

**UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA JOSÉ SIMEÓN CAÑAS
UNIVERSIDAD DON BOSCO**



**“DESARROLLO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD
EN LA INDUSTRIA TEXTIL DE MANUFACTURA SALVADOREÑA”**

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

Y

FACULTAD DE INGENIERÍA UDB

PARA OPTAR AL GRADO DE:

MAESTRO EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES:

AMAYA SOTO, EDGARD ARMANDO JOSÉ

ORELLANA VARGAS, FERMIN JOSÉ

OSORIO ALVARADO, RODRIGO ALEXANDER

ASESOR:

ISMAEL SÁNCHEZ

Noviembre 2022

ANTIGUO CUSCATLÁN, EL SALVADOR, C.A.

Rectores

Andreu Oliva de la Esperanza, S.J.
Mario Rafael Olmos Argueta, SDB.

Secretarias Generales

Silvia Elinor Azucena de Fernández
Yesenia Xiomara Martínez Oviedo

Decana de Postgrados Uca

Nelly Arely Chévez Reynosa

Decano de Postgrado UDB

Mario Guillermo Juárez Pérez

Directores de la Maestría en Ciencias Sociales

Diana Carolina Cruz UCA
José Luis Martínez UDB

Director de Tesis

Ismael Sánchez

INTRODUCCION

El presente trabajo propone un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad, siendo este aplicado a una industria de manufactura textil en El Salvador. El alcance de este estudio incluye la valoración de la importancia de la industria textil para la economía salvadoreña y con ello dar el realce que merece la adecuada gestión del mantenimiento para cumplir con los objetivos del negocio en una industria tan importante para el sector económico. El estudio busca mejorar la continuidad operacional bajo un enfoque de eficiencia en el adecuado uso de los recursos. Específicamente el estudio se apoya en ciertas metodologías como lo son la criticidad de equipos basada en riesgos y el mantenimiento centrado en confiabilidad.

Por lo anterior, la gestión del mantenimiento toma un rol importante debido a que a través de ella se establecen las mejores estrategias acorde a la naturaleza de la organización y objetivos de negocio, buscando determinar la estrategia más adecuada para la disponibilidad y confiabilidad de los equipos de la planta textil manufacturera.

Inicialmente, para el capítulo uno se ha tomado en cuenta describir los antecedentes de la cuestión en estudio y plantear una justificación en línea a la propuesta del plan de mantenimiento basado en confiabilidad estableciendo objetivos claros y precisos para este trabajo.

En el desarrollo del capítulo dos se pretende dar información en el marco teórico acerca del contexto de la organización, detallando la vinculación de los demás departamentos con el área de mantenimiento, la gestión actual del mantenimiento en la planta, equipos, así como la explicación del proceso productivo textil.

Para el capítulo tres se describe las diferentes metodologías a aplicar, herramientas y análisis que aportan valor para obtener resultados más precisos para proponer un plan de mantenimiento basado en confiabilidad. La presentación de los resultados se explica en el capítulo cuatro, mostrando un análisis económico según los análisis de modo de falla a detectar la estrategia a seguir.

Una vez propuesto la estrategia a seguir luego de la implementación de la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad, apoyándose de las diferentes herramientas de análisis se procede a generar las conclusiones y recomendaciones pertinentes con el objetivo de sugerir mejoras notorias en la gestión del mantenimiento actual para la planta textil manufacturera sometida al estudio.

INDICE

INTRODUCCION.....	i
1. CAPITULO I: Antecedentes.....	1
1.1 Planteamiento del problema	5
1.2 Justificación de la investigación	6
1.3 Objetivos de la investigación.....	8
Objetivo general.....	8
Objetivos específicos.....	8
2. CAPITULO II: Marco teórico.....	9
2.1 Descripción de la empresa	9
2.2 Descripción de la gestión del mantenimiento actual.....	11
2.2.1 Organigrama de mantenimiento.....	11
2.2.2 Vinculación con otros departamentos	11
2.2.3 Documentación y su relación con el sistema GMAO (Gestión de Mantenimiento Asistida por Ordenador).....	12
2.2.4 Indicadores de mantenimiento	13
2.2.5 Planificación del mantenimiento	14
2.2.6 Gestión de equipos.....	14
2.2.7 Gestión de inventario.....	15
2.3 Descripción del proceso productivo.....	15
2.3.1 Recepción y almacenaje	15
2.3.2 Manufactura.....	16
2.3.3 Exportación	17
2.4 Descripción de equipos	17
2.4.1 Equipos del área de exportación.....	17
2.4.2 Equipos de aire comprimido	20
2.4.3 Equipos de suministro y distribución eléctrica	23
2.4.4 Equipos de suministro de energía eléctrica de respaldo	29
2.4.5 Equipos de Aire Acondicionado.....	31
2.4.6 Equipos contra incendio.....	34

2.4.7	Equipos de recepción y almacenaje	34
3.	CAPITULO III: Metodología.....	39
3.1	Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)	39
3.1.1	Jerarquización de activos	40
3.1.2	Criticidad basada en la matriz de riesgo	41
3.1.3	Contexto operacional	44
3.1.4	Análisis de modos y efectos de fallas AMEF.....	44
3.1.5	Procesos de selección de estrategias.....	46
3.1.6	Análisis del riesgo económico	47
4.	CAPITULO IV: Presentación y análisis de resultados	49
4.1.1	Árbol jerárquico de equipos.....	49
4.1.2	Análisis de criticidad basada en matriz de riesgo.....	50
4.1.3	Análisis del contexto operacional	53
4.1.4	Implementación del análisis de modos y efectos de fallas (AMEF)	61
5.	CAPITULO V: Conclusiones y recomendaciones.....	65
5.1	Conclusiones.....	65
5.2	Recomendaciones	66
6.	BIBLIOGRAFIA	67
	Libros.....	67
	Trabajos de graduación.....	67
	Sitios Web.....	67
	Presentaciones	67
	ANEXOS	68
	ANEXO A: Cálculo del impacto a la producción.....	68
	ANEXO B: Árbol jerárquico de equipos	69
	ANEXO C: Modos y efectos de falla.....	74
	ANEXO D: Cálculos de riesgo actual.	76
	ANEXO E: Actividades de mantenimiento propuestas.....	77
	ANEXO F: Comparación de riesgos y decisión.....	79
	ANEXO G: Plan óptimo de mantenimiento.	80

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Participación porcentual promedio acumulado desde 2010 a 2021 en las exportaciones según el Sistema Arancelario Centroamericano (SAC).	1
Figura 2. Participación de los sectores del SAC en las exportaciones anuales (Años 2010 – 2021). ..	2
Figura 3. Organigrama general de la empresa.	10
Figura 4. Organigrama del departamento de mantenimiento.....	11
Figura 5. Vinculación del área de Mantenimiento con otros departamentos.	12
Figura 6. Paletizadora semiautomática para embalaje de tarimas.....	18
Figura 7. Pallet Jack o paleta de carga para transporte de material.....	19
Figura 8. Montacargas de aduana “double reach” o de doble alcance.	19
Figura 9. Montacarga para exportación con accesorio “push-pull” o empuje y agarre.	20
Figura 10. Esquema de conexión de equipos de aire comprimido.	22
Figura 11. Diagrama unifilar subestación 1.	26
Figura 12. Diagrama unifilar de subestación 2.....	27
Figura 13. Sistema de Refrigeración.....	31
Figura 14. Distribución de Unidades Manejadoras de Aire (UMA) en el piso de producción	32
Figura 15. “Pallet Jack” del área de recepción y bodega.	35
Figura 16. Montacargas de descarga con accesorio de pinza o “clamp”.....	35
Figura 17. Montacarga de servicio con accesorio paletas fijas.....	36
Figura 18. Montacarga de bodega.	37
Figura 19. Cambiador de baterías.	37
Figura 20. Cargador de baterías para montacargas eléctricos.....	38
Figura 21. Fases de implementación de RCM	39
Figura 22. Pirámide taxonómica de la clasificación de los activos.....	40
Figura 23. Matriz de criticidad	43
Figura 24. Esquema de Entrada-Proceso-Salida.....	44
Figura 25. Lógica de la selección de estrategias de Mantenimiento: enfoque RCM	46
Figura 26. Flujograma de toma de decisiones entre plan optimo y riesgo económico.	48
Figura 27. Ejemplo de propuesta de árbol jerárquico.	50
Figura 28. Gráfico de pastel para el porcentaje de subsistemas según criticidad.....	52
Figura 29. Subsistemas de mayor a menor criticidad.	52
Figura 30. Diagrama Entrada Proceso Salida: Sistema de Enfriamiento.....	54

INDICE DE TABLAS

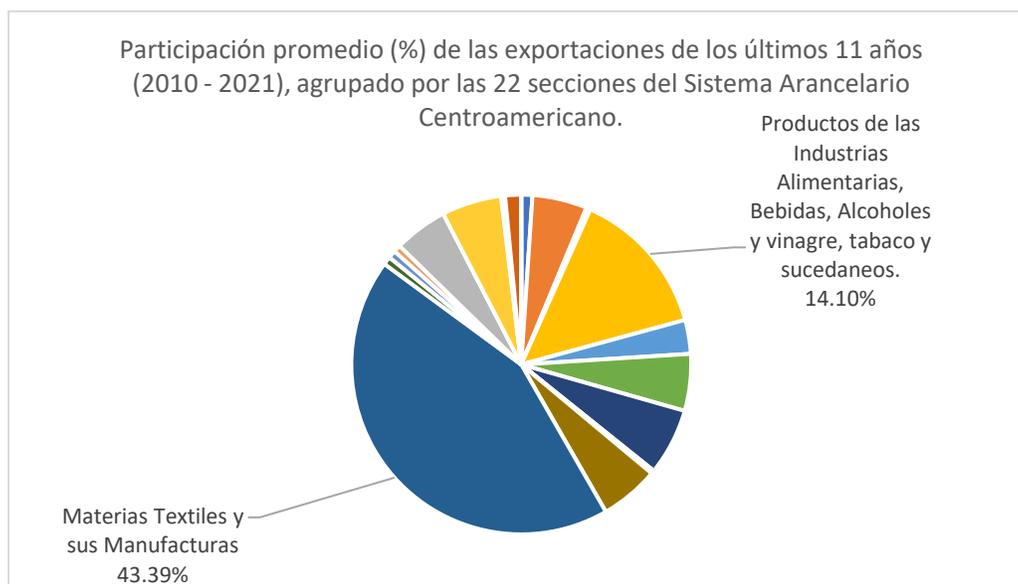
Tabla 1. Secciones del Sistema Arancelario Centroamericano (SAC).....	3
<i>Tabla 2. Diez mejores exportadores de prendas de vestir hacia los Estados Unidos de América.</i>	<i>4</i>
Tabla 3. Indicadores de mantenimiento	13
Tabla 4. Información técnica de compresores.....	21
Tabla 5. Información técnica de los secadores.	23
Tabla 6. Cuadro de carga de transformadores tipo “Padmounted” y tableros generales.....	28
Tabla 7. Cuadro de carga de transformadores secos.....	29
Tabla 8. Características técnicas de las plantas de emergencia.....	30
Tabla 9. Cuadro de carga general con plantas de emergencia.	30
Tabla 10. Características técnicas de las unidades manejadores de aire.	32
Tabla 11. Tabla ejemplo de consecuencia.....	43
Tabla 12. Ejemplo de AMEF.....	46
Tabla 13. Matriz de criticidad basada en riesgo aplicada a los subsistemas.	51
Tabla 14. Cantidad de subsistemas de acuerdo a su criticidad.....	51
Tabla 15. Fase del funcionamiento del subsistema Chiller.	55
Tabla 16. Fase del funcionamiento del subsistema Torre de enfriamiento.....	57
Tabla 17. Fase del funcionamiento del subsistema Bombeo Chiller.	58
Tabla 18. Fase del funcionamiento del subsistema Bombeo Torre.	59
Tabla 19. Fase del funcionamiento del subsistema Tratamiento de agua.....	60
Tabla 20. Fase del funcionamiento del subsistema Unidades manejadoras de aire.	61
Tabla 21. Modos y efectos de falla.....	62
Tabla 22. Cálculos de riesgo actual.	62
Tabla 23. Actividades de mantenimiento propuestas.	63
Tabla 24. Comparación de riesgos y decisión.	63
Tabla 25. Plan óptimo de mantenimiento.	64
Tabla 26. Resumen económico de la aplicación de la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad.....	64

