10, donde valores superiores indican consecuencias más graves (Stamatis, 2003). La Ocurrencia representa la probabilidad de que ocurra una causa particular resultando en el modo de falla durante la vida útil del activo, también evaluada en escala de 1 a 10 (Ben-Daya et al., 2009). La Detección mide la capacidad de los controles actuales para detectar la causa o el modo de falla antes de que alcance al usuario final, donde valores altos indican baja capacidad de detección.

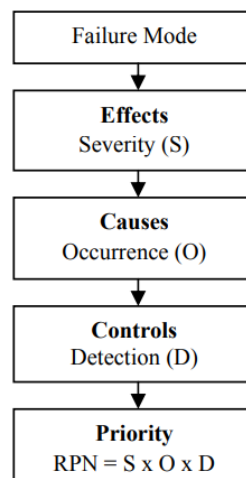


Fig. 18. Tareas importantes del AMFEC (Ben-Daya et al., 2009)

3.5 ANÁLISIS DE MODOS DE FALLOS, EFECTOS Y CRITICIDAD

El análisis de modos de falla, efectos y criticidad constituye una herramienta fundamental dentro de la gestión de mantenimiento, ya que permite identificar, evaluar y priorizar los riesgos asociados a cada componente de la centrífuga discontinua. A través de este método se analizan de manera sistemática los posibles modos de falla, sus consecuencias y la probabilidad de ocurrencia, con el fin de establecer estrategias de intervención más efectivas. En este sentido, el presente estudio incorpora criterios cuantitativos y cualitativos que facilitan la jerarquización de riesgos y orientan la toma de decisiones.

3.5.1 INDICES PARA LA EVALUACION DE CRITICIDAD

La criticidad de cada modo de falla se evaluó a partir de tres parámetros fundamentales:

- Gravedad (G):

El índice de gravedad califica el nivel de impacto que puede generar una falla en la operación del equipo, afectando la seguridad, la producción o el medio ambiente a través de una escala ordinal de 1 a 10 explicados en tabla 3, donde 1 representa un efecto leve sin consecuencias significativas y 10 corresponde a un impacto crítico, pudiendo causar paros de planta o riesgos mayores.

VALOR	DESCRIPCIÓN DE LA GRAVEDAD DEL EFECTO DEL FALLO
1	Las consecuencias del fallo son despreciables. No tienen ninguna trascendencia para la seguridad y afines, producción y calidad. Eventualmente pueden generar alguna mínima consecuencia para el coste directo del mantenimiento.
2 y 3	No hay consecuencias para seguridad y afines, producción y calidad; puede haber alguna consecuencia baja o moderada para los costes directos del mantenimiento.
4, 5 y 6	Los efectos tienen consecuencias importantes en los costes directos del mantenimiento y una pequeña influencia adversa en la producción y/o calidad, pudiendo causar paradas cortas no programadas, ciertas mermas o rechazo de calidad. Pueden originar pequeños fallos secundarios ocultos de poca importancia. No afectan la seguridad ni el medio ambiente.
7 y 8	Impacto importante del efecto de fallo en la producción y/o calidad y/o elevados costes directos de mantenimiento. También incluye fallos en cadena ocultos de relevancia. Además, se consideran pequeños o moderados efectos negativos para la seguridad y afines.
9 y 10	Se trata de consecuencias graves para la seguridad y afines. Asimismo, consideran interrupciones muy costosas por el impacto en la producción y/o calidad.

Tabla 3. Clasificación del índice de gravedad (Gardella González, 2011)

- Frecuencia de falla (F):

Este índice mide con qué regularidad se presenta un modo de falla en un componente durante un periodo definido, basándose en análisis de registros históricos. Utiliza también una escala de valores del 1 al 10 explicados en tabla 4, donde valores altos indican fallas recurrentes que requieren atención prioritaria.

VALOR	DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA FRECUENCIA DE FALLOS
1	Tasa de fallos: menos de 1 en más de 10 años.
2	Tasa de fallos: entre 1 y 3 en más de 10 años.
3	Tasa de fallos: entre 1 y 3 en 10 años.
4	Tasa de fallos: entre 1 y 3 en 5 años.
5	Tasa de fallos: entre 1 y 3 en 2 años.
6	Tasa de fallos: entre 1 y 3 por año.
7	Tasa de fallos: entre 1 y 3 cada seis meses.
8	Tasa de fallos: entre 1 y 3 cada dos meses.
9	Tasa de fallos: entre 1 y 3 cada semana.
10	Tasa de fallos: entre 1 y 3 por día.

Tabla 4. Clasificación del índice de frecuencia de falla (Gardella González, 2011)

- Detectabilidad (D):

Evalúa la facilidad con la cual una falla puede ser detectada antes de que cause un daño significativo a través de una escala ordinal de 1 a 5 explicados en tabla 5. Una baja detectabilidad (valor alto) incrementa el riesgo del modo de falla, especialmente si no existen sistemas adecuados de monitoreo o inspección

VALOR	DETECTABILIDAD
1	No hay ninguna duda de que el fallo será detectado de inmediato, por cualquier persona y sin ambigüedad.
2	La detección es prácticamente certera. Probablemente habrá que verla algún técnico u operario especializado.
3	La detección es razonablemente fiable. Hay que aplicar algún método, técnica o instrumento y/o tardar algún tiempo en diagnosticar definitivamente
4	La detección entraña riesgos de no acertar, se necesitan medios y tiempo relativamente largo para diagnosticar el fallo.
5	La detección es extremadamente difícil, o prácticamente inviable en las condiciones tecnológicas actuales.

Tabla 5. Clasificación del índice de detectabilidad (Gardella González, 2011)

La selección de los índices de gravedad, frecuencia y detectabilidad se fundamentó en los criterios técnicos propuestos por (Gardella González, 2011) cuya escala es ampliamente aceptada para aplicaciones industriales. Para su adaptación al contexto del ingenio, los valores y las interpretaciones se validaron en reunión con especialistas y responsables de mantenimiento de la planta, quienes ajustaron los parámetros considerando tanto la experiencia operativa del ingenio como el impacto económico y productivo local de cada modo de falla.

3.5.2 CÁLCULO DEL NÚMERO DE PONDERACIÓN DE RIESGO

El NPR permite cuantificar el nivel de riesgo asociado a cada modo de falla y se calcula como el producto de los tres índices mencionados en la EC1:

$$NPR = G \times F \times D \quad (EC1)$$

En el caso de la centrífuga discontinuas evaluada, se definió una clasificación del NPR utilizando escalas más estrictas, con valores bajos como criterio central. Esto se fundamenta en que el uso de rangos reducidos permite identificar de manera más precisa y anticipada los riesgos de falla, facilitando así una gestión preventiva y eficiente del mantenimiento. Esta estrategia es especialmente relevante considerando la estacionalidad característica de la producción azucarera: durante la zafra, cualquier interrupción operacional puede traducirse en repercusiones económicas considerablemente elevadas. Por lo tanto, establecer umbrales de riesgo bajos es una medida justificada para preservar la disponibilidad y confiabilidad del equipo en los periodos de máxima demanda productiva.

Los rangos establecidos para este estudio se presentan en la tabla 6:

Categoría de riesgo	Rango de NPR	Descripción
Riesgo aceptable (L)	1 a 25	Modos de falla de bajo impacto que pueden gestionarse con mantenimiento rutinario
Riesgo medio (M)	26 a 50	Situaciones que requieren monitoreo periódico y mantenimiento preventivo programado
Riesgo alto (S)	51 a 100	Fallas que demandan atención prioritaria e implementación de acciones correctivas
Riesgo muy alto (H)	Superior a 101	Condiciones críticas que requieren intervención inmediata

Tabla 6. Ponderación de riesgo para todos los componentes de la centrífuga discontinua (elaboración propia)

CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta un estudio aplicado a la centrifugas discontinua BMA modelo E1390 y B1750, este equipo altamente especializado y con un riesgo latente por las velocidades de trabajo, es utilizado para la separación mecánica de fases sólidas y liquidas en la etapa de centrifugado del azúcar. Su diseño robusto y su capacidad de operación por lotes permiten el procesamiento de masas cocidas, facilitando la separación de los cristales de sacarosa de la miel madre mediante la aplicación controlada de fuerza centrífuga sin dañar el grano. Esta separación es crucial para garantizar la calidad final del azúcar y su adecuada presentación para procesos posteriores como el secado, envasado y almacenamiento.

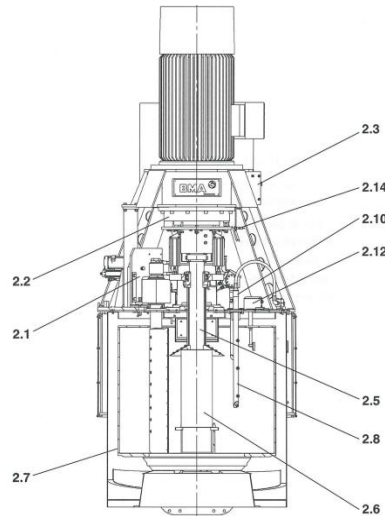
Se seleccionaron dos de las siete centrífugas de primera con que cuenta el ingenio, por tratarse de los equipos más recientes y mantenerse en operación continua como pilar del proceso. En contraste, las otras cinco unidades corresponden a modelos fabricados entre 1970 y 1990, lo que refleja una significativa obsolescencia tecnológica. Estas centrífugas, además de carecer de motores regenerativos, presentan menor eficiencia y mayores exigencias de mantenimiento, razón por la cual su uso se limita a esquemas de alternancia.

4.1 FICHA TECNICA

La ficha técnica del equipo reúne la información esencial sobre sus características de diseño, capacidades y condiciones de operación. Este documento sirve como referencia para la correcta operación y para la planificación de estrategias de mantenimiento, asegurando que las intervenciones se realicen con base en los parámetros establecidos por el fabricante. La figura 19 se muestra la ficha técnica de la centrifuga a analizar.

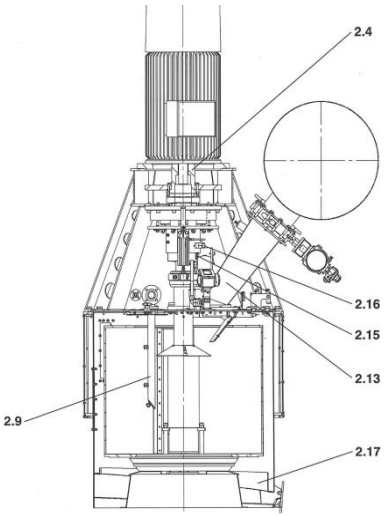
EMPRESA INGENIO AZUCARERO
GERENCIA DE MANTENIMIENTO
DATOS TÉCNICOS DE "CENTRIFUGAS" - MANTENIMIENTO MECÁNICO

Nº de CENTRIFUGA:	700137		
DESCRIPCION			
Tipo de CENTRÍFUGA:	DISCONTINUA		
MARCA	BMA		
Nº SERIE	ZP-50936		
MEDIDA DE CANASTO	1365x1070 mm		
TIPO DE TELA			
TIPO DE LUBRICACION	GRASA HI		
DATOS CILINDROS NEUMATICOS	Descargador -Cilindro de giro 00563710		
	Freno -Cilindro de freno 00508861		
	Obturador -Cilindro neumático 00568290		
	Palpador -Cilindro neumático 00545881		
	Chapaleta -Cilindro neumático 00551279		
MODELO	E 1390-230		
	RODAMIENTOS		
ARADO	Rodillos cónicos	502855	
EJE PRINCIPAL	Bolas de contacto angular	5101172	
	Rodillos cilíndricos	508626	
MARCA DE MOTOR	ABB	POTENCIA	185 kW
MODELO	IE2	R/MIN	894 r/min
Nº SERIE	IEC60074-1	CORRIENTE	302 A
		EFICIENCIA	0.81



COMPONENTES

- 2.1 Descargador con cilindro de giro
- 2.2 Cabezal de accionamiento
- 2.3 Freno
- 2.4 Acoplamiento
- 2.5 Eje
- 2.6 Obturador
- 2.7 Canasta
- 2.8 Tubo portatobera de agua
- 2.9 Tubo portatoberas de jarabe (N/A)
- 2.1 Valvuleria de Agua
- 2.11 Valvuleria de vapor (N/A)
- 2.12 Palpador de carga mecánico
- 2.13 Dispositivo de carga
- 2.14 Control de pendulaciones
- 2.15 Control de velocidad de giro
- 2.16 Control de oscilaciones
- 2.17 Separador de mieles (N/A)



OTRA INFORMACION	Piezas de alta criticidad Acople completo A2.4-0 Eje completo 005162931 Resorte de tracción palpador 05390131 Taco de freno 00500734 Arado de descarga con punta 00563008
------------------	--

Op. Ejecutor: Jefe:

Fig. 19. Ficha técnica centrifuga (Elaboración propia)

4.2 ANÁLISIS DE MODOS DE FALLOS, EFECTOS Y CRITICIDAD

Para garantizar la confiabilidad y eficiencia operativa de la centrífuga en la planta azucarera, se llevó a cabo un análisis exhaustivo basado en la metodología de Modos de Falla, Efectos y Criticidad. Este análisis permitió identificar detalladamente los diferentes modos en que los componentes y subsistemas podrían fallar, así como las consecuencias asociadas a cada uno de esos fallos, orientando la toma de decisiones para el mantenimiento preventivo y predictivo.

La información recopilada provino de registros históricos de mantenimiento y operación, entrevistas con técnicos especializados, así como encuestas aplicadas al personal operativo, lo que permitió contar con datos precisos y contextualizados. Para optimizar el análisis, se seleccionó dos unidades representativas de la centrífuga discontinua, considerando que las demás presentan características y condiciones similares.

Un elemento fundamental del análisis fue la evaluación cuantitativa del riesgo que representa cada modo de falla, mediante un indicador denominado Número de Ponderación de Riesgo. Este índice combina tres dimensiones cruciales que reflejan la importancia del fallo: la gravedad de su impacto, la frecuencia con que puede ocurrir y la capacidad para su detección anticipada.

La evaluación de criticidad con una clasificación NPR ajustada a escalas más estrictas realizada en la centrífuga discontinua se basó en literatura que señala que el uso de rangos reducidos permite identificar de manera más precisa y anticipada los riesgos de falla, facilitando una gestión preventiva y eficiente del mantenimiento (Liu et al., 2013). El análisis de criticidad detallado en el anexo B se realiza por cada modo de fallo. Cada criterio evaluado gravedad, frecuencia y detectabilidad son determinantes para la clasificación resultante de componentes críticos y no críticos.

El resultado de la ponderación de riesgos se presenta en la tabla 7 en donde se presenta el ranking de todos los componentes de la centrífuga discontinua.

Nº	COMPONENTE	NPR	RANKING
1	Acople	72	14
2	Eje	144	4
3	Rodamientos	60	16
4	Cabezal de rodamientos	160	3
5	Sellos	48	18
6	Frenos	96	10
7	Canasta	200	1
8	Arado	128	7
9	Palpador de arado	84	12
10	Telas	72	15
11	Alimentación	60	17

12	Cuerpo	128	6
13	Descargador	96	11
14	Válvula goteo	24	22
15	Actuadores neumáticos	112	9
16	Válvulas automáticas	128	5
17	Válvulas manuales	36	19
18	Tuberías	24	13
19	Mangueras	36	20
20	Bobina de estator	128	8
21	Bobina de contactor	82	13
22	Cables	18	26
23	Contactos fijos y móviles	16	27
24	Relé de control	16	28
25	Relé de sobrecarga	16	29
26	Térmicos de control	16	30
27	Tarjetas electrónicas	24	24
28	Sensores	162	2
29	Panel de interfaz	24	25
30	Puertos de comunicación	16	31
31	Ventilador	36	21

Tabla 7. Ponderación de riesgo para todos los componentes de la centrifuga tipo discontinua (Elaboración Propia).

4.3 PROPUESTA DE PLAN DE MANTENIMIENTO

Con base en la lógica de decisión presentada en el capítulo anterior (véase Figura 16), se efectuó un análisis sistemático de cada modo de falla identificado en los componentes críticos. Este procedimiento permitió determinar, de forma estructurada y sustentada en consecuencias y factibilidad técnica, la intervención de mantenimiento más adecuada para cada caso. Para ello se realizó una selección objetiva entre alternativas como mantenimiento PdM, PM y RTF. La trazabilidad de cada decisión quedó registrada indicando la función afectada, el modo y sus efectos, la estrategia aplicada y la periodicidad de ejecución.

Las tareas y sus frecuencias de intervención se definieron a partir del análisis funcional de los componentes y de la valoración de riesgos. Sustentándose principalmente en el juicio profesional de expertos del proceso y del mantenimiento, así como en criterios del fabricante. Esta elección metodológica responde a la disponibilidad limitada de series históricas completas para un tratamiento estadístico; no obstante, permite decisiones trazables y contextualizadas, en consonancia con los principios del RCM, de modo que cada acción propuesta guarda coherencia con la función y la criticidad de cada equipo y favorece la eficiencia operativa del sistema.

Las decisiones y asignaciones resultantes es la propuesta de un plan no critico en tabla 8, plan critico en tabla 9 y los costos de la ejecución de los dos planes propuestos en la tabla 10.

Tipos de mantenimiento	Intervencion	Mecanico de transmision			Separacion		Alimentacion y descarga		Neumatica			Electrico de potencia	Control e instrumentacion	Ventilacion y enfriamiento
		Frenos	Sellos	Acople	Palpador de arado	Telas	Alimentacion	Descargador	Valvula de goteo	Valvulas manuales	Mangueras	Cables	Termicos de control	Ventilador
Mantenimiento Predictivo	Alineacion laser			A										
Mantenimiento preventivo	Ajuste y apriete de fijaciones					S								
	Ajuste y calibracion				D	D								
	Ajuste y lubricacion	M												
	Inspeccion de operacion								D					
	Inspeccion visual	S	S	M			D	M			M			
	Inspeccion visual del estado de las telas					D								
	Inspección visual y apriete de sujeciones				3M			M						
	Inspeccion y ajuste de flujo								D					
	Inspeccion y apriete de conexiones												A	
	Inspeccion y limpieza													3M
	Limpieza								S	3M				
	Limpieza y lubricación	3M						M						
	Lubricación			M										
	Verificación de ventilación y carga											3M		

Tabla 8. Propuesta para modo de fallas no critico (Elaboración Propia).

Tipos de mantenimiento	Intervencion	Mecanico de transmision			Separacion		Alimentacion y descarga	Neumatica e hidraulica		Electrico de potencia	Control e instrumentacion
		Eje	Rodamientos	Cabezal de rodamientos	Canasta	Arado	Cuerpo	Valvulas automaticas	Actuadores neumaticos	Bobina de estator	Sensores
Mantenimiento Predictivo	Alineacion laser	A									
	Análisis de vibraciones	A	A	A	A						
	Análisis NDT ultrasónico	A			A		A				
	Balanceo dinámico				A						
	Medicion de aislamiento de devanado									A	
Mantenimiento preventivo	Ajuste y apriete de fijaciones						M				
	Inspeccion de operacion				D				D		D
	Inspeccion visual		D	D			M				
	Inspección visual de sellos	S									
	Inspección visual y apriete de sujeciones										A
	Inspeccion y ajuste de alineacion								3M		
	Inspeccion y apriete de conexiones								M		
	Inspeccion y limpieza							M			A
	Limpieza					D					
	Limpieza y lubricación							M			
	Limpieza y restauracion mecanica						A				
	Lubricación		A						3M		
	Verificación de alineación					A					
	Verificación de distribución				D						
	Verificación de sensores					M					
	Verificación de ventilación y carga									M	

Tabla 9. Propuesta para modo de fallas critico (Elaboración Propia).

Tipos de mantenimiento	Intervencion	Cantidad de servicios al año	Tiempo promedio de ejecucion por actividad (hr)	Tiempo anual de intervencion (hrs/año)	Costo Hora Hombre	Cantidad de Personas trabajando (H)	Consumibles	Costo Total
Mantenimiento Predictivo	Alineacion laser	4	2	8	\$ 7.68	2	\$ -	\$ 122.88
	Análisis de vibraciones	8	1	8	\$ 7.68	2	\$ -	\$ 122.88
	Análisis NDT ultrasónico	6	1	6	\$ 7.68	2	\$ -	\$ 92.16
	Balaneo dinámico	2	3	6	\$ 7.68	2	\$ -	\$ 92.16
	Medicion de aislamiento de devanado	2	0.25	0.5	\$ 7.68	1	\$ -	\$ 3.84
Mantenimiento preventivo	Ajuste y apriete de fijaciones	24	1	24	\$ 4.60	1	\$ -	\$ 110.40
	Inspección visual de sellos	64	0.25	16	\$ 4.60	1	\$ 10.00	\$ 713.60
	Inspeccion y ajuste de alineacion	4	1	4	\$ 4.60	1	\$ -	\$ 18.40
	Limpieza y restauracion mecanica	2	7	14	\$ 4.60	4	\$ 100.00	\$ 457.60
	Verificación de alineación	2	0.25	0.5	\$ 7.68	2	\$ -	\$ 7.68
	Ajuste y calibracion	724	0.5	362	\$ 4.60	1	\$ -	\$ 1,665.20
	Ajuste y lubricacion	12	0.5	6	\$ 4.60	1	\$ -	\$ 27.60
	Inspeccion de operacion	1448	0.25	362	\$ 3.07	1	\$ -	\$ 1,111.34
	Inspeccion visual	928	0.25	232	\$ 3.07	1	\$ -	\$ 712.24
	Inspeccion visual del estado de las telas	362	0.5	181	\$ 4.60	1	\$ 15.00	\$ 6,262.60
	Inspección visual y apriete de sujeciones	16	0.5	8	\$ 4.60	1	\$ -	\$ 36.80
	Inspeccion y ajuste de flujo	362	0.25	90.5	\$ 4.60	1	\$ -	\$ 416.30
	Inspeccion y apriete de conexiones	14	0.5	7	\$ 4.60	1	\$ -	\$ 32.20
	Inspeccion y limpieza	18	0.5	9	\$ 4.60	1	\$ 5.00	\$ 131.40
	Limpieza	418	0.5	209	\$ 4.60	1	\$ 2.00	\$ 1,797.40
	Limpieza y lubricación	378	0.75	283.5	\$ 4.60	1	\$ 2.00	\$ 2,060.10
	Lubricación	18	0.25	4.5	\$ 4.60	1	\$ 3.00	\$ 74.70
	Verificación de ventilación y carga	16	0.5	8	\$ 7.68	1	\$ -	\$ 61.44
	Verificación de distribución	362	0.5	181	\$ 4.60	1	\$ -	\$ 832.60
	Verificación de sensores	12	0.5	6	\$ 7.68	1	\$ -	\$ 46.08
Total								\$ 17,009.60

Tabla 10. costos de la ejecución de los dos planes propuestos (Elaboración Propia).

4.4 ANALISIS DE COSTOS

El análisis de costos en el mantenimiento industrial constituye una herramienta esencial para evaluar el impacto económico de las actividades asociadas a la operación y conservación de los equipos. En el contexto de la industria azucarera, donde las centrífugas representan un eslabón fundamental en la obtención de azúcar, resulta indispensable conocer y cuantificar los gastos que conlleva su mantenimiento, especialmente en lo relacionado con la mano de obra, los materiales consumibles, los repuestos y los costos generados por los paros de maquinaria.

La comprensión detallada de estos elementos permite identificar oportunidades de mejora y establecer estrategias que reduzcan las pérdidas económicas derivadas de fallas y detenciones no planificadas. En este sentido, el presente capítulo desarrolla un análisis comparativo entre los costos actuales de mantenimiento y aquellos proyectados bajo la implementación de un plan RCM. La propuesta busca demostrar que, mediante una gestión más estructurada y preventiva, es posible optimizar el uso de los recursos, disminuir los gastos asociados y lograr una reducción significativa en los tiempos de paro de las centrífugas.

De esta forma, el análisis de costos no solo ofrece una visión cuantitativa de los recursos invertidos, sino que también constituye una base sólida para sustentar económicamente la viabilidad de un plan de mantenimiento orientado a la eficiencia y confiabilidad.

4.4.1 COSTOS DE MANTENIMIENTO ACTUAL

El mantenimiento correctivo y preventivo de las centrífugas de primera (7 equipos), segunda (7 equipos) y tercera (4 equipos) es ejecutado por tres grupos de trabajo conformados por un mecánico y un ayudante mecánico, incorporándose un segundo ayudante de otra área cuando la naturaleza de las actividades lo requiere. La estructura de supervisión está integrada por un jefe de mantenimiento mecánico y un responsable del área de cristalizadoras y centrífugas, quienes aseguran la correcta planificación y ejecución de las labores.

En EC2 se presenta los cálculos usados para costear el plan de mantenimiento actual:

$$CTM = CMO + CMC + CEPP + CH + CPP \quad (EC2)$$

Donde:

CTM = Costo total de Mantenimiento

CMO = Costo de Mano de Obra (supervisión y ejecución)

CMC = Costo de Materiales y Consumibles

CEPP = Costo de equipo de protección personal

CH = Costo de Herramientas

CPP = Costo de Perdida de Producción

En la Tabla 11 se presenta el costo mensual y el costo por hora de la mano de obra asociada al mantenimiento de las centrífugas en evaluación, con el propósito de cuantificar el impacto económico correspondiente.

Cabe señalar que, por motivos de confidencialidad, los valores consignados corresponden a estimaciones.

Puesto	Salario Mensual	ISSS patronal (7.5%)	AFP patronal (8.75%)	INCAF patronal (1%)	Indemnización (8.33%)	Vacación (1.25%)	Aguinaldo (8.33%)	Costo Empresa Mensual	Horas de Trabajo	Costo por hora
Jefe Mantenimiento	\$2,300	\$75	\$201	\$10	\$192	\$29	\$192	\$2,998	176	\$17
Responsable de centrífugas	\$1,000	\$75	\$ 88	\$10	\$83	\$13	\$83	\$1,352	176	\$8
Mecánico centrífugas	\$600	\$45	\$53	\$6	\$50	\$8	\$50	\$811	176	\$5
Ayudante mecánico permanente	\$400	\$30	\$35	\$4	\$33	\$5	\$33	\$541	176	\$3
Ayudante mecánico eventual	\$400	\$30	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$430	176	\$2

Tabla 11. Costos de Mano de obra personal de centrifugado (Elaboración propia)

En la Tabla 12 se presenta el resumen de los costos anuales asociados a estas actividades, mientras que el cálculo detallado se encuentra documentado en el anexo C

Mano de Obra	Materiales y Consumibles	Seguridad	Herramientas	Costos de perdida de producción
\$11,585.21	\$9,560.37	\$303.75	\$25,885.00	\$183,054.64

Costos Anuales	\$230,388.96
----------------	--------------

Tabla 12. Resumen de costos actuales por Mantenimiento (Elaboración propia)

4.4.2 COSTOS DE MANTENIMIENTO PROPUESTO

De manera similar se ha evaluado el coste total de mantenimiento propuesto considerando una meta de aumentar el tiempo entre fallas de cada elemento en al menos un 17% tal como se plantea en el caso de éxito de “Implementación del RCM en una planta de lingotes de plomo” (Barros Chaparro et al., 2014)

A continuación, se presenta el cálculo en función de tareas de mantenimiento y coste de fallas con la EC3:

$$CTM_p = CMO_p + CMC_p + CEPP + CH + CPP_p + CMP \quad (EC3)$$

Donde:

CTM_p = Costo total de Mantenimiento Propuesto

CMO_p = Costo de Mano de Obra Propuesto (supervisión y ejecución)

CMC_p = Costo de Materiales y Consumibles Propuesto

$CEPP$ = Costo de equipo de protección personal

CH = Costo de Herramientas

CPP_p = Costo de Perdida de Producción Propuesto

CMP = Costo de Mantenimiento Propuesto

El Costo de Mano de Obra Propuesto (supervisión y ejecución) viene dado con la EC4:

$$CMO_p = CMS + CHCM \quad (EC4)$$

Donde:

CHS = Costo Horas de Supervision

$CHMH$ = Costo Horas en Mantenimiento Correctivo

El Costo de Materiales y Consumibles Propuesto viene dado con la EC5:

$$CMC_P = \frac{\bar{X}(\text{Consumo}, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024)}{\# \text{ de activos}} \times 2 \times (1 - 0.14) \quad (\text{EC5})$$

El Costo de Perdida de Producción Propuesto viene dado con la EC6:

$$CPP_P = \text{Tiempo de paro proyectado OT} \times \bar{X}(C6, C7) \times \text{Costo de azucar por tonelada} \quad (\text{EC6})$$

Donde:

$\bar{X}(C6, C7)$ = Promedio de producción por día de la centrifuga 6 y 7.