1. CAPITULO I: Antecedentes

La industria textil salvadoreña se ha caracterizado por ser uno de los sectores manufactureros más importantes en el país, según datos del Banco Central de Reserva, desde 2010 el sector denominado por el Sistema Arancelario Centroamericano como “Materias Textiles y sus Manufacturas” ha representado en términos generales el 40% de las exportaciones del país.

El sector textil y de confección salvadoreño comprende uno de los mayores generadores de divisas para el país, siendo uno de los sectores principales de exportación, dinamizando la economía salvadoreña. Según datos de PROESA, El Salvador se ubica en el décimo lugar como proveedor de productos de la confección para los Estados Unidos de América y es el tercero de Latinoamérica.

A continuación, se presenta un gráfico del promedio acumulado de las exportaciones de 2010 a 2021, agrupado por las 22 secciones del Sistema Arancelario Centroamericano, de lo cual podemos notar el evidente aporte a las exportaciones que se tiene desde el Sector Textil Salvadoreño.



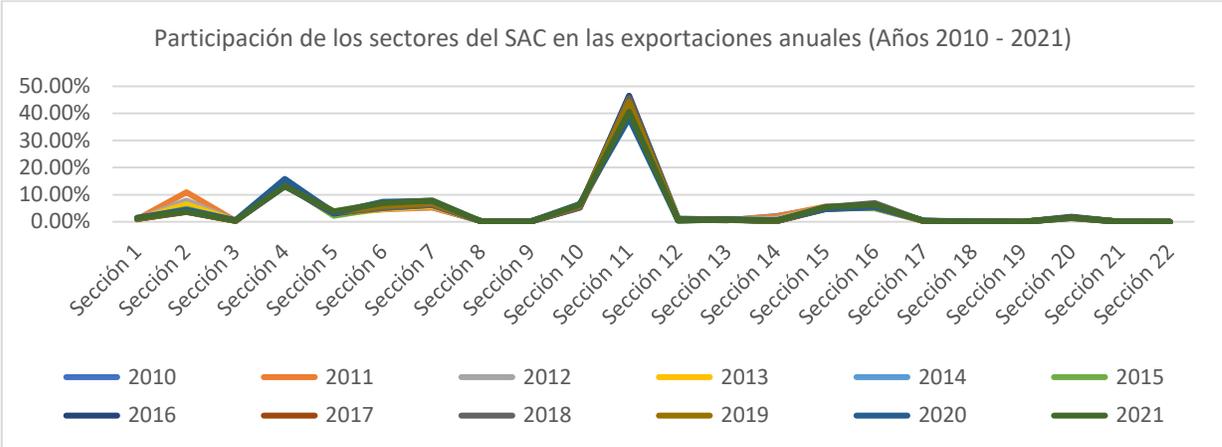
Fuente: Elaboración propia con base de datos Banco Central de Reserva de El Salvador 2010 – 2021.

Figura 1. Participación porcentual promedio acumulado desde 2010 a 2021 en las exportaciones según el Sistema Arancelario Centroamericano (SAC).

Tal como se muestra en la Figura 1, podemos afirmar que el sector textil es el pilar más fuerte a nivel de exportaciones para El Salvador, pues representa más del 40% de la actividad de exportaciones, seguido únicamente por el sector de la industria alimentaria con un 14%, siendo los demás sectores del SAC marginales al compararlos con el sector textil y su manufactura.

Así mismo, si damos una trazabilidad del impacto que ha tenido el sector textil en las exportaciones de El Salvador a lo largo de la última década podremos encontrar que, de manera sistemática y constante, el sector textil ha sido el sector que más ha aportado, porcentualmente hablando, a los ingresos por exportaciones a nuestro país, la tendencia es clara en la Figura 2 mostrada a

continuación. El sector textil y sus manufacturas corresponden a la sección 11 y el orden del aporte de este sector es de alrededor del 40% en todos los años desde 2010 a la fecha.



Fuente: Elaboración propia con base de datos Banco Central de Reserva de El Salvador 2010 – 2021.

Nota: Ver detalle de las secciones del SAC en Tabla 1.

Figura 2. Participación de los sectores del SAC en las exportaciones anuales (Años 2010 – 2021).

Tabla 1. Secciones del Sistema Arancelario Centroamericano (SAC)

SECCION I - ANIMALES VIVOS Y PRODUCTOS DEL REINO ANIMAL	SECCION XII - CALZADO, SOMBREROS Y DEMAS TOCADOS, PARAGUAS, QUITASOLES, BASTONES, LATIGOS, FUSTAS, Y SUS PARTES; PLUMAS PREPARADAS Y ARTICULOS DE PLUMAS; FLORES ARTIFICIALES; MANUFACTURAS DE CABELLO
SECCION II - PRODUCTOS DEL REINO VEGETAL	SECCION XIII - MANUFACTURAS DE PIEDRA, YESO FRAGUABLE, CEMENTO, AMIANTO (ASBESTO), MICA O MATERIAS ANALOGAS; PRODUCTOS CERAMICOS; VIDRIO Y SUS MANUFACTURAS
SECCION III - GRASAS Y ACEITES ANIMALES O VEGETALES; PRODUCTOS DE SU DESDOBLAMIENTO; GRASAS ALIMENTICIAS ELABORADAS; CERAS DE ORIGEN ANIMAL O VEGETAL	SECCION XIV - PERLAS FINAS (NATURALES) O CULTIVADAS, PIEDRAS PRECIOSAS O SEMIPRECIOSAS, METALES PRECIOSOS, CHAPADOS DE METAL PRECIOSO (PLAQUE) Y MANUFACTURAS DE ESTAS MATERIAS; BISUTERIA; MONEDAS
SECCION IV - PRODUCTOS DE LAS INDUSTRIAS ALIMENTARIAS; BEBIDAS, LIQUIDOS ALCOHOLICOS Y VINAGRE; TABACO Y SUCEDANEOS DEL TABACO, ELABORADOS	SECCION XV - METALES COMUNES Y SUS MANUFACTURAS
SECCION V - PRODUCTOS MINERALES	SECCION XVI - MAQUINAS Y APARATOS, MATERIAL ELECTRICO Y SUS PARTES; APARATOS DE GRABACION O REPRODUCCION DE SONIDO, APARATOS DE GRABACION O REPRODUCCION DE IMAGEN Y SONIDO EN TELEVISION, Y LAS PARTES Y ACCESORIOS DE ESTOS APARATOS
SECCION VI - PRODUCTOS DE LAS INDUSTRIAS QUIMICAS O DE LAS INDUSTRIAS CONEXAS	SECCION XVII - MATERIAL DE TRANSPORTE
SECCION VII - PLASTICO Y SUS MANUFACTURAS; CAUCHO Y SUS MANUFACTURAS	SECCION XVIII - INSTRUMENTOS Y APARATOS DE OPTICA, FOTOGRAFIA O CINEMATOGRAFIA, DE MEDIDA, CONTROL O PRECISION; INSTRUMENTOS Y APARATOS MEDICOQUIRURGICOS; APARATOS DE RELOJERIA; INSTRUMENTOS MUSICALES; PARTES Y ACCESORIOS DE ESTOS INSTRUMENTOS O APARATOS
SECCION VIII - PIELES, CUEROS, PELETERIA Y MANUFACTURAS DE ESTAS MATERIAS; ARTICULOS DE TALABARTERIA O GUARNICIONERIA; ARTICULOS DE VIAJE, BOLSOS DE MANO (CARTERAS) Y CONTINENTES SIMILARES; MANUFACTURAS DE TRIPA	SECCION XIX - ARMAS, MUNICIONES, Y SUS PARTES Y ACCESORIOS
SECCION IX - MADERA, CARBON VEGETAL Y MANUFACTURAS DE MADERA; CORCHO Y SUS MANUFACTURAS; MANUFACTURAS DE ESPARTERIA O CESTERIA	SECCION XX - MERCANCIAS Y PRODUCTOS DIVERSOS
SECCION X - PASTA DE MADERA O DE LAS DEMAS MATERIAS FIBROSAS CELULOSICAS; PAPEL O CARTON PARA RECICLAR (DESPERDICIOS Y DESECHOS); PAPEL O CARTON Y SUS APLICACIONES	SECCION XXI - OBJETOS DE ARTE O COLECCION Y ANTIGUEDADES
SECCION XI - MATERIAS TEXTILES Y SUS MANUFACTURAS	SECCION XXII - RESERVADA PARA USOS PARTICULARES DEL PAIS

A nivel internacional la Oficina de Textiles y Prendas de Vestir (OTEXA), la cual trabaja de la mano con el Departamento de Comercio de los Estados Unidos de América para fomentar la sana competitividad de los países del mundo enfocada al comercio de Textiles hacia los Estados Unidos, reporta a El Salvador como 1 de los 10 mejores países que exportan sus textiles hacia los Estados Unidos.

Tabla 2. Diez mejores exportadores de prendas de vestir hacia los Estados Unidos de América.

DIEZ MEJORES EXPORTADORES DE PRENDAS DE VESTIR A EEUU					
		Año 2020	Año 2021	Crecimiento anual	Crecimiento anual (%)
1	China	\$ 14,068	\$ 17,906	\$ 3,839	27.29%
2	Vietnam	\$ 11,710	\$ 13,201	\$ 1,491	12.73%
3	Bangladesh	\$ 4,867	\$ 6,360	\$ 1,493	30.68%
4	Cambodia	\$ 2,610	\$ 3,129	\$ 518	19.86%
5	India	\$ 2,818	\$ 3,817	\$ 1,000	35.47%
6	Indonesia	\$ 3,308	\$ 3,774	\$ 467	14.11%
7	Pakistán	\$ 1,258	\$ 2,005	\$ 746	59.30%
8	Honduras	\$ 1,646	\$ 2,421	\$ 775	47.10%
9	México	\$ 2,005	\$ 2,600	\$ 595	29.67%
10	El Salvador	\$ 1,143	\$ 1,629	\$ 487	42.57%
	Resto del mundo	\$ 59,230	\$ 74,289	\$ 15,060	25.43%
Datos en Millones de dólares					

Fuente: Elaboración propia con base de datos OTEXA 2022.