Costo de azúcar por tonelada se toma el valor de \$481.20 (*Precio del Azúcar hoy | Cotización del Azúcar - Investing.com, 2025*)

El Costo de Mantenimiento Propuesto viene dado en tabla 10 que representa el costo proyectado del nuevo plan.

En la Tabla 13 se presenta el resumen de los costos anuales asociados a estas actividades, mientras que el cálculo detallado se encuentra documentado en el anexo D

Mano de Obra	Materiales y Consumibles	Seguridad	Herramientas	Costos de perdida de producción	Costo de Mantenimiento Proyectado
\$6,170.39	\$8,221.92	\$303.75	\$25,885.00	\$156,540.59	\$17,009.60

Costos Anuales	\$214,131.40
----------------	--------------

Tabla 13. Resumen de costos propuestos por Mantenimiento (Elaboración propia)

4.4.4 REDUCCIÓN DE COSTOS

Con los costos actuales y propuestos se observa una diferencia de \$16,258 al año, sin embargo, es necesario agregar los costos de capacitación a los Lideres y personal operativo. Los resultados se muestran proyectados a 5 años en la tabla 14 considerando que el ingenio considera una inflación del 5% anual.

Año	Plan Actual	Plan Propuesto	Ahorro
Capacitación	\$ -	\$ 2,500	\$ -
2026	\$230,389	\$214,131	\$16,258
2027	\$241,908	\$224,838	\$17,070
2028	\$254,004	\$236,080	\$17,924
2029	\$266,704	\$247,884	\$18,820
2030	\$280,039	\$260,278	\$19,761
Total	\$1,273,044	\$1,185,711	\$89,833

Tabla 14. Proyección de ahorro 5 años (Elaboración propia)

En tabla 14 se considera un escenario operacional tomando como referencia el histórico de fallas de 5 zafras desde Z1920 hasta Z2425 siendo una línea base para el análisis de costos del plan actual y el propuesto.

4.5 CALCULO ROI Y PERIODO DE RECUPERACION

En la evaluación de proyectos de mantenimiento resulta indispensable considerar indicadores económicos que permitan justificar la viabilidad de su implementación. Dos de las métricas más utilizadas en ingeniería económica son el ROI y el periodo de recuperación.

El ROI constituye una medida que relaciona los beneficios netos obtenidos de una inversión respecto a su costo inicial, expresado en términos porcentuales EC7.

Su aplicación permite cuantificar de manera directa la rentabilidad que genera la adopción de un plan de mantenimiento en comparación con los recursos invertidos para su implementación.(Park, 2016)

$$ROI = \frac{Ahorros\ anuales - Costo\ de\ implementacion}{Costos\ de\ implemtacion} \times 100 \quad (EC7)$$

$$ROI = \frac{\$16,257 - \$2,500}{\$2,500} \times 100 = 550\%$$

Por su parte, el método de periodo de recuperación determina el tiempo requerido para recuperar la inversión inicial a partir de los ahorros o ingresos adicionales obtenidos EC8, siendo una herramienta sencilla y de uso extendido en la toma de decisiones de proyectos industriales. Su cálculo consiste en dividir la inversión inicial entre los beneficios anuales generados, permitiendo estimar en cuántos años o meses se logra alcanzar el punto de equilibrio (Blank & Tarquin, 2018)

$$Pay\ back = \frac{Costos\ de\ implementacion}{Ahorros\ anuales} \quad (EC8)$$

$$Pay\ back = \frac{\$2,500}{\$16,257} = 0.15\ años \approx 1.85\ meses$$

Los resultados obtenidos muestran un ROI del 550% y un payback de casi dos meses, lo que indica que la inversión realizada es altamente rentable y se recupera en un tiempo muy corto.

4.6 IMPACTO EN OEE DEL PLAN DE MANTENIMIENTO RCM PROPUESTO

El OEE es una métrica que considera los siguientes tres factores:

- Disponibilidad: El tiempo de operación entre el tiempo planificado.
- Rendimiento: La velocidad real entre la teórica en la que fue diseñado el equipo o sistema.

- Calidad: Los productos buenos entre los productos totales producidos.

$$OEE = Disponibilidad \times Rendimiento \times Calidad \quad (EC9)$$

La EC9 (Nakajima, 1989) permite que con estos factores definidos podemos calcular el OEE para identificar pérdidas de eficiencia y nos permite comparar equipos y con ello también enfocar esfuerzos de mejoras. En la industria refinera se han realizado aplicaciones de RCM y se ha demostrado que al incrementar la disponibilidad de los equipos se mejora directamente el OEE (Nakamanuruck et al., 2016).

El RCM define las estrategias de mantenimiento efectivas además de priorizar mejoras cuyos resultados se pueden medir con el OEE permitiendo alimentar revisiones constantes en el RCM.

En el ingenio azucarero se maneja un OEE global de planta que se evalúa constantemente por la alta dirección y es aquí en donde convergen proyectos de mejora continua que permiten aumentar el nivel de eficiencia de la planta.

De acuerdo con la EC9 en donde se presenta la disponibilidad como uno de los factores clave para el cálculo del OEE y siendo el factor que directamente se mejora con la aplicación de RCM en los equipos de centrifugado discontinuo se puede afirmar que el plan de mantenimiento RCM propuesto tendría un impacto positivo en el OEE global del ingenio azucarero.

4.7 PLAN DE IMPLEMENTACION DE LA PROPUESTA

Para la materialización de la propuesta, se define un plan de implementación con rigor metodológico sintetizado en la figura 20, sustentado en el diagnóstico de línea base obtenido a partir de la auditoría AMORMS aplicada al ingenio (véase anexo E):

1. Presentación y aprobación inicial del proyecto con gerencia
2. Selección del equipo multidisciplinario RCM
3. Ajuste de plan con personal del Ingenio
4. Capacitación especializada en metodología RCM para Lideres
5. Capacitación operativa para personal de mantenimiento y operaciones
6. Adquisición de herramientas predictivas
7. Desarrollo de formatos digitales y base de datos
8. Preparación de procedimientos operativos
9. Ejecución de plan piloto RCM en no zafra Z2526
10. Sesiones periódicas de seguimiento del equipo RCM
11. Monitoreo intensivo y registro de datos
12. Evaluación de resultados preliminares
13. Implementación completa del sistema RCM
14. Reaplicación de encuesta AMORMS
15. Informe final de resultados y análisis comparativo

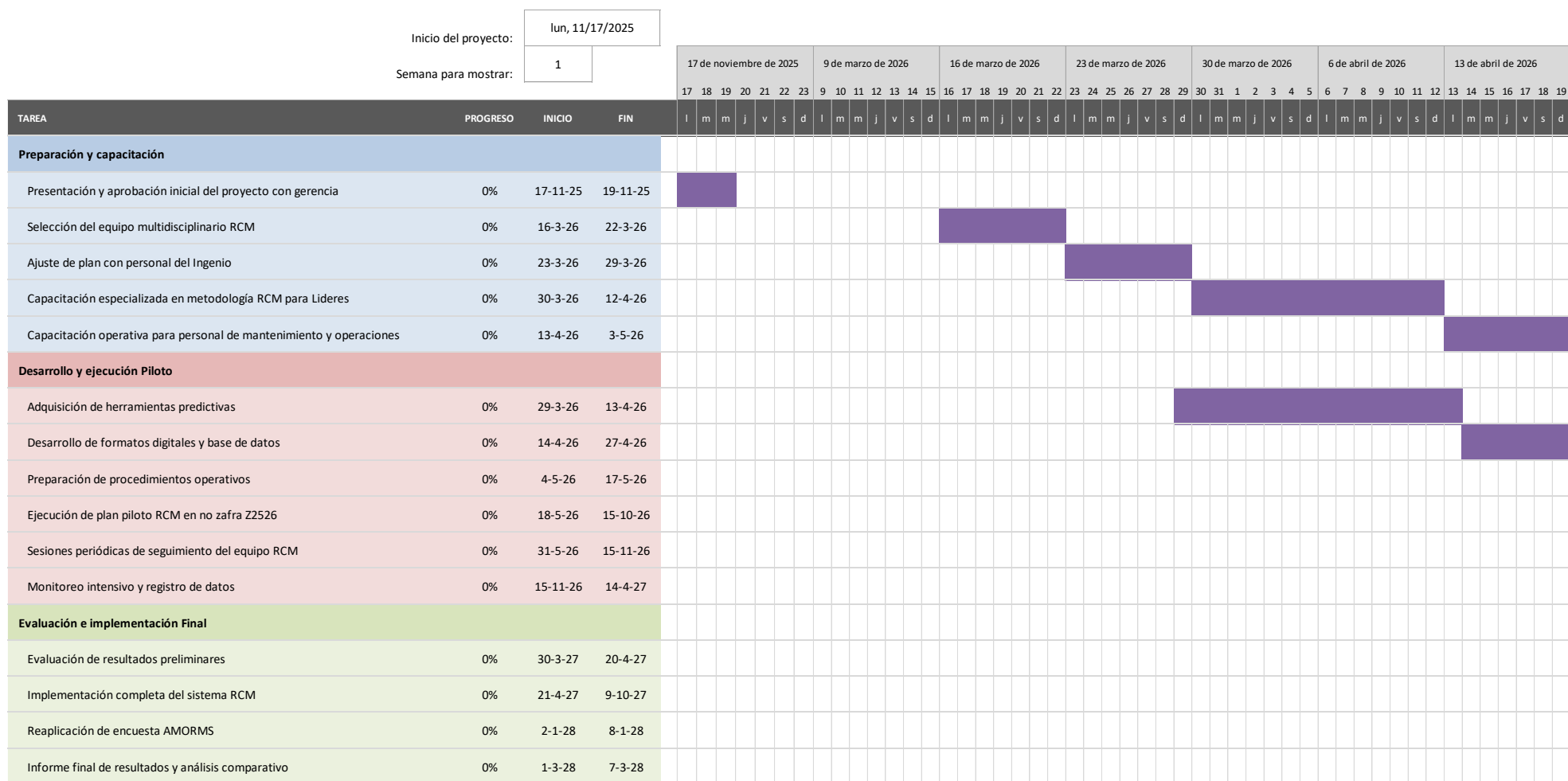


Fig. 20. Plan de implementación (Elaboración propia)

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se identificó la evolución del mantenimiento desde enfoques reactivos hacia metodologías centradas en confiabilidad como el RCM. El RCM constituye un modelo apropiado para centrífugas discontinuas, dado que estas máquinas presentan múltiples modos de falla complejos que requieren análisis sistémico de funciones, consecuencias y estrategias de intervención específicas, superando las limitaciones de los enfoques tradicionales basados únicamente en intervalos fijos de tiempo.
- Se formuló una estrategia metodológica específica de RCM, la propuesta de plan de mantenimiento ofrece un marco estructurado y adaptable a las necesidades del ingenio. Su diseño, basado en el diagnóstico de criticidad y en la clasificación de riesgos de los equipos, asegura la priorización de recursos en los modos de falla más relevantes. Se concluye que la aplicación del plan no solo incrementará la confiabilidad y disponibilidad de las centrífugas discontinuas, sino que también servirá como referente metodológico para la gestión del mantenimiento en otros equipos críticos de la planta.
- Desde la perspectiva económica se demostró que aplicando el plan de mantenimiento propuesto se reduce significativamente la ocurrencia de fallas y tiempos de inactividad, lo cual impacta directamente en la disminución de costos de operación y mantenimiento. Se estima una reducción mínima del 10% en comparación con la estrategia vigente, derivada principalmente de la optimización de la mano de obra, el menor consumo de repuestos y la reducción de pérdidas por paros de producción. Este beneficio económico, acompañado de una mayor disponibilidad y aprovechamiento de la capacidad instalada, refuerza la viabilidad y sostenibilidad del plan en el contexto del ingenio.

5.2 RECOMENDACIONES

- Adoptar el plan propuesto de manera gradual, iniciando con las centrífugas discontinuas BMA por ser las nuevas y de mayor dependencia. Esta implementación piloto permitirá validar la efectividad del plan en la reducción de paros y costos, y servirá como base para extender la metodología al resto de los equipos de centrifugado.
- Fortalecer la captura, registro y análisis de datos de falla, intervenciones y costos mediante un sistema CMMS que integre la información actualmente dispersa entre la aplicación interna y SAP. De esta forma, se garantizará información confiable, en tiempo real y trazable, para la toma de decisiones estratégicas en mantenimiento.
- Invertir en la formación continua del personal de mantenimiento y operación, no solo en técnicas de diagnóstico y detección temprana de fallas, sino también en la filosofía y metodología de RCM.

Esto fomentará una cultura organizacional orientada a la confiabilidad y permitirá que los trabajadores participen activamente en la identificación y prevención de fallas.