A manera de síntesis, encontramos mucho valor en la industria textil salvadoreña, siendo el sector industrial de mayor peso a nivel nacional si nos referimos a las exportaciones que generamos. La información recabada anteriormente nos da elementos de peso para dar sostén y justificación a este trabajo de graduación.

El objetivo que se persigue es proponer un plan de mantenimiento para una planta industrial típica del sector Textil – Manufacturero Salvadoreño y realizar una apuesta a formular un plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, habiendo aplicado metodologías de Criticidad de activos y el análisis de modos y efecto de fallas.

Para el caso, la empresa sujeta de nuestro estudio ha preferido mantenerse anónima a fin de no revelar información sensible de la compañía, sin embargo, podemos mencionar que se trata de una multinacional y es una organización con más de 25 años en el país, brinda empleos directos e indirectos a más de 9,000 personas a nivel de país y es un alto referente en exportación y calidad. Dedicada a la confección de prendas de vestir ubicada en el occidente de El Salvador con casa matriz en Estados Unidos, exporta el 80 % de su producción y el 20 % restante se comercializa a nivel nacional.

La empresa cuenta con varias naves industriales dedicadas al proceso fabril en donde se llevan a cabo las operaciones. La tasa de producción diaria de la planta objeto de estudio, es de un orden de

aproximadamente 600,000 prendas, por lo que la continuidad operacional de la organización es altamente requerida.

Para el alcance de los objetivos del negocio y los estándares de producción requeridos toma alta relevancia la disponibilidad de los sistemas críticos que están inmersos en los procesos operativos de la producción. Debido a esto, el departamento de mantenimiento se vuelve un pilar clave para estrategia de la organización, el cual tiene como principal finalidad es mantener la operatividad de los equipos involucrados en los diferentes procesos productivos que garantizan la manufactura demandada a la empresa, todo esto bajo el estándar de un entorno de seguridad y salud ocupacional para todos sus colaboradores, designando los recursos de manera eficiente y eficaz para lograr la labor de mantener en buenas condiciones operativas las distintas plantas.

En el presente trabajo se ha considerado el desarrollo de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) con aplicación enfocada a los sistemas más críticos para una empresa típica de la industria textil manufacturera, para lo cual ha sido indispensable realizar los análisis del nivel de criticidad de los diferentes sistemas presentes en la planta, así como también realizar los análisis de modo y efectos de fallas a los sistemas más críticos, para de esta manera, estudiar a fondo las características de las fallas y cómo afecta la disponibilidad de los equipos en estudio con la finalidad de proponer un plan de mantenimiento que optimice el uso de los recursos económicos en sus activos más críticos e importantes a fin de mantener los niveles de producción demandados.

La alternativa presentada en este trabajo se basa en la formulación de un plan de mantenimiento basado en confiabilidad para una empresa de esta naturaleza, ya que podría ayudar a alcanzar las exigencias de un mercado mundial que hoy en día es más exigente en calidad, tiempos de entrega y volúmenes de producción. En las naves industriales de esta empresa existe una considerable cantidad de equipos involucrados en los procesos productivos y necesarios para la operación del recurso humano por lo que se busca mantener la continuidad operacional mejorando la disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

1.1 Planteamiento del problema

La empresa del rubro textil manufacturero en estudio fue fundada en El Salvador hace casi 30 años, posee cinco naves industriales en las cuales desarrolla las actividades productivas que sus compradores demandan, la producción del complejo asciende alrededor de 37 millones de docenas de prendas por año. Con esta referencia podemos tener una idea de lo importante que es para la empresa el cumplimiento de las metas productivas del negocio.

Como contexto operacional de esta empresa encontramos que, si bien es cierto, existe una gestión de mantenimiento con prácticas rutinarias o sistemáticas, sin embargo, carecen de un análisis de fondo para determinar si la estrategia tomada es la mejor a seguir. Tómese en cuenta que dentro de la empresa existe una predisposición marcada hacia una gestión de mantenimiento meramente preventivo y rutinario, con miras hacia la reducción del gasto de mantenimiento.

Los equipos que intervienen en los procesos productivos de índole manufacturera son en primera línea las máquinas de costura, las cuales operan a través de los diversos sistemas de distribución de

energía eléctrica y de aire comprimido; existen otros aspectos de gran importancia como mantener climatizadas todas las áreas de la nave industrial en donde se lleva a cabo la producción, puesto que estamos tratando con grandes volúmenes de personal operando dentro una sola nave industrial de manera diaria. Otros sistemas relevantes son las subestaciones y la distribución eléctrica, sistemas contra incendio, plantas de emergencia, equipos para el alza, manejo y transporte de materia prima y producto terminado, maquinaria para bodegas de material prima y de despacho, entre otros.

Dentro de este mismo contexto encontramos una serie de fallas a través de los diversos sistemas mencionados anteriormente, desde fallas en equipos no críticos como en aquellos que son los más relevantes para la continuidad de la planta, siendo este el punto de partida para de nuestro estudio: proponer un plan de mantenimiento que optimice los recursos hacia los sistemas más importantes de la planta y promover y mantener la continuidad operacional.

El problema o situación que la compañía desea enfrentar son las prolongadas y frecuentes afectaciones a la producción debido a fallas, paradas de planta, altos tiempos para mantenimientos programados, a la vez que busca reducir costos en mantenimiento y optimizar los recursos que entrega a dicho departamento.

El presente trabajo propone un plan de mantenimiento apoyado en ciertas metodologías como lo son la criticidad de equipos basada en riesgo y el mantenimiento centrado en confiabilidad para dar respuesta a lo que busca tanto la empresa en estudio como las demás textiles manufactureras de nuestro país: reducción de fallas, incremento al tiempo productivo, sin dejar de lado la optimización de los recursos disponibles como horas hombre, costos de mano de obra, materiales y servicios de mantenimiento, en otras palabras, la consecución de las metas productivas del negocio.

1.2 Justificación de la investigación

En nuestro país aún existe una visión muy tradicional acerca de cómo ejercer la profesión del mantenimiento industrial, delimitando la gestión exclusivamente al preventivo sistemático o peor aún al correctivo a la falla, además de ver al Mantenimiento como un gasto y no como un pilar estratégico sobre el cual se puedan apoyar las empresas para darle una base sólida a sus procesos de producción o manufactura y con ello consolidar la estrategia del negocio. Lo anterior está presente en las diferentes industrias de El Salvador y la industria textil manufacturera no está exenta de ello.

Como se menciona en los antecedentes de este trabajo, se analizaron ciertos estadísticos, donde evidencia que gran parte de las exportaciones de El Salvador se debe a la industria Textil y su Manufactura.

A través del presente documento se busca aportar al sector textil manufacturero de El Salvador desde la Gestión de Mantenimiento Industrial; se elaborará una propuesta para la aplicación de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad, esta metodología será aplicada a los equipos críticos de la planta, aclarando que, primero se realizará un análisis acerca de la criticidad de los

equipos para poder realizar una clasificación entre ellos. Una vez esclarecida la clasificación de criticidad de equipos será factible decidir sobre cuáles de ellos podrán ser enfocados los recursos para mejorar la confiabilidad y disponibilidad de las unidades. Con la aplicación de lo anterior se logrará promover la continuidad operacional y evitar fallas catastróficas que afectan a la planta y su producción.

El mantenimiento basado en confiabilidad expone los puntos clave a los que se deben enfocar recursos y la mayor atención, evidenciando los modos de fallas y analizando los efectos sobre los diferentes equipos sujetos a esta estrategia. Es a través de esta metodología que se pretende dar una propuesta que disminuya las fallas y aumente la confiabilidad de manera general de los equipos que intervienen en los procesos productivos y que hacen posible tener una mejor rentabilidad e impacto en los objetivos estratégicos de negocio.

A manera de síntesis, a través del presente estudio, abordamos una propuesta de Plan de Mantenimiento en una planta textil manufacturera típica de El Salvador, con ello, estaremos aportando una muestra de cómo aplicar una metodología sistemática para la optimización de los recursos en este tipo de empresas del rubro textil, así como también con esta propuesta estaremos a la vez proponiendo pasos firmes hacia el profesionalismo de la gestión del Mantenimiento en nuestro país.

1.3 Objetivos de la investigación

Objetivo general

- Desarrollar un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para los sistemas críticos de una planta industrial del rubro textil manufacturera típica de El Salvador, a fin de incrementar la disponibilidad y la confiabilidad de los equipos y con esto promover la continuidad operacional de la planta y enfocar de manera óptima los recursos.

Objetivos específicos

- Elaborar el levantamiento del árbol general de activos para una Planta típica del rubro Textil manufacturero de El Salvador.
- Elaborar matriz de criticidad basado en riesgo para identificación de aquellos equipos más críticos del proceso.
- Analizar los modos y efectos de fallas para los sistemas críticos seleccionados.
- Proponer un Plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad con actividades específicas para los equipos de los sistemas críticos seleccionados.

2. CAPITULO II: Marco teórico

2.1 Descripción de la empresa

La empresa tomada como objeto de estudio corresponde al rubro textil manufacturero, se dedica a la confección, empaque y exportación de prendas de vestir. Dicha empresa está ubicada en una de las zonas francas más grandes de El Salvador.

La casa matriz de esta empresa se encuentra radicada en Estados Unidos, por lo que principalmente el destino de su producción es dicho país. Se destina el 80% de la producción a la exportación y sólo un 20% se comercializa a nivel nacional.

A nivel de Capital Humano se cuenta con aproximadamente 4,500 empleados directos y 1300 empleos indirectos.

Para suplir la demanda se cuenta con una producción diaria de alrededor de 600,000 de prendas aproximadamente.

El régimen operacional de la compañía es de tipo diurno exclusivamente, bajo un horario de 44 horas semanales, con opción eventualmente para realización de horas extras, sin embargo, estas son exclusivamente destinadas para Producción de prendas y no para el mantenimiento de equipos o instalaciones.

La organización en estudio presenta una estructura de jerarquía del tipo “modelo céntrico”, donde la estructura de Mantenimiento reporta a un director de Planta y se encuentra al mismo nivel jerárquico que Producción e Ingeniería. Este modelo proporciona un enfoque equilibrado ya que las necesidades y preocupaciones de cada una de las tres gerencias son sopesadas por igual por un director de Planta.

En la Figura 3 se muestra la estructura del Departamento de Mantenimiento inmerso en la estructura de una Dirección de Planta que es responsable de manera global de todas las operaciones del Plantel Industrial, esto involucra otras áreas de apoyo como lo son recursos humanos, finanzas y logística.

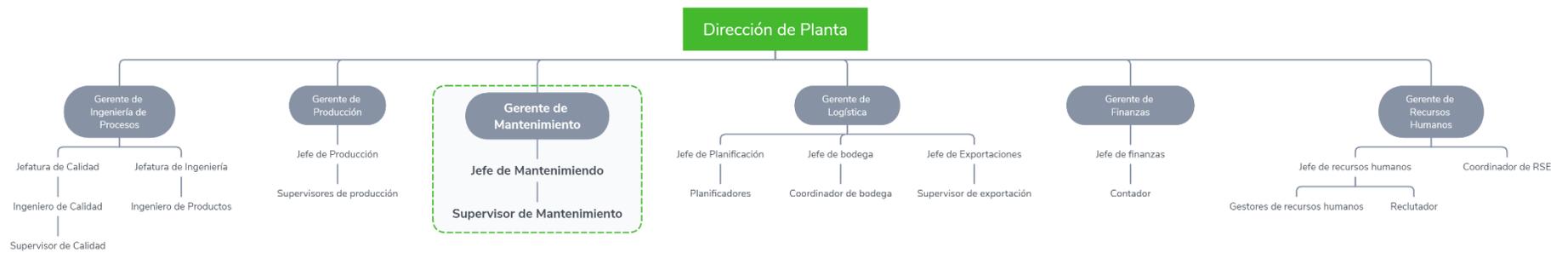


Figura 3. Organigrama general de la empresa.

2.2 Descripción de la gestión del mantenimiento actual

La gestión actual del mantenimiento en la empresa en estudio se basa en prácticas sistemáticas y reactivas, llevando consigo gastos operativos que la empresa percibe como considerables y en ocasiones reaccionan a la necesidad de buscar replantear estrategias para mantener en condiciones de operación los equipos y maquinaria de la planta. En términos generales, la compañía en estudio ha caído en una gestión reactiva donde el día a día es solventar las fallas que van aconteciendo.

2.2.1 Organigrama de mantenimiento

El organigrama del área de mantenimiento se puede observar en la Figura 4, este departamento está compuesto por un jefe del área a quien responde el supervisor de Mantenimiento y los encargados de bodega de materiales y repuestos, así como también el encargado del módulo de mantenimiento en el ERP, a cada uno de estos perfiles les responden una serie de técnicos, auxiliares y digitadores. Es observable que el departamento de Mantenimiento es bastante compacto y de ahí que podamos tener una idea de las dificultades que este enfrenta para ejecutar las actividades planificadas y programadas previamente y atender las fallas del día a día que ponen en riesgo la operación ininterrumpida que se desea.

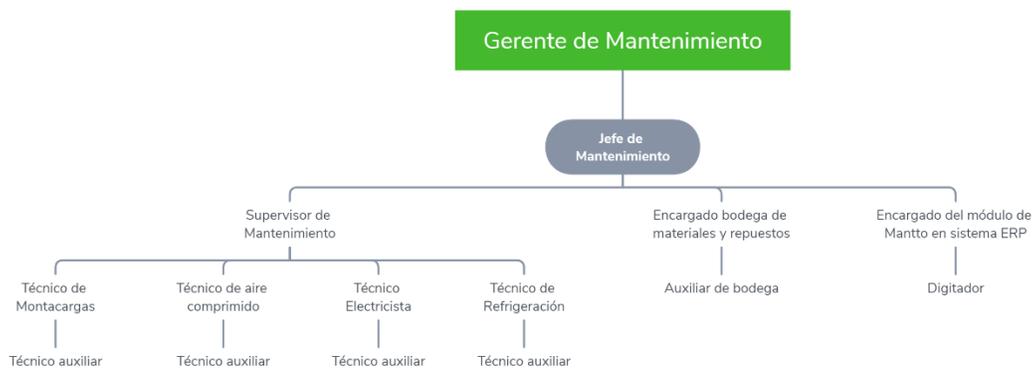


Figura 4. Organigrama del departamento de mantenimiento.

2.2.2 Vinculación con otros departamentos

El departamento de mantenimiento se relaciona estrechamente con otros departamentos de la organización para apoyarles a lograr cumplir sus metas dentro de la organización y así como a mejorar los procesos, funciones y objetivos que están designados a Mantenimiento. Se mantiene una constante comunicación para que exista una sinergia de trabajo constante y efectiva.

En la Figura 5 se observan diferentes relaciones entre los demás departamentos y el área de Mantenimiento.



Figura 5. Vinculación del área de Mantenimiento con otros departamentos.

2.2.3 Documentación y su relación con el sistema GMAO (Gestión de Mantenimiento Asistida por Ordenador).

El nivel de documentación en el departamento de mantenimiento de la empresa textil en estudio comprende algunos de los siguientes tópicos, aunque debe decirse que el nivel de ordenamiento, disciplina en el seguimiento y actualización de la documentación tiene algunas oportunidades de mejora.

Se cuenta con manuales de equipos los cuales son utilizados para consultar las piezas de repuesto ante las fallas inminentes o para incorporar los componentes más importantes al inventario. Notar que esta información se lleva a nivel físico y no se cuenta con la documentación en el GMAO.

La gestión documental en cuanto a los planes de mantenimiento anuales, es que son desarrollados por el jefe del área y revisados una vez al año bajo la experiencia del año anterior. Estos planes se desarrollan en hojas de cálculo y luego se carga al módulo de mantenimiento del GMAO. El nivel de detalle de los planes de mantenimiento abarca las actividades, recurso humano en horas hombre, herramientas, así como los consumibles y repuestos y a utilizar.

Sobre la base de los planes anuales se programan, imprimen y reparten a los ejecutores las rutinas o gamas de mantenimiento a lo largo de las semanas del año para su ejecución. Estas son gestionadas desde el módulo de mantenimiento del GMAO.

Se cuenta con los registros de mantenimientos subcontratados a nivel físico y se llevan de manera ordenada en cartapacios para mantener el respaldo de lo ejecutado. Sin embargo, esta información carece de un proceso de análisis posterior, así como tampoco se carga al GMAO.

Respecto al registro de fallas de mantenimiento, se lleva una bitácora a nivel de hojas de cálculo alimentada manualmente, donde se registran las fallas de mayor envergadura, pero no se registran todas las fallas.

El concepto de órdenes de trabajo se utiliza exclusivamente para dar tratamiento a las solicitudes de trabajos al departamento de mantenimiento que están fuera de la rutina de actividades programadas, por ejemplo, la atención a fallas, los requerimientos de otras áreas de apoyo, entre otros. Las órdenes de trabajo se manejan como un documento en físico que se utiliza para anotar y detallar los materiales y repuestos necesarios para la actividad a ejecutar. Estas órdenes de trabajo luego se utilizan para coleccionar de la bodega de repuestos lo necesario para la ejecución de la actividad. Finalmente, existe un proceso de ingreso de la información de la orden de trabajo al GMAO con la finalidad de reportar el consumo de materiales para la ejecución de actividades. Una oportunidad de mejora es crear y utilizar una categorización de las órdenes de trabajo, por ejemplo, correctivo a fallas, actividades de mejora, actividades no presupuestadas, preventivos, entre otros. Lo anterior serviría para poder generar un tratamiento de la información con capacidad de filtrar lo que se necesite analizar.

2.2.4 Indicadores de mantenimiento

Los indicadores de desempeño se utilizan para medir el rendimiento de los diferentes procesos y la eficacia de las distintas estrategias dentro del departamento de mantenimiento. Nos dan una visión y una perspectiva a través de valores en el tiempo que se comparan con periodos anteriores que permiten evidenciar logros en los alcances de los objetivos. Es una herramienta que nos da suficiente argumento para la toma de decisiones estratégicas que aporten a la mejora continua.

Dentro de los indicadores de mantenimiento de la empresa textil en estudio podemos mencionar los mostrados en la tabla 3:

Tabla 3. Indicadores de mantenimiento

Indicador	Meta
Cumplimiento de presupuesto de Mantenimiento	$\frac{\text{Presupuesto anual} - \text{Costo anual}}{\text{Presupuesto anual}} \geq 3\%$
Cumplimiento de planificación de mantenimiento	$\frac{\# \text{ de tareas ejecutadas}}{\# \text{ de tareas planificadas}} \geq 95\%$
Índice de frecuencia de accidentes (IF)	$\frac{\# \text{ total de accidentes} * 1,000,000}{\# \text{ total de horas hombre laboradas}} < 15$

En la actualidad, la compañía ha buscado implementar indicadores que aporten análisis del desempeño de las actividades de Mantenimiento, tales como tiempo medio a la falla, tiempo medio para reparar, confiabilidad, disponibilidad, entre otros, sin embargo, esto ha sido muy difícil debido a que la implementación de las herramientas informáticas ha sido muy pobre, además, con la

información con la que se cuenta se vuelve muy complicado para poder implementar su uso como mecanismo de gestión.

2.2.5 Planificación del mantenimiento

En la empresa en estudio, se ejecuta anualmente una planificación del mantenimiento, la cual conlleva varios tópicos dentro de esta revisión, tales como, las actividades de mantenimiento rutinario y preventivo junto con la asignación de recursos de índole de mano de obra, materiales y repuestos de manteamiento. Adicionalmente, sobre la base de la ejecución del período anterior se toman decisiones que empujan hacia la reducción de costos en la búsqueda de ahorros para la compañía. Adicionalmente se evalúa la cantidad de ejecutores de mantenimiento para las actividades que se realizarán en el año y de esta manera verificar si es necesario un ajuste en el número de ejecutores.

Plan de mantenimiento

El plan de mantenimiento es un conjunto de actividades en su mayoría preventivas orientadas a mantener en condiciones operativas las instalaciones y equipos.

Actualmente el plan de mantenimiento contempla las siguientes actividades:

- Cronograma de actividades de mantenimiento preventivo que se realizan en el año, con distintas frecuencias: semanales, quincenales, semestrales y anuales.
- Rutinas de inspección diarias y semanales realizadas por los técnicos de las distintas áreas.
- Se cuentan con hojas de inspección con la intención de detectar fallas o anomalías y programar intervenciones de correctivo programado.
- Año con año se revisan los planes de mantenimiento con la intención de disminuir las paradas por fallas, tiempos de respuesta y poder agregar unidades nuevas al cronograma.

2.2.6 Gestión de equipos

Para tener un mejor manejo en la gestión de los equipos se cuenta con un listado o inventario de la maquinaria instalada y la información mínima necesaria para generar un seguimiento de actividades preventivas, sin embargo, no se cuenta con un árbol de jerarquía de equipos que mantenga la información ordenada en base al proceso a través de las diversas áreas, sistemas y subsistemas de la planta.

Los detalles de los cuales se lleva registro son los siguientes:

- Datos y especificaciones técnicas
- Manual y ficha técnica
- Uso y aplicaciones
- Repuestos de equipos
- Manual de instalación y operación
- Consumibles durante la vida útil de la unidad

Este nivel de documentación se lleva a nivel de hojas de cálculo y algunos documentos se llevan de forma física únicamente.