- Incorporar principios del Mantenimiento Productivo Total, promoviendo prácticas de mantenimiento autónomo que permitan a los operadores realizar inspecciones básicas, limpieza y lubricación, contribuyendo a disminuir las cargas del área de mantenimiento y mejorando la disponibilidad de los equipos.
- Avanzar hacia la digitalización y el mantenimiento predictivo, incorporando tecnologías de internet de las cosas y sistemas de análisis de datos para monitorear en tiempo real variables críticas como vibración, temperatura y consumo eléctrico en componentes sensibles. Esto facilitará la detección temprana de fallas incipientes y permitirá programar intervenciones más eficientes.

REFERENCIAS

Albuquerque, A. N. C. S. (2016). Estudo comparativo sobre a gestão de ativos físicos aplicada em empresas dos setores de mineração e energia nuclear com base em estudos de caso. <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/478>

Asociación Azucarera de El Salvador. (2009). Historia del azúcar en El Salvador. Kalina.

Bakker, H. (1999). Sugar Cane Cultivation and Management. Springer Science+Business Media.

Barros Chaparro, D. J., Valencia Ochoa, G., & Vargas Henríquez, L. (2014). Implementación del RCM II en planta de producción de lingotes de plomo. *Scientia Et Technica*, 19(2), 200-208. Redalyc.

Ben-Daya, M., Duffuaa, S. O., Raouf, A., Knezevic, J., & Ait-Kadi, D. (Eds.). (2009). Handbook of Maintenance Management and Engineering. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-472-0>

Ben-Daya, M., Kumar, U., & Murthy, D. N. P. (2016). Introduction to maintenance engineering: Modelling, optimization and management. John Wiley & Sons, Inc.

Blank, L., & Tarquin, A. (2018). Engineering Economy (8 th). McGraw-Hill.

Bloom, N. (2006). Reliability centered maintenance (RCM): Implementation made simple. McGraw-Hill.

BMA. (2018). Catalogo de piezas de recambio de una centrifuga discontinua (E1390).

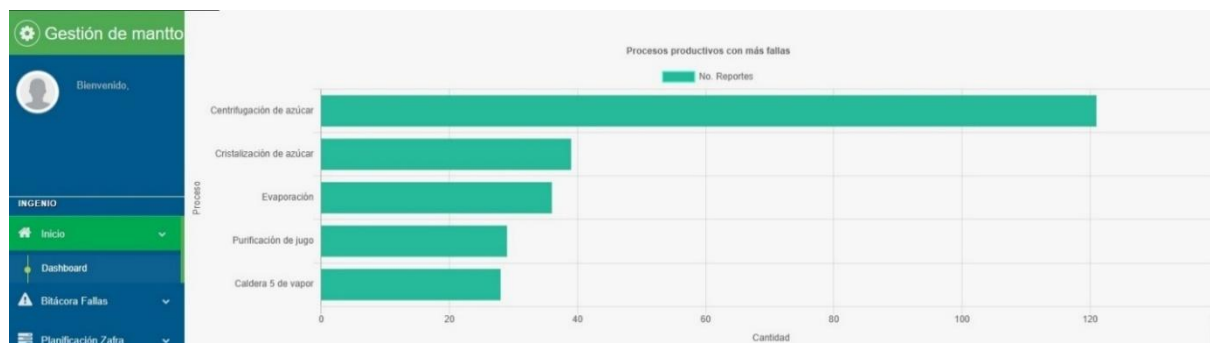
Broadbent, T. (1997). Inspection of Sugar Centrifuge Baskets.

- Broadbent, T. (2001). Solving Vibration Problems in Batch Sugar Centrifuges [Tecnico].
- BSI. (2017). EN 13306:2017 (EN 13306:2017). British Standards Institution.
- Campos-López, O., Tolentino-Eslava, G., Toledo-Velázquez, M., & Tolentino-Eslava, R. (2019). Metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) considerando taxonomía de equipos, bases de datos y criticidad de efectos. *Científica*, 23(1), Article 1. <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v23n1a06>
- Centrifuge Applications in Sugar Refining. (2014). <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/articles/dds/centrifuge-applications-in-sugar-refining/>
- Chen, J. C. P. (1985). Meade-Chen Cane Sugar Handbooks: A Manual for Cane Sugar Manufacturers and Their Chemists Cane Sugar Handbook. John Wiley & Sons Limited.
- Faragalla, M. M., Emmanuel, E., Alhammadi, I., Awwal, A. M., & Yong-Kwan, L. (2016). Reliability Centered Maintenance (RCM) Methodology and Application to the Shutdown Cooling System for APR-1400 Reactors.
- Fernandes, S. (2019, diciembre 13). Planejamento e Controle da Produção em Usina Sucroalcooleira. Repositório Digital UNIP. <https://repositorio.unip.br/dissertacoes-teses-programa-de-pos-graduacao-stricto-sensu-em-engenharia-de-producao/planejamento-e-controle-da-producao-em-usina-sucroalcooleira/>
- Gardella González, M. (2011). Mejora de metodología RCM a partir del AMFEC e implantación de mantenimiento preventivo y predictivo en plantas de procesos [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. En Riunet. <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/9686>
- Grimwood, C., Thewlis, J., & Thompson, P. (2002). Observations on centrifugal operation. *INTERNATIONAL SUGAR JOURNAL*, 104(1248).
- Grimwood, G. C., Thewlis, M. J., & Thompson, P. D. (2003). Observations on centrifugal operation. Part 2.
- Grimwood, G. L., Grimwood, G. C., & Hindle, G. (1999). Variable- and Multi-Speed Batch Centrifugal Drives. *International Sugar Journal Worldwide Sugar Edition*, Volumen 100, Número 1212.

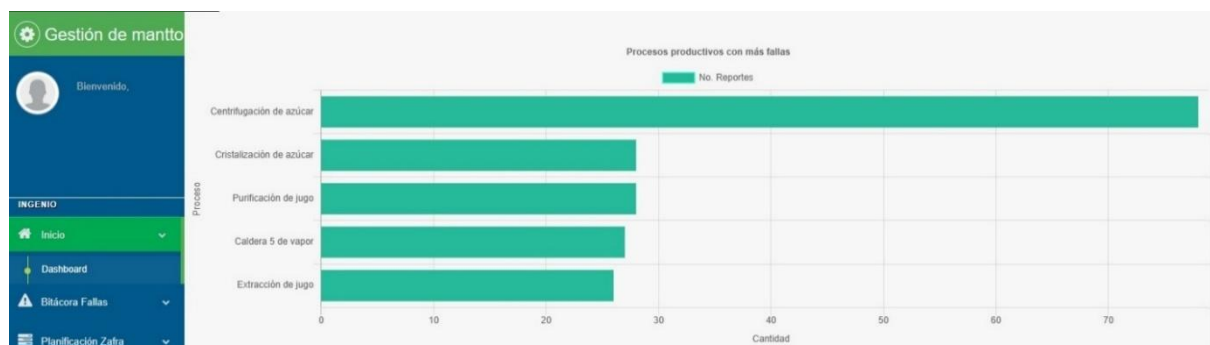
- Hacia los mercados globales del azúcar – Azucar. (2016). <https://azucardeelsalvador.com/hacia-los-mercados-globales-del-azucar/>
- International Electrotechnical Commission [IEC]. (2018). IEC 60812:2018. <https://webstore.iec.ch/en/publication/26359>
- ISO. (2016). ISO 14224:2016. ISO. <https://www.iso.org/standard/64076.html>
- Kelly, A. (2006). Strategic maintenance planning. Butterworth-Heinemann.
- Liu, H.-C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 828-838. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>
- Meade, G. P., & Chen, J. C. P. (1977). Cane Sugar Handbook: A Manual for Cane Sugar Manufacturers and Their Chemists (10 th). Wiley-Interscience.
- Moubray, J. (1997). Reliability-Centered Maintenance Second Edition.
- Moubray, J. (2001). Reliability-centered Maintenance. Industrial Press Inc.
- Nakajima, S. (1989). Introduction to TPM: Total productive maintenance. Productivity Press.
- Nakamanuruck, I., Talabgaew, S., & Rungreunganun, V. (2016). An Application of Reliability Centered Maintenance Technique for Preventive Maintenance in Refinery Plant. *Applied Mechanics and Materials*, 848, 244-250. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.848.244>
- Nowlan, F. S. (1978). RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE.
- Park, C. S. (2016). Contemporary Engineering Economics.
- Precio del Azúcar hoy | Cotización del Azúcar—Investing.com. (2025, agosto 29). Investing.com Español. <https://es.investing.com/commodities/london-sugar?form=MG0AV3>
- Rein, P. (2012). Ingeniería de la caña de azúcar (Verlag Dr. Albert Bartens KG).
- Rein, P. (2017). Cane Sugar Engineering. Verlag Dr. Albert Bartens KG.
- Rein, P. W. (2012). Cane Sugar Engineering. Verlag Dr. Albert Bartens KG.

- Sifonte, J. R., & Reyes-Picknell, J. V. (2017). Reliability Centered Maintenance – Reengineered: Practical Optimization of the RCM Process with RCM-R®. Productivity Press.
<https://doi.org/10.1201/9781315207179>
- Sjøholt, N. B. (2018). Reliability Centered Maintenance (RCM) of the Autonomous Passenger Ferry in Trondheim [Master thesis, NTNU]. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2563980>
- Smith, A. (2003). RCM--Gateway to World Class Maintenance. <https://shop.elsevier.com/books/rcm-gateway-to-world-class-maintenance/smith/978-0-7506-7461-4>
- Stamatis, D. H. (2003). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution (2nd ed., rev.expanded). ASQ Quality Press.
- Sugar Centrifuge Machines. (s. f.). Western States. Recuperado 13 de octubre de 2024, de <https://www.westernstates.com/sugar-centrifuge/>
- Tsarouhas, P. (2012). Reliability, availability and maintainability analysis in food production lines: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(11), 2243-2251.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03073.x>
- Western States Machine Company. (2020). Panorama de productos para la industria azucarera. <https://www.westernstates.com/wp-content/uploads/2022/06/2020-WS-Sugar-Overview-Spanish.pdf>

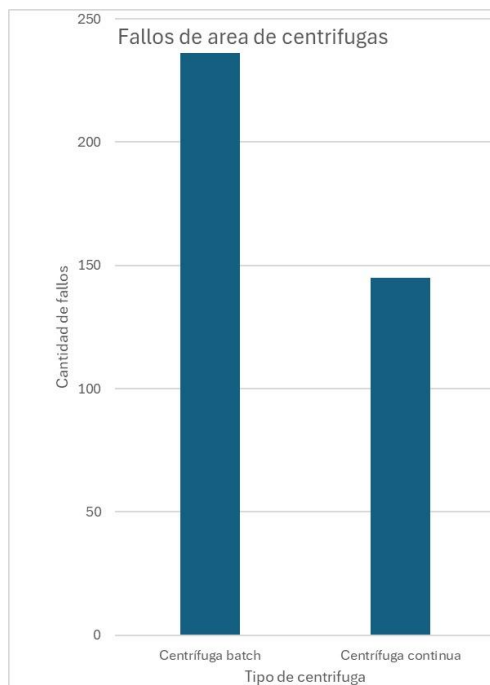
ANEXO A, REPORTES GENERADOS POR LA APLICACIÓN INTERNA



Z2324



Z2425



Acumulado de fallas Z2524 según el tipo de centrifuga

ANEXO B, MATRIZ AMFEC

MATRIZ AMFEC																	
SISTEMA: CENTRIFUGA BATCH																	
Subsistema	Función		Componente		Modo de fallo		Causas potenciales	Efecto potencial	Consecuencia				Severidad (S)	Ocurrencia (O)	Detectabilidad (D)	NPR	
									Seguridad	Medio Ambiente	Operación	Fallo Oculto					
Mecanico de transmision	1	Transmitir el movimiento rotacional del motor hacia la canasta y detener la rotación de manera controlada al finalizar el ciclo.	1	Acople	A	Ruido anormal	Desalineación	Vibración creciente, daño al eje y rodamientos, reducción de eficiencia, posible rotura									
							Desgaste	Vibración creciente, daño al eje y rodamientos, reducción de eficiencia, posible rotura									
							Falta de lubricacion	Daño al eje, sobrecalentamiento, posible rotura									
			2	Eje	B	Fuga	Daño en sellos	Contaminación del sistema									
					C	Quebrado	Sobrecarga, Fatiga	Paro inmediato, daño a canasta y motor									
					D	Ruido anormal	Desbalance, rozamiento, desgaste en rodamientos	Vibracion exesiva, daño a componentes adyacentes									
					E	Vibración anormal	Desalineacion, desbalance	Perdida de transmision, falla en acoples o rodamientos									
			3	Rodamientos	F	Alta vibración	Falta de lubricacion, desgaste	daño por fricción, paro de centrifuga									
					G	Fuga	Falla en sello, fractura	Pérdida de lubricante, fricción excesiva, sobrecalentamiento									
					H	Ruido anormal	fatiga del elemento rodante	Vibración inusual									

4	Cabezal de rodamientos	D	Fuga	Falla en sello	Perdida de transmision, falla en acoples o rodamientos	SI	SI	SI	NO	8	5	4	160
		I	Ruido anormal	fatiga del elemento rodante	Vibracion exesiva	SI	NO	NO	NO	7	5	2	70
5	Sellos	J	Fuga	Desgaste	Contaminación del sistema	SI	NO	SI	NO	4	3	4	48
6	Frenos	K	Atascado	Suciedad, falta de lubricacion	bloqueo del eje o fricción durante el ciclo	NO	NO	SI	NO	6	3	4	72
		L	No funciona	Desgaste total, fallo eléctrico o neumático, pérdida de presión.	La canasta no se detiene a tiempo; sobrecarga del sistema	SI	NO	SI	NO	7	2	2	28
		M	Quebrado		La canasta no se detiene a tiempo; sobrecarga del sistema	SI	NO	SI	NO	8	3	4	96
		N	Roce	Deformación y desgaste	Fricción constante durante operación, sobrecalentamiento, vibraciones	NO	NO	NO	NO	6	3	4	72
7	Canasta	O	Atascado	Motor sin potencia, eje obstruido	Fricción, quebraduras en componentes, daño en frenos	NO	NO	SI	NO	9	5	3	135
		P	Desbalance	Mala distribución de la masa, proceso ineficiente	Golpes en sensores y componentes adyacentes. Daño en estructura	SI	NO	SI	NO	10	5	4	200
		Q	Movimiento anormal	Mala distribución de la masa, proceso ineficiente	Golpes en sensores y componentes adyacentes. Daño en estructura	SI	NO	SI	NO	9	5	4	180
		R	Ruido anormal	Deformación y desgaste	daño por fricción, paro de	NO	NO	SI	NO	8	5	2	80
		S	Vibración anormal	Desgaste, desbalance	Proceso deficiente, daño en componentes adyacentes	SI	NO	SI	NO	10	5	3	150