2.2.7 Gestión de inventario.

Actualmente no se lleva una gestión del inventario efectiva u ordenada, pues no se cuenta con una metodología ni herramienta digital para la codificación ni para los registros de entradas y salidas de los diferentes materiales y repuestos.

A pesar que se lleva una existencia de repuestos importantes estos no han sido analizados bajo una metodología sistemática para catalogarlos como críticos, sino que más bien, ha sido a raíz de experiencias de las fallas con mayor impacto a las operaciones.

Además de lo anterior, no se cuenta con controles de máximos o mínimos de estos repuestos importantes ni de ningún otro, y algo que hace más difícil de llevar una gestión y control del inventario es el agravante de que algunos de estos repuestos son de largos tiempo de importación.

2.3 Descripción del proceso productivo

En la planta objeto de estudio, de índole de manufactura textil, se encuentran fácilmente identificados tres macro procesos para la transformación de la materia prima en producto terminado:

1. Recepción y almacenamiento de materia prima.
2. Confección o manufactura.
3. Exportación del producto terminado.

El enfoque al proceso de forma macro nos permite visualizar el giro del negocio desde la entrada hasta la salida, a la vez que nos ayuda a agrupar las actividades que trabajan para una finalidad común en las diversas etapas de la cadena de transformación hacia el producto final. También nos permite de manera intuitiva hacernos una idea de la importancia o criticidad de algunas de las funciones y equipos más fundamentales para el proceso de manufactura.

2.3.1 Recepción y almacenaje

La función principal de este macro proceso es la recepción, descarga y almacenamiento de las diversas materias primas, entre ellas diferentes piezas de tela cortadas previamente, hilos de diversos colores, etiquetas, elásticos, botones, tintas, material de empaque (cajas, bolsas, cintas adhesivas), entre otros. Todos estos materiales son importados desde diferentes países dependiendo del artículo en cuestión y son recibidos en grupos de contenedores.

Una vez arriban los contenedores, estos se ubican en los muelles de carga en posición de salida para que una serie de montacargas se encarguen de la descarga de tarimas con un rango de peso entre 2 toneladas y 8 toneladas. Cada contenedor trae consigo alrededor de 20 tarimas, las cuales tienen que ser descargadas en un tiempo óptimo, de manera tal que no se generen paradas en el proceso productivo por períodos de desabastecimiento, en otras palabras, se debe proveer de manera ágil ya sea al piso de producción donde se transformará dicha materia prima en producto terminado o al sector de almacenamiento para un posterior uso de estos materiales. Notar que la condición desfavorable de un desabastecimiento de contenedores o caer en la incapacidad para descargar los

insumos y/o materia prima se traduce en paradas de planta de manera casi instantánea, generando una afectación importante en términos del volumen de producción perdido.

A medida que los montacargas agrupan los bultos de materia prima sobre tarimas de madera, estas pasarán por un proceso de asignación a producción o almacenaje. Si la materia prima ha sido asignada al piso de producción esta se llevará a un área en donde una persona trasladará dicho material hasta el punto donde será confeccionada. Por el contrario, si la materia prima será almacenada, esta se lleva hasta un área donde otra serie de montacargas se encargan de colocarlos en bastidores de almacenamiento de 13 metros de altura y permanecerán acá hasta que dicha tarima de materiales sea asignada al proceso de manufactura en el piso de producción. Esta serie de montacargas se encarga tanto de almacenar como de descargar las tarimas de materiales que luego serán sujetas al proceso de manufactura.

2.3.2 Manufactura

La función principal de esta área es la transformación de la materia prima en productos terminados, cumpliendo con el plan de producción diario, bajo la calidad mínima establecida, reduciendo tiempos muertos y desperdicios, operando a la mayor eficiencia posible, ya que en esta área se encuentra la principal actividad del giro del negocio.

Para llevar a cabo esta función, las operaciones del piso de producción se configuran y agrupan bajo dos conceptos, estos son, células y unidades de producción. Dentro del piso de producción, una vez que ha sido planificada la producción de una prenda con sus características pertinentes: cantidad, estilo, talla y color, dicha orden es asignada a la respectiva unidad para su confección.

Una célula de producción es un arreglo o configuración de un conjunto de operaciones, a través de las cuales la materia prima se ve transformada en una prenda finalizada. Para configurar una célula típica se necesitan alrededor de 15 máquinas de costura y 15 operarios. La operación en paralelo de múltiples células permite cumplir con la demanda en masa de producto terminado.

Una unidad de producción es un conjunto o configuración de células de producción trabajando en paralelo que tienen como objetivo común la producción en grandes cantidades de un mismo producto y presentación. Para configurar una unidad típica de producción se necesitan alrededor de 8 células.

El concepto de unidad de producción surge como respuesta a la necesidad llevar un mejor control de las operaciones en masa debido a la magnitud de las cantidades a producir, esto permite llevar un seguimiento de manera agrupado y ordenado, para cada presentación de producto.

El contexto de la operación de esta planta del rubro textil abarca una capacidad instalada para operar bajo un esquema de 25 unidades de producción, es decir 200 células de producción, lo cual se traduce en aproximadamente 3,000 operarios y sus respectivas máquinas de costura para la confección de prendas, entre ellas, máquinas rana, plana, atracadoras, etc.

La descripción anterior, nos proporciona perspectiva acerca de la criticidad de las máquinas de costura en términos de la afectación al volumen de producción en caso de alguna falla en estas

máquinas. La situación indeseable de contar con alguna de estas máquinas indisponible por fallas es marginal al comprarlo contra el parque de máquinas con la que se cuenta.

2.3.3 Exportación

La función principal de este proceso es recibir, clasificar y embalar las diferentes prendas confeccionadas y terminadas por el área de Manufactura, para posteriormente realizar el proceso de carga de contenedores y de esta manera proceder con el envío del producto terminado al cliente final.

El proceso de exportación inicia desde que se reciben una a una las burbujas/tarimas de prendas terminadas que abandonan de manera continua el área de manufactura (piso de producción). En la medida que van saliendo del piso de producción las diferentes presentaciones de producto, necesitan agruparse a manera de completar la diversidad de presentaciones requeridas por el cliente, esto se debe a que un pedido puede combinar diferentes cantidades y presentaciones de prendas, así como también puede ser exclusivamente de un tipo de prenda específica.

Después de haberse clasificado, se preparan grupos de cajas, que luego, estos grupos se apilan unos sobre otros para poder conformar un embalado mayor. Una vez que los embalados está preparados se ubican en un área específica para que una serie de montacargas tomen dichos embalados y los ubiquen dentro de los respectivos contenedores.

El producto terminado que, al ser clasificado y agrupado, pero no es incluido en un pedido (no fue cargado a contenedor) se guarda en los bastidores de almacenamiento en espera de ser requerido para completar otro pedido y pueda ser exportado. A este almacenamiento se le denomina “aduana”, ya que es un producto terminado y sólo se encuentra a la espera de ser utilizado para complementar algún pedido y poder proceder con el envío hacia el cliente final.

2.4 Descripción de equipos

Los procesos productivos descritos anteriormente poseen diversos equipos los cuales influyen directa e indirectamente al objetivo final del negocio, ya sea que tengan una participación fundamental o simplemente sea de soporte para que otras áreas puedan desempeñarse de mejor manera para poder lograr las estrategias de la organización.

A continuación, se muestran los equipos en las diferentes áreas que posee una planta típica de manufactura textil, su importancia y cómo estos aportan a cada una de estas áreas.

2.4.1 Equipos del área de exportación

Paletizadoras o embaladoras

Dentro del área de exportación se realiza el proceso de recolección y consolidación de cajas que se exportaran por lo que es necesario embalarlos para tener tarimas más sólidas y seguras cuando se suben a los contenedores, esto se logra con una paletizadora semi automática como se muestra en

la Figura 6. Esta paletizadora cuenta con una plataforma giratoria en la cual se coloca la tarima con cajas que se desea embalar, también posee un mástil que se desplaza de arriba hacia abajo con el objetivo de distribuir el plástico en toda la tarima. El proceso es semi automático debido a que si bien la maquina realiza el proceso de embalaje, el encargado de este proceso debe de armar las tarimas que desea embalar y subirlas a la plataforma giratoria, una vez realizado este proceso debe de activar la máquina en el tablero de control de la máquina. Cabe destacar que este proceso se puede realizar de manera manual, sin embargo, la cantidad de cajas que se exportan de manera diaria necesitan procesos más eficientes por lo que se cuenta con 2 paletizadoras que ayudan a agilizar este proceso y se puede decir que de cierta manera tiene redundancia en el sistema ya que no siempre se utilizan las dos máquinas al mismo tiempo.



Figura 6. Paletizadora semiautomática para embalaje de tarimas

Pallet Jack

Los “pallet Jack” o paletas de carga como se muestra en la Figura 7 son herramientas muy útil para los procesos de exportación debido a que es necesario desplazar cantidades grandes de materiales y sin la ayuda de estos equipos no fuera posible hacerlo de manera ágil, el departamento de exportación cuenta con 10 colaboradores encargados de desplazar el producto terminado por lo que cada uno posee un pallet Jack, es decir, existen 10 equipos en este departamento, sin embargo, no todos están en uso simultaneo ya que dependerá del material y los tiempos de manejo de materiales de cada colaborador.

A pesar del uso constante y la exigencia que se les dan a estos equipos, no suelen presentar un gran problema para la mantenibilidad ya que tienen la ventaja de no ser muy complejos por ser meramente mecánicos, suelen tener un mantenimiento autónomo con los operadores y los repuestos son de fácil acceso al ser solo sellos y rodos que se consiguen de manera local.



Figura 7. Pallet Jack o paleta de carga para transporte de material.

Montacargas de aduana

Los montacargas ubicados en la zona de exportación llamada aduana, son los equipos que se encargan de guardar de manera provisional las cajas con el producto terminado que todavía no están listas para exportar, ya sea porque se tiene de manera parcial el pedido que se va a exportar o porque se necesita espacio físico para poder seguir operando.

Las cajas son ubicadas de manera temporal en un rack de doble profundidad (aproximadamente 1.5 m de profundidad por cada rack) y de 3 niveles de altura (aproximadamente 2 m de altura por cada nivel), por lo que este tipo de montacargas llamado “double reach” o de doble alcance como se muestra en la Figura 8 tiene la peculiaridad que está equipado con un brazo que se expande y se contrae a cierta profundidad, ya que para alcanzar cajas que se encuentren en el rack trasero el brazo debe desplazarse aproximadamente 2 metros para sostener con las paletas la caja. Existen 3 equipos de este tipo, 2 de ellos se mantienen en uso constante, mientras que el otro es un respaldo en caso que alguno llegue a fallar o necesite un mantenimiento preventivo para no afectar la disponibilidad de los equipos.