Separación	2	Separar los cristales de azúcar de las mieles mediante fuerza centrífuga y descargar el producto procesado de la canasta.	8	Arado	T	Acumulación de producto	Desgaste, fractura	Reduccion de eficiencia,	NO	SI	SI	NO	6	4	4	96
					U	Atascado	Obstruccion	Paro de proceso, sobrecarga de	NO	NO	SI	NO	6	4	4	96
					V	Ciclo de marcha anormal	Sensores dañados,	Fallo de sistema, perdida de	SI	NO	SI	NO	6	4	4	96
					W	Desnivel	Alineacion incorrecta,	Vibraciones, daño en	NO	NO	SI	SI	6	4	4	96
					X	Fuga	Sello dañado	Contaminación del sistema	NO	SI	SI	NO	5	4	4	80
					Y	Movimiento anormal	Daño en rodamientos,	Ruido excesivo, daño en	SI	NO	SI	NO	6	4	4	96
					Z	No funciona	Falla electrica, daño mecanico	Equipo fuera de uso	NO	NO	SI	NO	7	4	2	56
					AA	Quebrado	Fatiga de material,	Daño en componentes,	SI	NO	SI	NO	8	4	4	128
					AB	Roto	Fatiga de material,	Daño de componente,	SI	NO	SI	NO	6	4	4	96
			9	Palpador de arado	AC	Atascado	Sensor dañado, daño mecanico	Daño en componentes, equipo no realiza funcion de secado	NO	NO	SI	NO	5	3	4	60
					AD	Fuga	Golpe mecanico, sellos dañados	Equipo fuera de uso	NO	SI	SI	NO	4	3	4	48
					AE	Movimiento anormal	Daño mecanico	Equipo ineficiente	SI	NO	SI	NO	5	3	4	60
					AF	No funciona	Daño mecanico, sensores dañados	Equipo fuera de uso	NO	NO	SI	NO	6	2	2	24
					AG	Paro repentino	Daño mecanico, sensores dañados	Equipo fuera de uso	SI	NO	SI	NO	6	3	4	72
					AH	Quebrado	Daño mecanico	Equipo fuera de uso	SI	NO	SI	NO	7	3	4	84
					AI	Roce	Descalibracion, daño mecanico	Daño en componentes subyacentes, ineficiencia de operacion	SI	NO	SI	NO	5	3	4	60
			10	Telas	AJ	Fuga	Sobrecarga de producto, golpe mecanico	Ineficiencia de operacion	NO	SI	SI	NO	4	3	4	48
					AK	Paro repentino	Saturacion de producto, falla de sujecion y	Interrupcion de proceso	SI	NO	SI	NO	6	3	4	72
					AL	Roto	Exceso de presion de arado, desgaste	Fuga de producto, ineficiencia de	SI	SI	SI	NO	5	3	4	60
					AM	Vibración anormal	Desbalanceo, daño en sujecion,	Daño en componentes subyacentes,	SI	NO	SI	NO	6	3	3	54

Alimentación y Descarga	3	Alimentar la masa cocida hacia el interior de la canasta y descargar los productos separados del equipo.	11	Alimentación	AN	No funciona	Fallo eléctrico, obstrucción de	Paro de proceso	NO	NO	SI	NO	4	2	2	16
					AO	quebrado	Golpe mecánico, material	Perdida de eficiencia	SI	NO	SI	NO	5	3	4	60
					AP	Roto	Desgaste mecánico,	Fuga o pérdida de control de	SI	NO	SI	NO	3	3	4	36
					AQ	Fuga	Sello defectuoso	Contaminación del sistema	NO	SI	SI	NO	2	3	4	24
			12	Cuerpo	AR	Desbalance	Acumulacion de material, desgaste mecánico	Vibraciones excesivas, daño en rodamientos	SI	NO	SI	NO	8	4	4	128
					AS	Fuga	Sellos dañados	Contaminación del sistema	NO	SI	SI	NO	6	4	4	96
					AT	Ruido anormal	Desalineacion, componentes sueltos	Daño en componentes subyacentes	SI	SI	NO	NO	6	4	2	48
					AU	Vibración anormal	Desbalance, componentes sueltos, fatiga	Fallo de componentes mecanicos	SI	NO	SI	NO	8	4	3	96
			13	Descargador	AV	Atascado	Obstruccion por residuos, sobrecarga, falta de lubricacion	Paro de proceso, sobrecalentamiento	NO	NO	SI	NO	6	3	4	72
					AW	Desbalance	meccanico, acumulacion de materia prima	daño en rodamientos o soporte	SI	NO	SI	NO	7	3	4	84
					AX	Fuga	Sellos dañados	Contaminación del sistema	NO	SI	SI	NO	5	3	4	60
					AY	Movimiento anormal	Desgaste de ejes	Falla mecanica	NO	NO	SI	NO	6	3	4	72
					AZ	Quebrado	Sobrecarga de producto, daño mecánico	Paro de proceso	SI	NO	SI	NO	8	3	4	96
					AAA	Ruido anormal	Componentes sueltos, desalineacion	Daño de componente	SI	NO	SI	NO	5	3	2	30
					AAB	Vibración anormal	Desalineacion, daño mecánico, componentes sueltos	Daño de componentes adyacentes	SI	NO	SI	NO	7	3	3	63

Neumático e Hidráulico	4	Controlar el flujo de fluidos de proceso y aire comprimido hacia los componentes operativos mediante actuadores y válvulas.	14	Válvula goteo	AAC	Fuga	Mal cierre, corrosión, sello dañado	Derrame de fluido	NO	SI	SI	NO	2	3	4	24
					AAD	No funciona	Obstrucción mecánica, señal eléctrica mala, daño mecánico	Interrupción de proceso	NO	NO	SI	NO	4	2	2	16
			15	Actuadores neumáticos	AAE	Atascado	Sello dañado,	Paro de equipo,	NO	NO	SI	NO	6	4	4	96
					AAF	Ciclo de marcha anormal	Falla de señal, válvula dañada	Ineficiencia de operación	NO	NO	SI	NO	6	4	4	96
					AAG	Fuga	Empaque dañado, conexiones sueltas	Contaminación del sistema, ineficiencia	NO	SI	SI	NO	5	4	4	80
					AAH	No funciona	Perdida de señal, válvula bloqueada, falta de aire	Paro de proceso	NO	NO	SI	NO	7	4	3	84
					AAI	Roce	Mala alineación, desgaste mecánico	Desgaste prematuro, deformación de componentes	NO	NO	SI	SI	6	4	4	96
					AAJ	Roto	Golpe mecánico, desgaste	Paro de proceso	NO	NO	SI	NO	7	4	4	112
					AAK	Atascado	Acumulación de suciedad, corrosión	Paro de proceso, sobrecalentamiento	NO	NO	SI	NO	8	4	4	128
					AAL	Ciclo de marcha anormal	Falta de señal eléctrica, daño mecánico	Flujo inestable	NO	NO	SI	NO	6	4	4	96
			15	Válvulas automáticas	AAM	Fuga	Daño de sellos, desgaste	Ineficiencia de operación	NO	SI	SI	NO	6	4	4	96
					AAN	No funciona	Falla eléctrica o neumática, obstrucción	Paro de equipo	NO	NO	SI	NO	8	4	2	64
			16	Válvulas manuales	AAO	Movimiento anormal	Suciedad, desgaste de mecanismo	Ineficiencia de operación	NO	SI	SI	NO	3	3	4	36
					AAP	No funciona	Mecanismo roto	No control de flujo, paro de operación	NO	NO	SI	NO	4	2	2	16
					AAQ	Ruido anormal	Desgaste, flujo turbulento	Ineficiencia de operación	NO	NO	SI	NO	2	3	2	12
			17	Tuberías	AAR	Fuga	Corrosión, fisura, presión excesiva	Pérdida de fluido, contaminación de producto					2	3	4	24
			18	Mangueras	AAS	Fuga	Fisuras, acoples sueltos	Pérdida de fluido, contaminación de producto	SI	SI	SI	NO	2	3	4	24
					AAT	Mangueras rotas	Fatiga, desgaste, golpe mecánico	Pérdida de fluido, contaminación de producto	SI	SI	SI	NO	3	3	4	36

Eléctrico de Potencia	5	Suministrar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del motor y establecer las conexiones eléctricas de potencia.	19	Bobina de estator	AAU	Alta temperatura	Sobrecarga, daño en componentes mecánicos	Daño de aislamiento, Fallo eléctrico	SI	NO	SI	NO	8	4	2	64
					AAV	Cortocircuito	Aislamiento dañados, sobrecarga, humedad	Paro de operacion	SI	NO	SI	NO	8	4	4	128
			20	Bobina de contactor	AAW	No funciona	Bobina quemada, falta de alimentacion	Paro de equipo	NO	NO	SI	NO	4	2	2	16
			21	Cables	AAX	Alta temperatura	Sobrecarga, cortocircuitos, mal montaje	Falla eléctrica, paro de equipo	SI	NO	SI	NO	3	3	2	18
			22	Contactos fijos y móviles	AAV	No funciona	Suciedad, mala señal eléctrica	Paro de operacion	NO	NO	SI	NO	4	2	2	16
Control e instrumentación	6	Monitorear y controlar automáticamente las variables del proceso, protegiendo el equipo y ejecutando las secuencias operacionales.	23	Relé de control	AAZ	No funciona	Bobina quemada, falta de alimentacion	Perdida de control	SI	SI	SI	SI	4	2	2	16
			24	Relé de sobrecarga	ABA	No funciona	Calibracion incorrecta, desgaste de contacto, suciedad	Falla de proteccion a motor, daño por sobrecarga, riesgo de incendio	SI	SI	SI	SI	4	2	2	16
			25	Térmicos de control	ABB	No funciona	Calibracion incorrecta, conexiones flojas, suciedad, corrosion	Perdida de proteccion eléctrica, daño a motor, paro de equipo	SI	SI	SI	NO	4	2	2	16
			26	Tarjetas electrónicas	ABC	No funciona	Fallo eléctrico, suciedad, humedad, interferencias electromagneticas	Perdida de control, funcionamiento riesgoso, paro de equipo	SI	SI	SI	SI	6	2	2	24
			27	Sensores	ABD	Alta temperatura	Sobrecarga de motor, rodamientos dañados, friccion excesiva, mala ventilacion	Activacion de protecciones, paro de proceso	SI	NO	SI	SI	8	4	2	64
					ABE	Ciclo de marcha anormal	Sensor dañado, conexiones sueltas	Malas lecturas, falta de control, riesgo de seguridad	NO	NO	SI	NO	8	4	4	128
					ABF	Fuga	Daño en sellos, corrosion, desajustes	Contaminacion de producto, perdida de eficiencia	NO	SI	SI	NO	7	4	4	112
					ABG	No funciona	Daño eléctrico, suciedad	Paro de equipo, perdida de control, riesgo de seguridad	NO	NO	SI	NO	9	6	3	162
					ABH	Paro repentino	Vibracion excesiva, desbalance, fallo mecanico	Paro de equipo, daño mecanico	SI	NO	SI	SI	9	4	4	144

			28	Panel de interfaz	ABI	No funciona	Falla de pantalla, conexiones sueltas, fallo eléctrico, pérdida de software	Perdida de datos, falla de control, paro de proceso	SI	SI	SI	SI	6	2	2	24
			29	Puertos de comunicación	ABJ	No funciona	Cable cortado, suciedad, pérdida de configuración, interferencia	Perdida de comunicación, pérdida de control, paro de proceso	SI	SI	SI	SI	4	2	2	16
Ventilación y Enfriamiento	7	Refrigerar los componentes eléctricos y mecánicos disipando el calor generado durante la operación.	30	Ventilador	ABK	Desajuste	dañado, aspas rotas, motor dañado, suciedad	Enfriamiento ineficiente	SI	NO	SI	NO	3	3	3	27
					ABL	Fractura	Golpe mecánico, desgaste	Enfriamiento ineficiente	SI	NO	SI	NO	3	3	4	36
					ABM	No funciona	Falla eléctrica, daño mecánico	Sobrecalentamiento, riesgo de incendio	NO	NO	SI	NO	4	2	2	16

ANEXO C, CALCULO DE COSTOS DE MANTENIMIENTO ACTUAL

Nombre Equipo	(Varios elementos)								
Suma de Horas de reparacion total	Etiquetas de columna								
Etiquetas de fila	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	2022/2023	2023/2024	2024/2025	Total general	
Actuadores neumáticos	5.433333333	0	0	122.5333333	1	0	2.6	131.5666667	
Alimentación	0	0	0	4.166666667	4.133333333	0	0	8.3	
Arado	1.55	0	0	11.08333333	0	0	0.333333333	12.96666667	
Cuerpo	0	3	0	0	0	0	0	3	
Descargador	0	0.583333333	0	5	5	0	0	10.58333333	
Eje	0.5	0	0	0	0	0	0	0.5	
Frenos	0	0	0	4	0	0	0	4	
Mangueras	0	0	0	0.5	2.333333333	0	0.4	3.233333333	
Palpador de arado	0	0	0	0.916666667	2	0	1	3.916666667	
Sensores	0	0	7.5	0	0	0	9.016666667	16.51666667	
Sistema freno	0	0	0	0	0	0	1	1	
Tarjetas electrónicas	0	0	0	0	0	5.633333333	0	5.633333333	
Telas	0	0	0	3.5	0	8.566666667	0	12.06666667	
Válvula goteo	0	0	0	0	0	0	0	0	
Válvulas	0	0	0	0	1	1.6	0	2.6	
Válvulas automáticas	0	4.233333333	3.1	3.383333333	17.95	6.916666667	35.58333333		
Ventilador	0	4.75	0	0	0	0	0	4.75	
Total general	7.483333333	3.583333333	16.48333333	154.8	18.85	33.75	21.26666667	256.2166667	
Promedio de horas OT en 2 centrifugas	36.60	hrs de equipo de 3 personas							

Tiempo invertido por equipo de trabajo sacado de OT

				HH PLAN	378
Descripción de Actividad de Mantenimiento	Estrategia	Cantidad de Personas	Duración Plan	HH Plan	
DESMONTAJE DE CENTRIFUGA 6 DE PRIMERA-BATCH	Actividades específicas	3	18	54	
MANTENIMIENTO DE CENTRIFUGA 6 DE PRIMERA-BATCH	Actividades específicas	3	18	54	
MONTAJE DE CENTRIFUGA 6 DE PRIMERA-BATCH	Actividades específicas	3	18	54	
DESMONTAJE DE CENTRIFUGA 7 DE PRIMERA-BATCH	Actividades específicas	3	18	54	
MANTENIMIENTO DE CENTRIFUGA 7 DE PRIMERA-BATCH	Actividades específicas	3	18	54	
MONTAJE DE CENTRIFUGA 7 DE PRIMERA-BATCH	Actividades específicas	3	18	54	
EVALUACIÓN DE CENTRIFUGA 6 DE PRIMERA-BATCH	Actividades específicas	3	9	27	
EVALUACIÓN DE CENTRIFUGA 7 DE PRIMERA-BATCH	Actividades específicas	3	9	27	

Plan de fabrica horas por personal

	Hoja de ruta: CHP-400-1 Código gestión de calidad: R-2MM-024 Modificación: Septiembre 2019	Denominación: MPZ equipos y subequipos ruta Centrifugas
		Nº Plan de Mantenimiento:
		Nº OT:
Ruta Centrifuga 001		
DIARIO		

Fecha de lanzamiento:

Fecha de recepción:

Leyenda	
A1	Falla
A2	Solicitud Mantenimiento
D	Equipo Detenido
TD	Turno por Día
T1	Turno 06:00 a 14:00
T2	Turno 14:00 a 22:00
T3	Turno 22:00 a 06:00
D+N°	Día
MRT	Motor, Reductor, Transmisión

Centrifugas 1a	
Inspección Centrifugas	
1	Inspección del proceso de descarga de arados, telas, cono, observar distancias entre elementos y si existen obstrucciones
2	Revisión de espesores de elementos del sistema de arado y de levante de campana
3	Revisar condición de tela
4	Inspección del sistema de freno, estado de zapatas y tiempo de frenado (10-20s)
5	Inspección de arados, guías, contacto con canasta, cuchillas
6	Inspección palpador, correcto funcionamiento de carga
7	Inspección en flauta espesora, obstrucciones, chorro cónico
8	Inspección de recámara de mieles (cada 3 días)
Inspección Sistemas	
9	Presión del sistema (aceite-aire-agua)
10	Sistema neumático, fugas, accionamientos
11	Sistema lubricación, fugas, nivel vaso nebulizadores
12	Sistema eléctrico, detectores, correcto funcionamiento
13	Drenar trampas
Limpieza y Ajustes	
14	Limpieza rayos, conos descarga, cámara de mieles, alrededores
Colector de Polvillo Centralizado	
1	Limpieza de filtros
2	Revisión de empaques de goma (fugas, desgaste)
3	Revisión de conexiones de vacío
4	Vaciado de tanques de vertido
5	Busqueda de acumulaciones en cono y tubo de salida
6	Verificar humedad del aire para limpieza de filtros (soplado y trampas)

Actividad	Tiempos estimados (min)	
1	15	
2	15	
3	5	
4	15	
5	15	
6	10	
7	10	
8	15	
9	15	
10	15	
11	10	
12	10	
13	10	
14	30	
Total por Check list	190	min
Total en 140 días de Zafra	26600	min
Total por las dos centrifugas	53200	min
Total por las dos centrifugas	887	h

Check list en zafra por mecánico de centrifugas.

Puesto	Costo por hora	Supervision (h)	Check list (h)	Plan Fab (h)	OT (h)	Tiempo (h)	Costo
Jefe Mantenimiento	\$ 17.04	106	-	-	-	106	\$ 1,798.91
Responsable de Centrifugas	\$ 7.68	528	-	-	-	528	\$ 4,054.80
Mecanico Centrifugas	\$ 4.61	-	887	126	37	1,049	\$ 4,834.75
Ayudante mecanico permanente	\$ 3.07	-	-	126	37	163	\$ 499.48
Ayudante mecanico eventual	\$ 2.44	-	-	126	37	163	\$ 397.27
Total						2,008	\$11,585.21

$$CMO = CHS + CHCM + CHPF + CHCL$$

Donde:

CHS = Costo Horas de Supervision

CHCM = Costo Horas en Mantenimiento Correctivo

HPF = Costo Horas Plan de Fabrica

HCL = Costo Horas de Check List

Costos de Mano de Obra (CMO)

ict.fijo 0 SIST CENTRIFUGA 6 PRIMERA-BATCH
 base 1240401 Maq y Equip. Indust. Sociedad 2000

General Dependiente tiempo Asignaciones Origen Impto.sobre patrim. Valoración

Datos generales
 Denominación SIST CENTRIFUGA 6 PRIMERA-BATCH
 Txt.núm.pral.AF SIST CENTRIFUGA 6 PRIMERA-BATCH
 Determ.cuentas 400000 MAQUINARIA Y EQUIPO INDUSTRIALES
 Número de serie
 Número de inventario
 Cantidad 1 C/U cada uno
☒ Gestión histórica

Inventario
 Último inventario el ☒ Incluir AF en lista de inventario
 Nota de inventario

Información contabilización
 Capitalizado el 31.10.2019 Descapitalización el
 Alta original el 31.10.2019 Baja planificada el
 Año de alta 2019 010 Pedido el

Toda OT cargada al activo se encuentra en el sistema de gestión (SAP)

Nombre de equipo	2020	2021	2022	2023	2024	Total general
CENTRIFUGA 1 DE PRIMERA-BATCH	\$ 1,431.44	\$ 4,376.85	\$ 6,293.58	\$ 2,507.99	\$ 2,434.62	\$ 17,044.48
CENTRIFUGA 2 DE PRIMERA-BATCH	\$ 855.64	\$ 4,457.76	\$ 5,188.10	\$ 1,803.93	\$ 4,658.15	\$ 16,963.58
CENTRIFUGA 3 DE PRIMERA-BATCH	\$ 2,109.66	\$ 3,441.56	\$ 10,202.14	\$ 3,193.54	\$ 5,204.65	\$ 24,151.55
CENTRIFUGA 4 DE PRIMERA-BATCH		\$ 7,399.44	\$ 8,866.18	\$ 4,297.62	\$ 3,160.81	\$ 23,724.05
CENTRIFUGA 5 DE PRIMERA-BATCH	\$ 984.89	\$ 6,532.56	\$ 2,352.66	\$ 3,590.52	\$ 2,846.49	\$ 16,307.12
CENTRIFUGA 6 DE PRIMERA-BATCH	\$ 15,051.57	\$ 2,348.92				\$ 17,400.49
SISTEMA CENTRIFUGA 6 PRIMERA-BATCH			\$ 280.76	\$ 1,821.91	\$ 622.64	\$ 2,725.31
CENTRIFUGA 7 DE PRIMERA-BATCH	\$ 19,870.86	\$ 7,346.42	\$ 11,540.64	\$ 7,860.59	\$ 2,371.33	\$ 48,989.84
	\$ 40,304.06	\$ 35,903.51	\$ 44,724.06	\$ 25,076.10	\$ 21,298.69	\$ 167,306.42

$$CMC = \frac{\bar{X}(\text{Consumo}, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024)}{\# \text{ de activos}} \times 2 = \frac{\$33,461.28}{7} \times 2 = \$9,560.37$$

Costos de Materiales y Consumibles (CMC)

Descripción	Cantidad	Articulos al año	Costo	Total
Cascos	3	1	\$ 6.50	\$ 19.50
Zapatos dielectricos de seguridad	3	1	\$ 38.00	\$ 114.00
Guantes	3	4	\$ 5.75	\$ 69.00
Guantes de temperatura	3	2	\$ 5.00	\$ 30.00
Lentes de seguridad	3	2	\$ 5.40	\$ 32.40
Proteccion de oidos	3	1	\$ 12.95	\$ 38.85
			Total	\$ 303.75

Costos de Equipo de protección Personal (CEPP)

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Juego de llaves combinadas métricas (8-32 mm)	1	\$ 120	\$ 120
Juego de llaves de estrella y corona (hasta 50 mm)	1	\$ 180	\$ 180
Juego de dados métricos 1/2" y 3/4" (8-50 mm) con carraca	1	\$ 250	\$ 250
Llaves ajustables grandes (12" y 18")	1	\$ 80	\$ 80
Juego de destornilladores planos y de cruz	1	\$ 40	\$ 40
Martillos (1 de bola, 1 mecánico 2 lb, 1 goma)	1	\$ 70	\$ 70
Pinzas (universal, punta, presión, cortafrio)	1	\$ 80	\$ 80
Extractores de rodamientos (mecánicos)	1	\$ 450	\$ 450
Calentador de rodamientos por inducción	1	\$ 1,200	\$ 1,200
Llaves dinamométricas (rango 40-200 Nm y 200-800 Nm)	1	\$ 450	\$ 450
Gato hidráulico 20 ton	1	\$ 600	\$ 600
Micrómetro y calibradores vernier (0-150 mm, 150-300 mm)	1	\$ 250	\$ 250
Esmeril angular 7"	1	\$ 150	\$ 150
Taladro eléctrico industrial 1/2"	1	\$ 200	\$ 200
Pistola neumática de impacto 3/4" + dados	1	\$ 500	\$ 500
Reloj comparador con soporte magnético	1	\$ 180	\$ 180
Calibrador de espesores (feeler gauge)	1	\$ 75	\$ 75
Nivel láser para alineación	1	\$ 400	\$ 400
Sistema de alineación láser de ejes	1	\$ 10,000	\$ 10,000
Juego de lámparas recargables LED portátiles	3	\$ 40	\$ 120
Camara termografica	1	\$ 21,000	\$ 21,000
Amperimetro digital	1	\$ 260	\$ 260
Sistema de vibraciones	1	\$ 32,000	\$ 32,000
Analizador ultrasonico	1	\$ 5,000	\$ 5,000
Megger	1	\$ 4,000	\$ 4,000
		Total	\$ 77,655

Se estima una vida útil de 3 años en promedio

\$25,885.00

Costos de Herramientas (CH)

Centrífuga	Capacidad 90% (kg)	Ciclos/ día	% Cristales en Masa	Recuperacion de Cristal	Toneladas de Azucar / día (t)
CENTRIFUGA 1 DE PRIMERA-BATCH	1001	240	50%	90%	108.11
CENTRIFUGA 2 DE PRIMERA-BATCH	1001	240	50%	90%	108.11
CENTRIFUGA 3 DE PRIMERA-BATCH	1001	240	50%	90%	108.11
CENTRIFUGA 4 DE PRIMERA-BATCH	1001	240	50%	90%	108.11
CENTRIFUGA 5 DE PRIMERA-BATCH	1001	240	50%	90%	108.11
CENTRIFUGA 6 DE PRIMERA-BATCH	1264.9	360	50%	97%	220.85
CENTRIFUGA 7 DE PRIMERA-BATCH	1592.5	360	50%	97%	278.05
Promedio (C6,C7)					249.45

$$Azucar\ por\ dia(t) = (Ciclos/dia) \times \frac{Capacidad\ (kg) \times \%CM \times Recuperacion}{1000}$$

$$\bar{x}(C6,C7) = \frac{220.85 + 278.05}{2} = 249.45\ t$$

Tiempo de paro OT 36.60 h
Tiempo de paro OT 1.525 días

Costo de la azucar por Tonelada \$ 481.20

[Precio del Azúcar hoy | Cotización del Azúcar - Investing.com](#)

$CPP = Tiempo\ de\ paro\ OT \times \bar{x}(C6,C7) \times Costo\ de\ azucar\ por\ tonelada$

$CPP = 1.525 \times 249.45 \times 481.2$

$CPP = \$183,054.64$

Costo de Perdida de producción (CPP)