A pesar que estos equipos son bastante necesarios por la peculiaridad de su operación, la empresa procura mantener un flujo constante entre lo producido y lo exportado, por lo que se evita almacenar material, sin embargo, se deben de tener disponible por las eventualidades que presenta la misma operación.



Figura 8. Montacargas de aduana “double reach” o de doble alcance.

Montacargas de exportación

Los montacargas de exportación son los que tienen como objetivo cargar los contenedores donde se transportarán las cajas del producto terminado a su destino.

Estos montacargas como se observa en la Figura 9 tienen un accesorio el cual se le conoce como “push-pull” o agarre y empuje. Este accesorio sirve para poder agarrar la pila de cajas que están sobre la tarima, extendiendo el brazo y remachándolo al cartón que tienen en la base la pila de cajas con la parte metálica inferior del accesorio, de esta manera hala las cajas y las desplaza sin necesidad de hacer uso de la tarima de madera o tarimas plástica, una vez el montacargas ha ingresado al contenedor vuelve a activar el brazo y empuja las cajas para poder apilarlas de manera ordenada, esto con el objetivo que el contenedor que sea cargado solo lleve cajas con producto terminado y no se subutilice espacio con tarimas de madera, además que de esta manera se pueden apilar cajas de cartón unas sobre otras sin dañarlas y maximizando el uso del espacio del contenedor.

El departamento de exportación cuenta con 3 montacargas que tienen el accesorio “push-pull” esto debido a que hay 3 muelles de carga, de esta manera pueden trabajar los 3 simultáneamente cuando la demanda de exportación es bastante alta, no obstante, al tener 3 equipos se suele trabajar con 2 a tiempo completo y uno de respaldo que sirve como pivote para dar mantenimientos preventivos o correctivos a los otros equipos.



Figura 9. Montacarga para exportación con accesorio “push-pull” o empuje y agarre.

2.4.2 Equipos de aire comprimido

Los equipos de aire comprimido son una de las partes más importantes a nivel de producción ya que estos son los que suministran aire a todas las máquinas de costura que necesitan energía neumática para poder operar.

La planta cuenta con 6 compresores de aire de diferentes capacidades, estos se muestran en la Tabla 4. La potencia total instalada en los compresores es de 1050 HP, si bien es una capacidad instalada importante, esto se debe a que la planta posee una gran cantidad de máquinas de costura que necesitan aire comprimido, por ende, tan elevada potencia instalada responde al caudal de aire que se necesita para las operaciones de planta, pero también para poder mantener la presión requerida por el proceso. Se cuenta con una red de distribución de aire bastante amplia y esto también abona a la necesidad de contar con una potencia instalada de gran magnitud y así poder vencer las pérdidas de presión por tuberías y accesorios.

Tabla 4. Información técnica de compresores.

Cantidad de equipos	1	1	1	1	1	1
Capacidad volumétrica (scfm)	905	993	750	690	883	905
Presión nominal (psig)	124	145	110	115	125	124
Potencia del motor (HP)	150	200	150	150	200	200
Marca	KAESER	INGERSOLL RAND	KAESER	INGERSOLL RAND	KAESER	INGERSOLL RAND
Modelo	DSD150	R160N-A	DSD201	R110I-A125	DSD200	R160I-A125
Tensión (V)	480	480	480	480	480	480
Protección	IP55	IP55	IP55	IP55	IP55	IP55
Aislamiento del motor	ISO F	CLASS F	ISO F	CLASS F	ISO F	CLASS F
Dimensiones (L x A x H)	3.3x1.73x2.04	2.85x1.83x2.03	2.35x1.73x2.04	2.70x1.46x2.03	2.6x1.98x2.04	2.85x1.83x2.03
Peso (kg)	3650	2363	3300	2550	3650	3198

En términos de la potencia utilizada el consumo asciende a un orden de 850 HP, es decir un 80.9 % de la capacidad instalada, ya que un compresor de 200 HP se mantiene apagado, esto tiene dos funciones: la primera es tener un respaldo en caso de que llegue a fallar un equipo y la otra función es la de utilizar dicho compresor como pivote para realizar los mantenimientos de rutina a los demás equipos. Cabe destacar que si llegase a fallar más de un compresor el sistema no podría aportar la presión y flujos necesarios para operar la planta a capacidad nominal, generando pérdidas de producción por bajo desempeño operacional.

El conjunto de compresores y la red de distribución en planta conforman el sistema de suministro neumático para brindar la cantidad y calidad de aire que necesita el área de confección de prendas. La finalidad del sistema es suministrar un caudal de 4,200 scfm y con una presión de aire de 80 psig, se conoce que esta es la presión mínima en la cual las máquinas de costura y confección trabajan de manera óptima sin generar defectos en el producto. Otro elemento importante es la calidad del aire en términos de su humedad, los compresores toman el aire del medio ambiente y el proceso de compresión genera condensación de la humedad, por lo que es necesario tener equipos para realizar un tratamiento y que el aire llegue a la maquinaria con la menor humedad posible.

Es importante mencionar que para un buen suministro se requiere una buena calidad del aire filtrado, cantidad según demanda y presión, es decir, sin fugas en las mangueras, accesorios y ductos.

Para lograr la calidad de aire descrita anteriormente la planta posee un sistema con una serie de equipos que se ilustran en la Figura 10 y se describen a continuación.

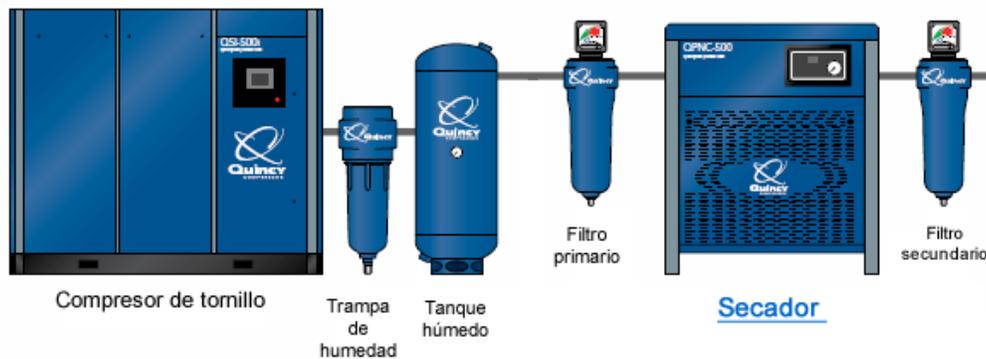


Figura 10. Esquema de conexión de equipos de aire comprimido.

Compresor de aire

El tipo de compresor que posee la planta es de tipo tornillo, siendo este de mayor durabilidad, con un caudal más constante, debido a que suelen girar a alta frecuencia (hasta 9000 revoluciones por minuto).

La peculiaridad de este compresor es que se obtiene un aire de alta calidad debido a su mecanismo de funcionamiento, el cual consiste en hacer compresión al aire aspirado a través de los rotores, aumentando la presión del aire gracias a su motor eléctrico.

Tanque húmedo

Este depósito almacena el aire comprimido y regula el caudal pues se comporta como un tanque pulmón, evitando así cambios bruscos de presión, adicionalmente permite el asentamiento de partículas y de humedad del aire comprimido. La planta cuenta con 2 tanques húmedos en paralelo, uno de 3600 galones, alimentado por 4 compresores y otro de 1600 galones, alimentado por 2 compresores, la función de estos es almacenar el aire producido por los compresores. El aire es alimentado a los tanques húmedos por la parte inferior con el objetivo de que la humedad que arrastra el aire se acumule en la parte baja, recolectándola y a la vez se cuenta con una válvula de drenaje para evacuarla; así mismo, la salida de aire del tanque se encuentra en la parte superior para evitar que parte de la condensación avance a la etapa siguiente del sistema.

Filtro de partículas

Los filtros de partículas eliminan el polvo y otras partículas después de la etapa de compresión, eliminando las partículas contaminantes del aire, estos por lo general van después del tanque húmedo y antes del secador de aire para poder protegerlo de cualquier partícula que pueda causar algún daño en el sistema.

Filtro húmedo

Cumplen con la función de condensar las partículas de humedad del aire para luego ser limpiadas fácilmente. Es importante controlar los cambios de esta unidad para garantizar la calidad del aire hacia la producción. Estos filtros van después de los secadores y sirven como un doble respaldo para evitar que ingrese humedad a la red principal y también para evitar que algunas partículas de aceite que se hayan desprendido en el proceso ya sea del compresor o del secador ingresen a la red de distribución.

Trampa de agua

La trampa de agua atrapa el agua que proviene de la condensación, existen varios tipos de trampas con diferentes accionamientos para drenar el agua condensada como el accionamiento manual, con válvulas temporizadas y con válvulas “cero pérdidas” las cuales son la mejor opción debido a que de esta manera se drena el agua solo cuando es necesario y no hay pérdidas de aire comprimido cuando esta actúa. Estas están en varios puntos del sistema, como en el tanque húmedo, en los filtros de línea húmedos y de partículas y algunas están distribuidas en puntos estratégicos de la red principal de la planta.

Secador de aire

La función del secador de aire es reducir la humedad del aire comprimido, esta busca mantener por más tiempo la vida útil de tuberías y conexiones neumáticas al evitar la corrosión en los ductos y todo esto conlleva a que el aire para el uso final sea de alta calidad.

El funcionamiento radica en el enfriamiento del aire comprimido alrededor de unos 35º Fahrenheit, luego el aire pasa por la válvula la cual extrae la humedad. Una vez el aire comprimido está seco se recalienta con el aire entrante.

Al igual que con los compresores, la planta cuenta con 6 secadores de diferente capacidad como se muestra en la Tabla 5 y están dimensionados para secar el caudal que proporcionan los compresores, también se cuenta con un secador pivote para poder realizar los mantenimientos preventivos y como unidad de respaldo, cada secador cuenta con su filtro de línea húmedo y de partículas, así como sus respectivas trampas de agua.

Tabla 5. Información técnica de los secadores.

Cantidad de equipos	2	2	2
Capacidad de secado	1000 CFM	1600 CFM	1000 CFM
Marca	KAESER	INGERSOLL/ RAND	INGERSOLL/ RAND
Modelo	TG301E	D2720INA400	D1700INA400
Tensión [V]	480	480	480

2.4.3 Equipos de suministro y distribución eléctrica

El servicio de energía eléctrica es parte fundamental de toda industria, un corte del suministro prologando o un servicio de mala calidad podría significar daños de equipos y en el caso más crítico el paro de planta, lo cual afectaría de manera directa a la producción.

Actualmente la planta cuenta con dos puntos de recibo en los que la distribuidora entrega un voltaje trifásico de 13.2 kV. Cada punto de entrega tiene una medición diferente y llegan a un cuarto de máquinas donde se encuentran los equipos eléctricos, a estos cuartos se les conoce como subestaciones 1 y 2. Cada subestación cuenta con un banco de reguladores de tensión para poder controlar las anomalías del voltaje que hay en la red de distribución.