ANEXO D, CALCULO DE COSTOS DE MANTENIMIENTO POPUESTOS

Horas de trabajo en Zafra	3360
Horas de trabajo de datos	23520

Etiquetas de fila	Total horas de reparacion (h)	#FALLAS	MTTR	MTBF	MTBF Aumentado 17%	Ai	(1-Ai)	Tparada	Amejorada	(1-Am)	TParadaM
Actuadores neumáticos	131.57	8	16.45	2923.55	3420.56	0.994406	0.005594	18.80	0.995215	0.004785	16.08
Alimentación	8.30	5	1.66	4702.34	5501.74	0.999647	0.000353	1.19	0.999698	0.000302	1.01
Arado	12.97	4	3.24	5876.76	6875.81	0.999449	0.000551	1.85	0.999529	0.000471	1.58
Cuerpo	3.00	2	1.50	11758.50	13757.45	0.999872	0.000128	0.43	0.999891	0.000109	0.37
Descargador	10.58	3	3.53	7836.47	9168.67	0.999550	0.000450	1.51	0.999615	0.000385	1.29
Eje	0.50	1	0.50	23519.50	27517.82	0.999979	0.000021	0.07	0.999982	0.000018	0.06
Frenos	4.00	1	4.00	23516.00	27513.72	0.999830	0.000170	0.57	0.999855	0.000145	0.49
Mangueras	3.23	3	1.08	7838.92	9171.54	0.999863	0.000137	0.46	0.999883	0.000117	0.39
Palpador de arado	3.92	3	1.31	7838.69	9171.27	0.999833	0.000167	0.56	0.999858	0.000142	0.48
Sensores	16.52	4	4.13	5875.87	6874.77	0.999298	0.000702	2.36	0.999400	0.000600	2.02
Sistema freno	1.00	1	1.00	23519.00	27517.23	0.999957	0.000043	0.14	0.999964	0.000036	0.12
Tarjetas electrónicas	5.63	2	2.82	11757.18	13755.90	0.999760	0.000240	0.80	0.999795	0.000205	0.69
Telas	12.07	5	2.41	4701.59	5500.86	0.999487	0.000513	1.72	0.999561	0.000439	1.47
Válvula goteo	0.00	1	0.00	23520.00	27518.40	1.000000	0.000000	0.00	1.000000	0.000000	0.00
Válvulas	2.60	2	1.30	11758.70	13757.68	0.999889	0.000111	0.37	0.999906	0.000094	0.32
Válvulas automáticas	35.58	17	2.09	1381.44	1616.28	0.998487	0.001513	5.08	0.998707	0.001293	4.35
Ventilador	4.75	1	4.75	23515.25	27512.84	0.999798	0.000202	0.68	0.999827	0.000173	0.58
Total											31.30

$$MTTR = \frac{\text{Total horas de reparacion}}{\# \text{ fallas}}$$

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

$$A_m = \frac{MTBF \text{ Aumentado}}{MTBF \text{ Aumentado} + MTTR}$$

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total disponible de datos} - \text{Tiempo de inactividadparacion}}{\# \text{ fallas}}$$

$$T_p = (1 - A_i) \times \text{Tiempo total disponible en zafra} \quad T_{pm} = (1 - A_m) \times \text{Tiempo total disponible en zafra}$$

Tiempo mejorado invertido por equipo de trabajo OT

Puesto	Costo por hora	Supervision (hr)	OT (hr)	Tiempo (hrs)	Costo
Jefe Mantenimiento	\$ 17.04	106		106	\$ 1,798.91
Responsable de Centrifugas	\$ 7.68	528		528	\$ 4,054.80
Mecanico Centrifugas	\$ 4.61		31	31	\$ 144.22
Ayudante mecanico permanente	\$ 3.07		31	31	\$ 96.14
Ayudante mecanico eventual	\$ 2.44		31	31	\$ 76.47
Total				727	\$ 6,170.54

$$CMO_P = CHS + CHCM$$

Donde:

$$CHS = \text{Costo Horas de Supervision}$$

$$CHCM = \text{Costo Horas en Mantenimiento Correctivo}$$

Costos de Mano de Obra Propuestos (CMO_P)

Codigo de e	Nombre de equipo	2020	2021	2022	2023	2024	Total general
700132	CENTRIFUGA 1 DE PRIMERA-BATCH	\$ 1,431.44	\$ 4,376.85	\$ 6,293.58	\$ 2,507.99	\$ 2,434.62	\$ 17,044.48
700133	CENTRIFUGA 2 DE PRIMERA-BATCH	\$ 855.64	\$ 4,457.76	\$ 5,188.10	\$ 1,803.93	\$ 4,658.15	\$ 16,963.58
700134	CENTRIFUGA 3 DE PRIMERA-BATCH	\$ 2,109.66	\$ 3,441.56	\$ 10,202.14	\$ 3,193.54	\$ 5,204.65	\$ 24,151.55
700137	CENTRIFUGA 4 DE PRIMERA-BATCH		\$ 7,399.44	\$ 8,866.18	\$ 4,297.62	\$ 3,160.81	\$ 23,724.05
700136	CENTRIFUGA 5 DE PRIMERA-BATCH	\$ 984.89	\$ 6,532.56	\$ 2,352.66	\$ 3,590.52	\$ 2,846.49	\$ 16,307.12
700135	CENTRIFUGA 4 DE PRIMERA-BATCH	\$ 15,051.57	\$ 2,348.92				\$ 17,400.49
1002232	SISTEMA CENTRIFUGA 6 PRIMERA-BATCH			\$ 280.76	\$ 1,821.91	\$ 622.64	\$ 2,725.31
700138	CENTRIFUGA 7 DE PRIMERA-BATCH	\$ 19,870.86	\$ 7,346.42	\$ 11,540.64	\$ 7,860.59	\$ 2,371.33	\$ 48,989.84
Total general		\$ 40,304.06	\$ 35,903.51	\$ 44,724.06	\$ 25,076.10	\$ 21,298.69	\$ 167,306.42

$$\%de\ reduccion = \frac{Tiempos\ de\ CM\ actual - Tiempos\ de\ CM\ propuesto}{Tiempo\ de\ CM\ actual} = \frac{36.6 - 31.3}{36.6} = 14\%$$

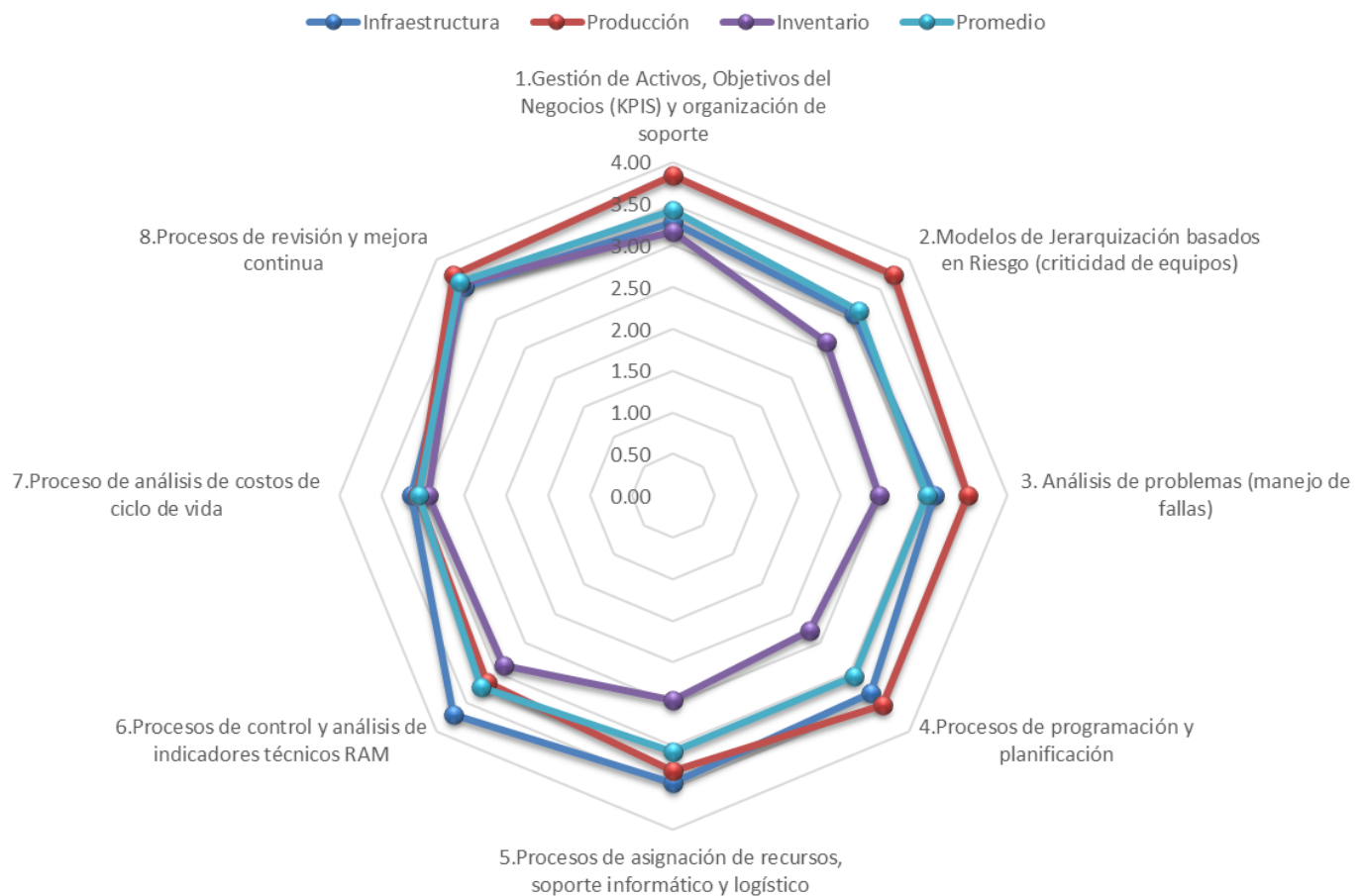
$$CMC = \frac{\bar{X}(Consumo, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024)}{\# de activos} \times 2 \times (1 - 0.14) = \frac{\$33,461.28}{7} \times 2 \times 0.86 = \$8,221.92$$

Costo de Materiales y Consumibles Propuesto (CMC_p)

ANEXO E, AUDITORIA AMORMS

Los resultados de la auditoria realizada al personal del ingenio nos brinda una imagen clara de la situación actual de la empresa, lo que permite una valoración objetiva y focalizada de la misma, de las necesidades de mejora que esta posee. Para obtener un dato mas real se paso la encuesta al área de Infraestructura, Producción y Almacén. Analizando un promedio de estas áreas el dato es de 3.21 que es un proceso estándar promedio empezando con muy buenas prácticas. A continuación, se presenta la tabla y el diagrama tipo radar resultado de la encuesta:

#	Categoría	Infraestructura	Producción	Inventario	Promedio
1	1.Gestión de Activos, Objetivos del	3.28	3.84	3.16	3.43
2	2.Modelos de Jerarquización basados	3.07	3.73	2.60	3.13
3	3. Análisis de problemas (manejo de	3.13	3.53	2.47	3.04
4	4.Procesos de programación y	3.35	3.55	2.30	3.07
5	5.Procesos de asignación de recursos,	3.45	3.30	2.45	3.07
6	6.Procesos de control y análisis de	3.72	3.16	2.88	3.25
7	7.Proceso de análisis de costos de	3.13	3.07	2.93	3.04
8	8.Procesos de revisión y mejora	3.53	3.73	3.60	3.62
Nota		3.33	3.49	2.80	3.21

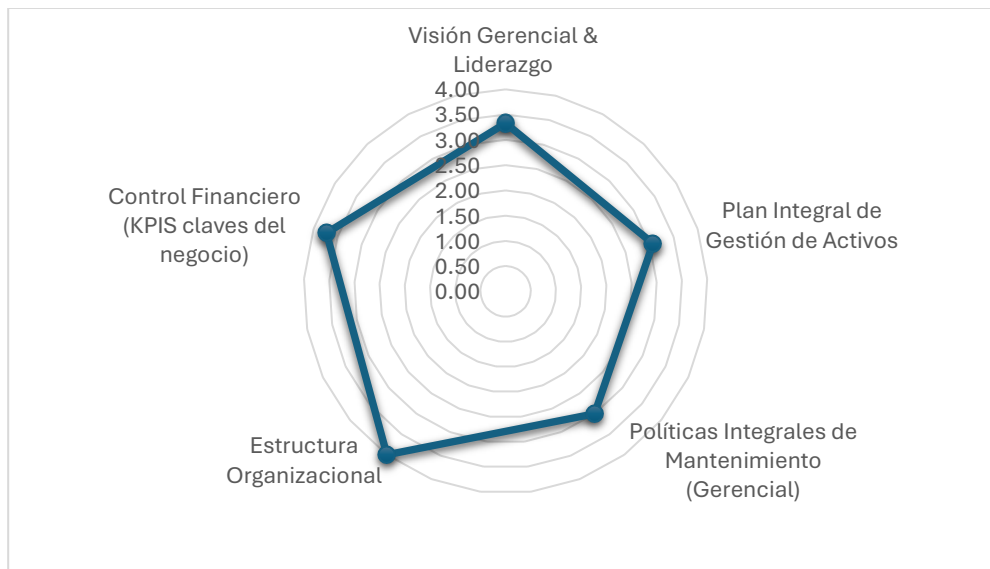


El resultado general del ingenio con las preguntas fue:

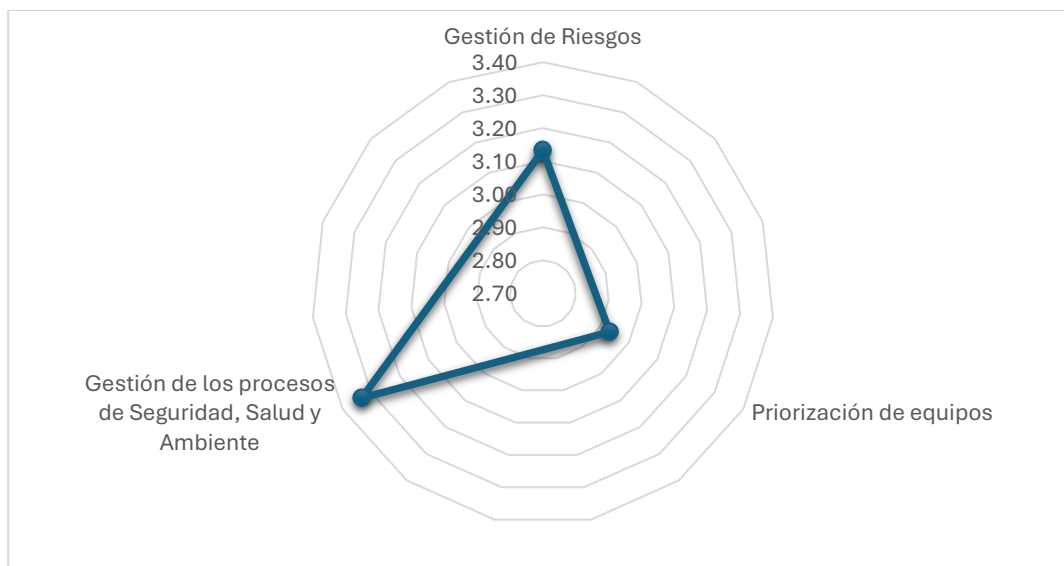
- Proceso muy deficiente 0.4%
- Proceso debajo del promedio 18.2%
- Proceso estándar promedio 47.3%
- Proceso con muy buenas prácticas 27.3%
- Proceso a nivel de clase mundial 6.8%

A continuación, se muestra los resultados promedio de las tres áreas en cada categoría:

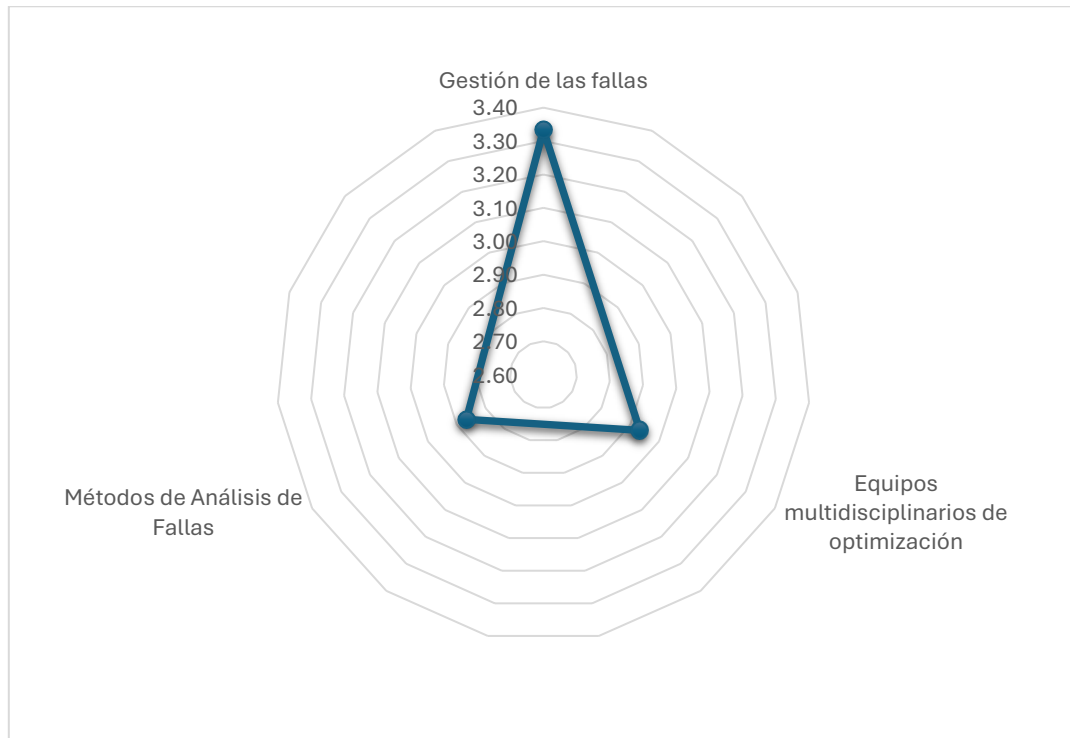
Gestión de Activos, Objetivos del Negocio (KPIS) y Organización de Soporte



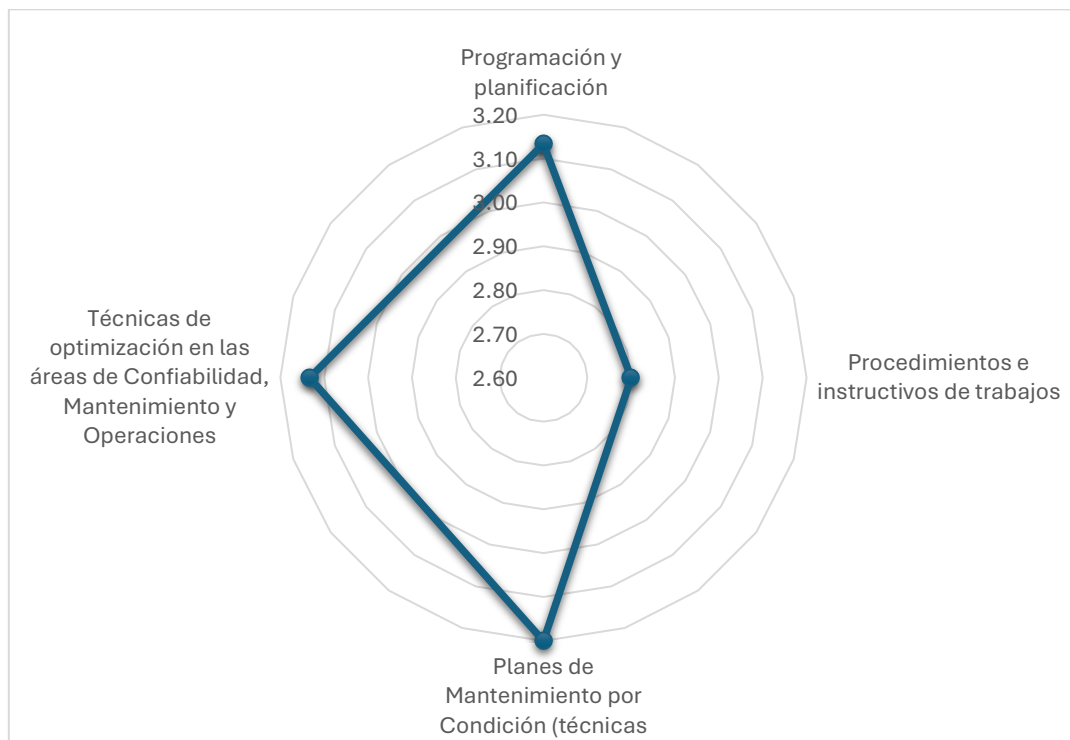
Modelos de Jerarquización basados en Riesgo (Críticidad de Activos)



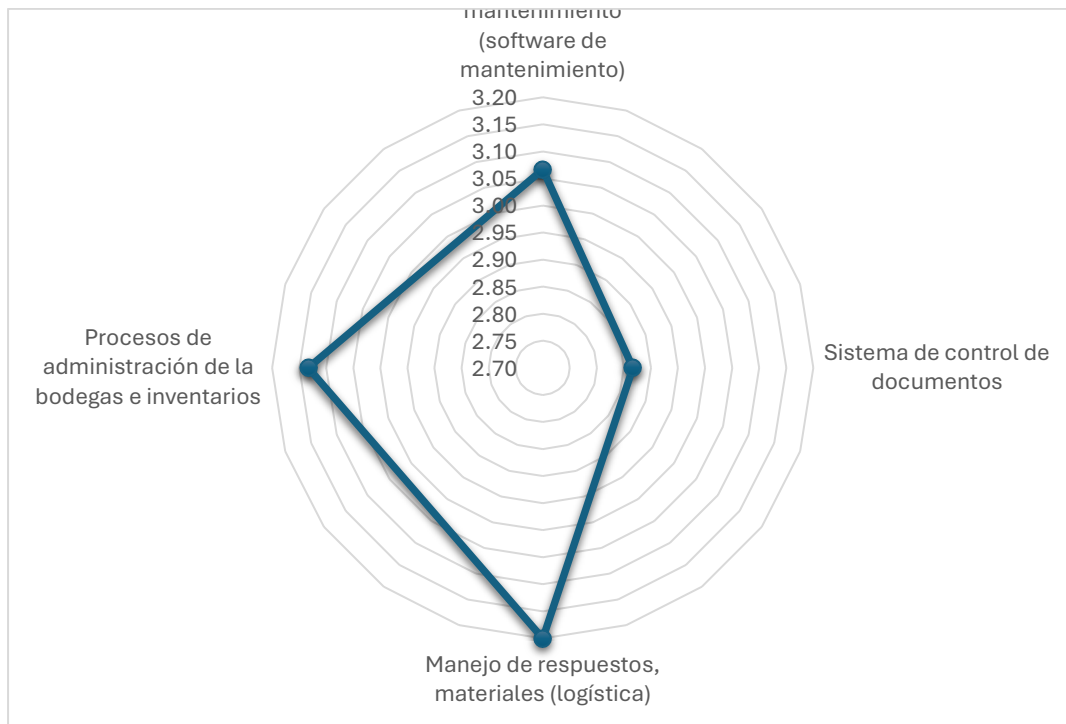
Proceso de Análisis de Problemas (Análisis de Causa Raíz)



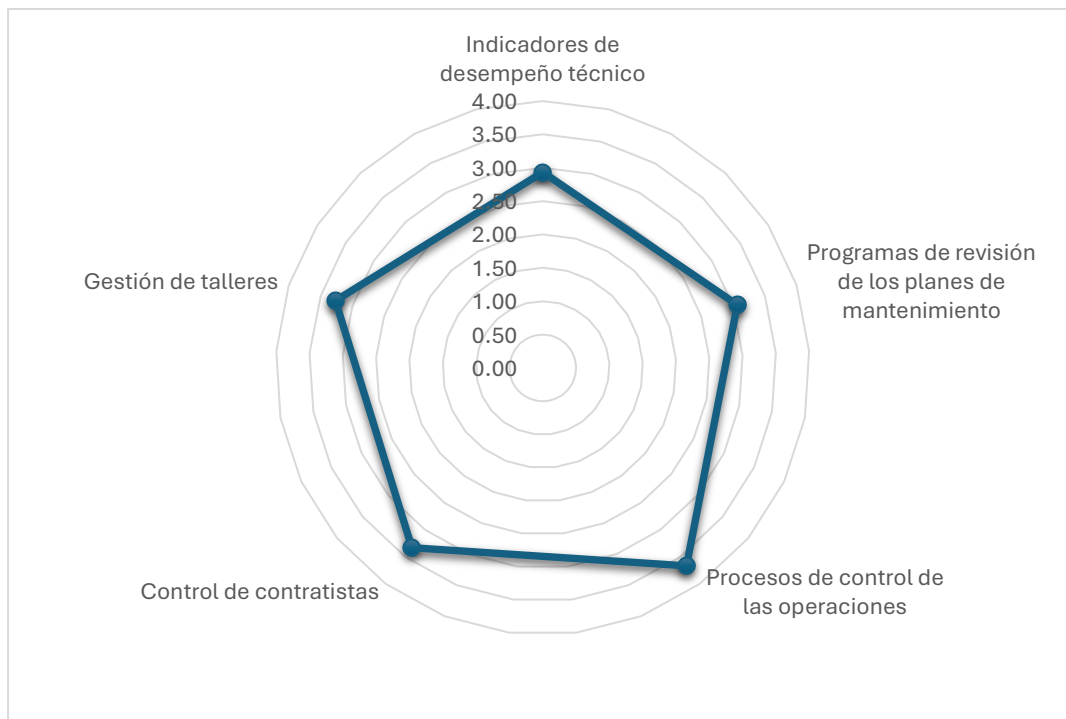
Procesos de programación, planificación y optimización de planes de mantenimiento, inspección y operaciones



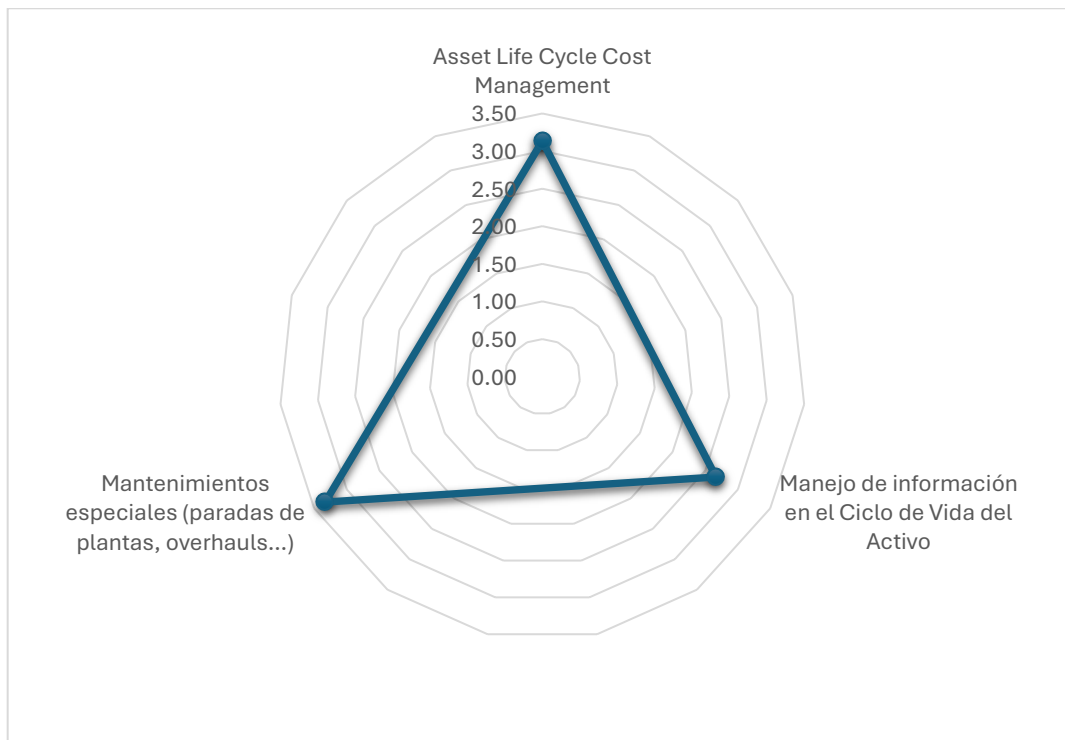
Procesos de asignación de recursos, soporte informático y soporte logístico a los procesos de Mantenimiento y Confiabilidad



Procesos de control y análisis de indicadores técnicos del negocio (RAM)



Procesos de Análisis de Costos de Ciclo de Vida



Proceso de revisión y mejora continua