La función principal de las subestaciones es brindar el voltaje adecuado para la operación de la maquinaria que se encuentra en la planta como compresores, secadores, equipos de aire acondicionado, máquinas de costura, etc.

Ambas subestaciones cuentan con equipos eléctricos periféricos que trabajan en conjunto para entregar la energía adecuada a los equipos de planta. En la Figura 11 se muestra el diagrama unifilar de la Subestación 1, mientras que en la Figura 12 se muestra el de la subestación 2. Como se puede observar en las figuras mencionadas, ambas subestaciones cuentan con equipos que hacen funciones similares pero que entregan energía eléctrica a diferentes equipos. A continuación, se describen los equipos que conforman la distribución eléctrica en planta.

Reguladores de voltaje

Los reguladores de voltaje cumplen la función de corregir la señal de tensión suministrada por la distribuidora a través de la electrónica de potencia y elementos mecánicos diseñados para altas tolerancias. Esto hace que la calidad de la energía que se suministra hacia las subestaciones sea de mejor calidad permitiendo el funcionamiento continuo y extender la vida útil de los equipos.

Transformador “padmounted”

Estos transformadores trifásicos reductores se encargan de bajar la tensión de 13.2 kV que brinda la distribuidora y la convierte mediante su relación de transformación a 480V/277V dependiendo de la configuración en la que se conecte el equipo. Son los encargados de alimentar los paneles principales y cada subestación cuenta con 2 de ellos.

En la subestación 1 se encuentra el transformador TXP1 el cual se encuentra en una configuración estrella-delta y que reduce la tensión recibida por la distribuidora de 13.2 kV a 480V/277V. Este transformador tiene una capacidad de 500kVA y alimenta directamente el tablero general de iluminación. Así mismo el TXP2 cuenta con una configuración estrella-delta para obtener 480V/277V y tiene una capacidad de 1000 kVA.

La subestación 2 también cuenta con dos transformadores trifásicos reductores como se observa en el diagrama unifilar de la Figura 12. Estos son el transformador TXP3 y el TXP4 los cuales alimentan los tableros generales de equipos de refrigeración y algunos de aire comprimido respectivamente. Estos también se encuentran en una configuración estrella-delta y transforman la tensión a 480V/277V que es el rango de voltaje con la que trabajan la mayoría de equipos.

Tableros generales

Los tableros generales son los encargados de distribuir la tensión proporcionada por los transformadores a los equipos, cada tablero tiene barras de cobre con una capacidad de hasta 3000 amperios y cuentan con sus respectivas protecciones para cada uno de los equipos a los que distribuye el voltaje. Como se observa en los diagramas unificables, existe un tablero general para cada transformador tipo “padmounted”, por lo que hay un total de 4 tableros generales. Cada tablero se identifica dependiendo de la carga más representativa que tiene, dentro de los que se encuentran:

- Tablero general 1: Equipos de aire comprimido, oficinas y máquinas de costura.
- Tablero general 2: Iluminación del piso de producción.
- Tablero general 3: Equipos de refrigeración y máquinas de costura.

- Tablero general 4: Equipos de aire comprimido.

En el tablero general 1 se encuentran 4 de los 6 equipos de aire comprimido los cuales trabajan a un voltaje de 480V, cada equipo cuenta con su respectiva protección. Así mismo este tablero alimenta los transformadores secos de las oficinas principales y de cafetería los cuales están conectados a 480V en el lado de alta y ellos hacen su función para transformar a 120V/208V que es la tensión con la que normalmente se trabajan los dispositivos de oficina como computadoras, monitores, cargadores, etc. De igual manera se encuentra el transformador seco que tiene el 33% de la carga de las máquinas de costura y las cuales trabajan con un voltaje de 120V/208V.

El tablero general 2 es el encargado de alimentar la iluminación del piso de producción y que se compone de dos sub tableros que están ubicados en lugares estratégicos donde se pueden accionar las luminarias del piso de producción. La carga representativa de este tablero como se mencionó anteriormente son las luminarias del piso de producción las cuales están compuestas por lámparas de 6 tubos LED T5 de 18W cada uno. Cada sub tablero cuenta con 1,500 lámparas sumando una carga de 324 kW y representando un 64.8% de la capacidad del transformador. Cabe destacar que la iluminación es parte fundamental para cumplir con las metas de calidad que la empresa exige y debe de cumplir con un estándar entre 900 a 1000 Luxes.

El tablero general 3 es el que se encarga de alimentar a los equipos de refrigeración de toda la planta, en este se encuentran tanto las manejadoras de aire como el “*chiller*” los cuales trabajan a una tensión de 480V. También se encuentra un transformador seco que alimenta el 75% de las máquinas de producción las cuales trabajan a un voltaje de 120V/208V.

Finalmente se encuentra el tablero general 4 el cual se encarga de distribuir la tensión adecuada a los 2 equipos de aire comprimido restantes la cual es de 480V. Cabe destacar que este tablero es el más reciente junto con el transformador TXP4 los cuales surgieron por el crecimiento que ha tenido la planta últimamente.

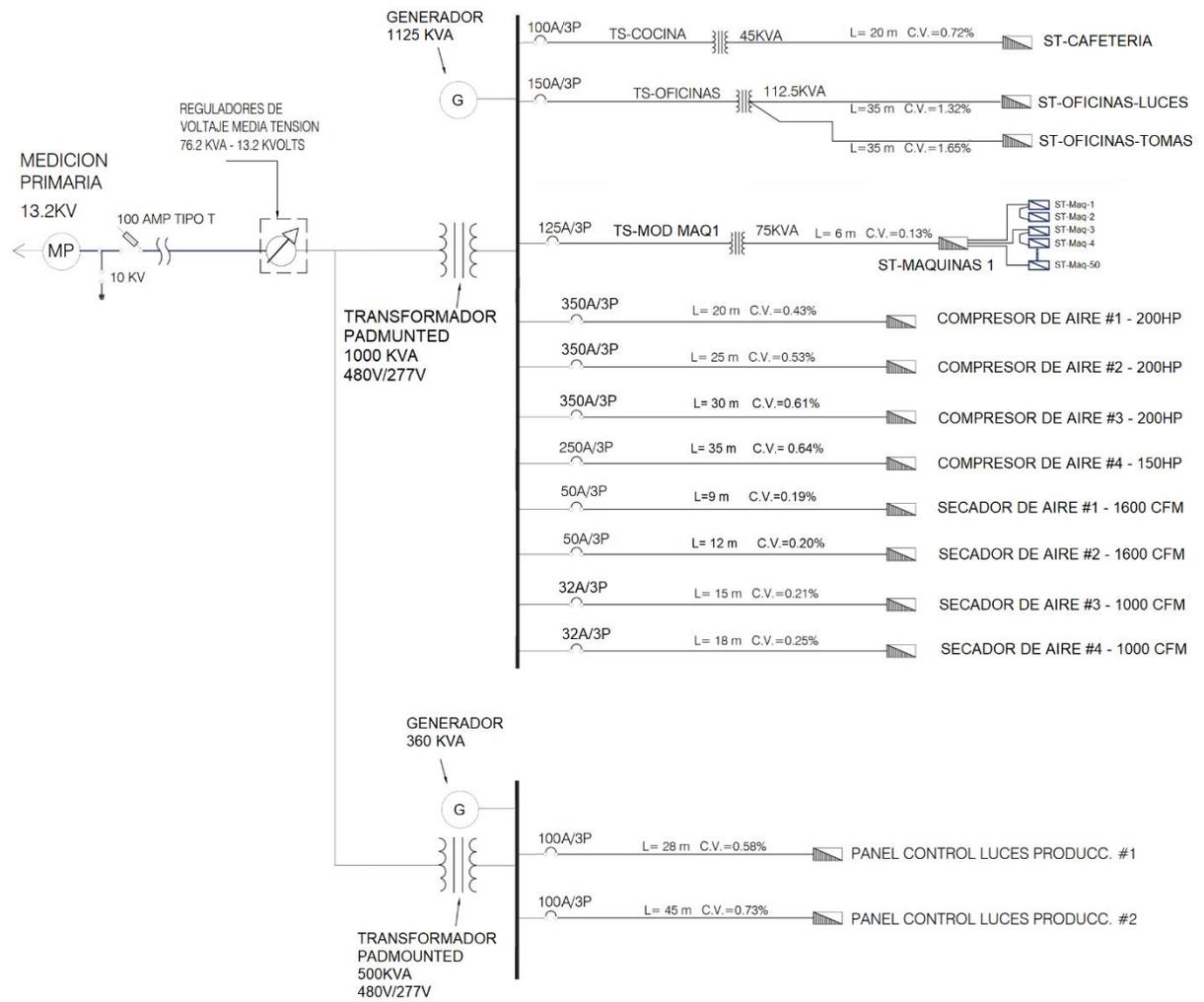


Figura 11. Diagrama unifilar subestación 1.

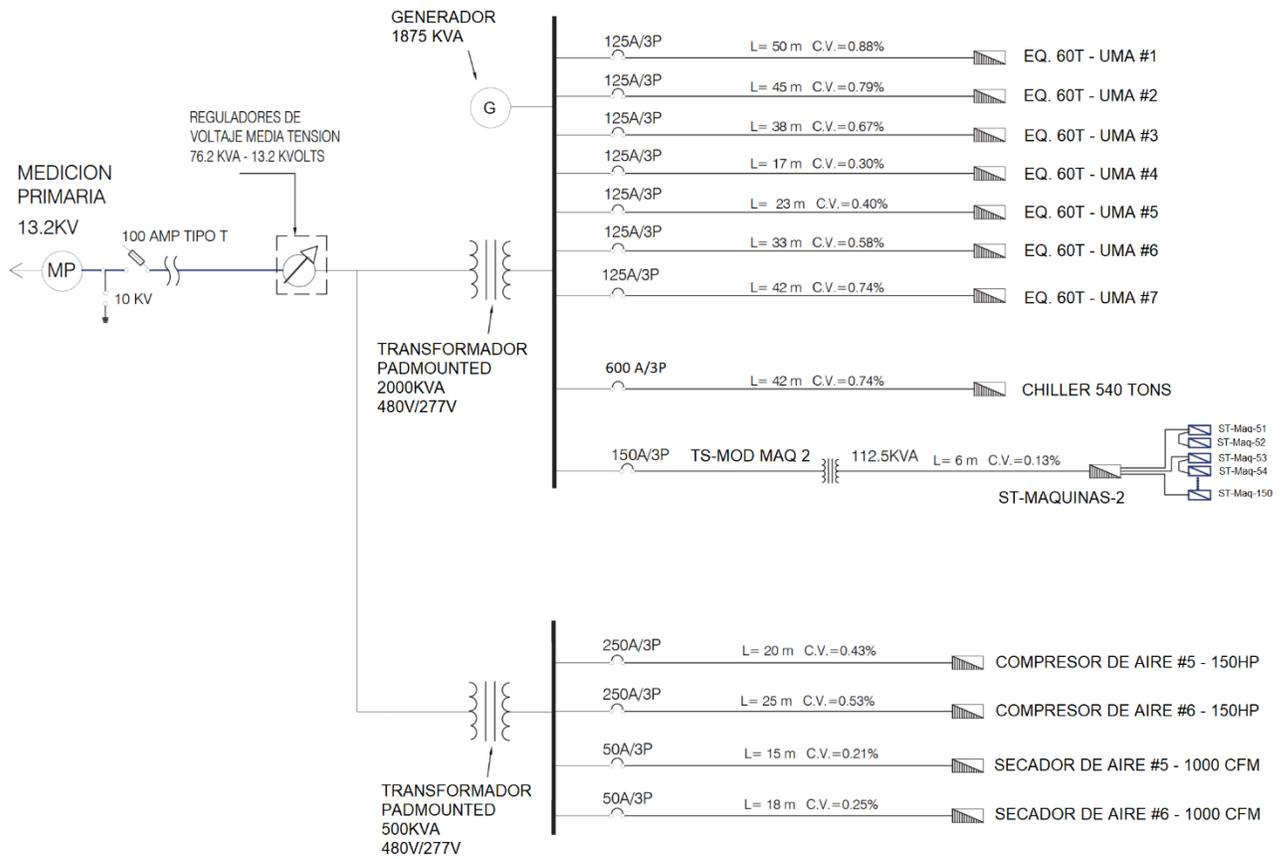


Figura 12. Diagrama unifilar de subestación 2.

En la Tabla 6 se puede observar el detalle de la carga de los transformadores y los tableros generales, cómo estos están distribuidos con la carga y la capacidad que tienen ocupada.

Tabla 6. Cuadro de carga de transformadores tipo “Padmounted” y tableros generales.

Cuarto de máquina	Tablero	Capacidad instalada [KVA]	Capacidad demandada [KVA]	Porcentaje demandado de la capacidad [%]	Equipos instalados
Subestación 1	Tablero general 1	1000	765.00	76.50%	4 compresores de aire, 4 secadores de aire, transformador seco de máquinas de costura, transformador seco de oficinas, transformador seco de cafetería.
Subestación 1	Tablero general 2	500	324.00	64.80%	2 sub tableros de Iluminación del piso de producción.
Subestación 2	Tablero general 3	2000	1625.00	81.25%	7 unidades manejadoras de aire, 1 chiller, transformador seco de máquinas de costura.
Subestación 2	Tablero general 4	500	237.00	47.40%	2 compresores de aire, 2 secadores de aire.
		4000	2951.00		

Porcentaje de utilización	73.78%
---------------------------	--------

Transformador seco

Los transformadores secos utilizan el aire como medio dieléctrico en lugar de aceite, lo que facilita el mantenimiento. En casos de alta demanda y ambientes encerrados se instalan extractores de calor a modo que circule aire fresco en la cuba de este.

Este tipo de transformador suministra energía eléctrica a los equipos directos cuyo nivel de tensión se maneja entre los 120 V y 208 V. La función principal es convertir los 480 V que suministra el tablero general a los niveles de tensión mencionados anteriormente.

Como se observa en los diagramas unifilares de la figura 11 y figura 12, existen 4 transformadores secos los cuales están dedicados a diferentes funciones, dos de ellos están dedicados específicamente a las máquinas de producción mientras que los otros dos están dedicados a oficinas y cafetería. Cabe destacar que las máquinas de costura tienen que estar conectadas exclusivamente a transformadores secos independientes ya que por protocolos de seguridad estos se desenergizan al final de cada jornada laboral para evitar cualquier riesgo por algún cortocircuito en horas no laborales. En la Tabla 7 se muestra la descripción de capacidades y descripción de cargas de dichos transformadores secos.

Tabla 7. Cuadro de carga de transformadores secos.

Cuarto de máquina	Transformador seco	Capacidad instalada [KVA]	Capacidad demandada [KVA]	Porcentaje demandado de la capacidad [%]	Equipos instalados
Subestación 1	TS-COCINA	45	23.00	51.11%	Iluminación de cafetería, tomas cafetería, equipo de cocina, cuarto frío.
Subestación 1	TS-OFICINAS	112.5	80.00	71.11%	Iluminación de oficinas, tomas de oficinas, sub tablero para talleres, aires acondicionados de oficina.
Subestación 2	TS-MOD MAQ1	75	42.00	56.00%	Sub tableros de máquinas (1 al 50).
Subestación 2	TS-MOD MAQ2	112.5	84.00	74.67%	Sub tableros de máquinas (51 al 150).
		345	229.00		

Porcentaje de utilización	66.38%
---------------------------	--------

2.4.4 Equipos de suministro de energía eléctrica de respaldo

Los equipos de suministro de energía eléctrica de respaldo son sumamente importantes ya que como se explicó en la sección anterior, la energía eléctrica es fundamental para el proceso productivo y al existir un corte del suministro desde la red de distribución estos equipos son los encargados de mantener la continuidad operacional.

Estos equipos son generadores eléctricos acoplados a un motor de combustión interna a base de un combustible fósil en este caso Diesel, y son llamadas comúnmente “plantas de emergencia” por la función que estas desempeñan en casos de interrupción del suministro eléctrico.

Las plantas de emergencia entran en funcionamiento mediante un mecanismo de control automático que al detectar la ausencia de voltaje envía una señal que enciende el motor de combustión interna y a través de su acople transmite energía mecánica al generador síncrono, y este la convierte en electricidad por el principio de inducción magnética. La energía eléctrica suministrada es a 480 voltios y se inyecta directamente a las barras de los tableros generales 1, 2 y 3 (exceptuando el 4). Esta condición de suministro eléctrico de emergencia permite operar la planta a un 80% de su capacidad nominal.

La planta de emergencia garantiza el servicio continuo de suministro de energía eléctrica cuando hay ausencia de voltaje en los siguientes casos:

- Variaciones bruscas de voltaje en la red.

- Falla del circuito alimentador de la distribuidora eléctrica.
- Falla en algunas de las fases de las barras.
- Falla franca en la subestación principal de la planta industrial.

El edificio cuenta con 3 generadores eléctricos a base de diésel, cada uno con diferente capacidad y conectados a diferente tablero eléctrico. En la Tabla 8 se observa la ficha técnica de cada planta de emergencia, mientras que en la Tabla 9 se muestran los tableros que respalda cada planta de emergencia. Como se mencionó anteriormente, no todos los tableros tienen un respaldo, dejando desprotegido el tablero general 4 que se encuentran en la subestación 2, esto se debe a que la planta ha tenido una expansión la cual no ha logrado cubrir con los equipos de respaldo eléctrico.

Tabla 8. Características técnicas de las plantas de emergencia.

Especificaciones del motor			
Marca	CUMMINS	FG WILSON	CATERPILLAR
Modelo	900DFJC	S330E1	3512 DITA
Tipo de combustible	Diesel	Diesel	Diesel
Número de cilindros	12	6	12
Diámetro	159 mm (6,25")	116.6 mm	170 mm
Carrera	159 mm (6,25")	146 mm.	190 mm.
Cilindrada	38 litros (2300 pulg.3)	9.3 litros	51,8 litros
Aspiración	Turbocargado y refrigerado	Turbocargado y refrigerado	Turboalimentado y Postenfriado
Refrigeración	Radiador ambiental 50 °C (122 °F).	Agua	Circuito combinado JWAC
Especificaciones del generador			
Marca	CUMMINS	FG Wilson	CATERPILLAR
Modelo	900DFJC	LL5014J	SR5
Potencia	1125 KVA	360 KVA	1875 KVA
Velocidad	1800 rpm	1800 rpm	1800 rpm
Frecuencia	60 Hz	60 Hz	60 Hz
Tensión	400 V. Trifásico	400 V. Trifásico	400 V. Trifásico
Factor de potencia	0,8	0,8	0,8
Excitación	PMG (generador de imanes permanente)	SHUNT	SHUNT
Ajuste de tensión	± 5%	± 5%	± 5%
Aislamiento	Clase H	Clase H	Clase H con tropicalización y antiabrasión
Protección	IP23	IP23	IP23

Tabla 9. Cuadro de carga general con plantas de emergencia.

Cuarto de máquina	Tablero	Capacidad instalada [KVA]	Capacidad demandada [KVA]	Porcentaje demandado de la capacidad [%]	Planta de emergencia instalada [kVA]	Porcentaje de ocupación instalado	Equipos instalados
Subestación 1	Tablero general 1	1000	765.00	76.50%	1125.00	68.00%	4 compresores de aire, 4 secadores de aire, transformador seco de máquinas de costura, transformador seco de oficinas, transformador seco de cafetería.
Subestación 1	Tablero general 2	500	324.00	64.80%	360.00	90.00%	2 sub tableros de Iluminación del piso de producción.
Subestación 2	Tablero general 3	2000	1625.00	81.25%	1875.00	86.67%	7 unidades manejadoras de aire, 1 chiller, transformador seco de máquinas de costura.
Subestación 2	Tablero general 4	500	237.00	47.40%	0.00	0.00%	2 compresores de aire, 2 secadores de aire.
		4000	2951.00				

Porcentaje de utilización	73.78%
---------------------------	--------

2.4.5 Equipos de Aire Acondicionado

En las plantas textiles manufactureras la climatización es de vital importancia para mantener en condiciones óptimas el confort del personal operativo, ya que esto les permite sostener niveles de productividad adecuados en la confección de prendas. Además, la climatización del aire es uno de los estándares de salud y calidad exigidas por la compañía. En esta planta el régimen de operación es 44 horas semanales en las cuales la climatización del aire es una prioridad debido a que se mantienen hasta 3,000 personas laborando dentro de la nave industrial.

La planta cuenta con un sistema de enfriamiento para climatizar el edificio mediante un grupo de equipos que en conjunto logran bajar la temperatura entre 23°C y 25°C, este punto ajuste está programado con el objetivo de mantener una temperatura agradable para el personal que labora, así como para disipar la temperatura generada por las maquinas del piso de producción.

El sistema de acondicionamiento de aire está compuesto por un “chiller” el cual hace circular agua fría en un circuito cerrado pasando por las unidades manejadoras de aire, las cuales permiten un intercambio de calor entre el agua fría y el aire ambiente que se desea enfriar. El “chiller” conecta a las manejadoras de aire mediante un circuito cerrado de agua helada proveniente del ciclo de compresión mecánica del sistema como se muestra en la Figura 13. El “chiller” usa refrigerante para desplazar el calor entre el evaporador y condensador. El agua helada sale del evaporador impulsada por el sistema de bombeo a 7 °C por toda la red hidráulica hasta llegar a las manejadoras de aire para el acondicionamiento del ambiente del piso de producción. El agua del circuito cerrado retorna al evaporador a 12 °C para posteriormente ser enfriado de nuevo.

Así mismo el compresor del “chiller” cuenta con un circuito de agua proveniente de la torre de enfriamiento que baja la temperatura a 32°C antes de ingresar al condensador y saliendo a una temperatura de 37 °C por el calor extraído del refrigerante para posteriormente regresar a la torre de enfriamiento y repetir el ciclo.

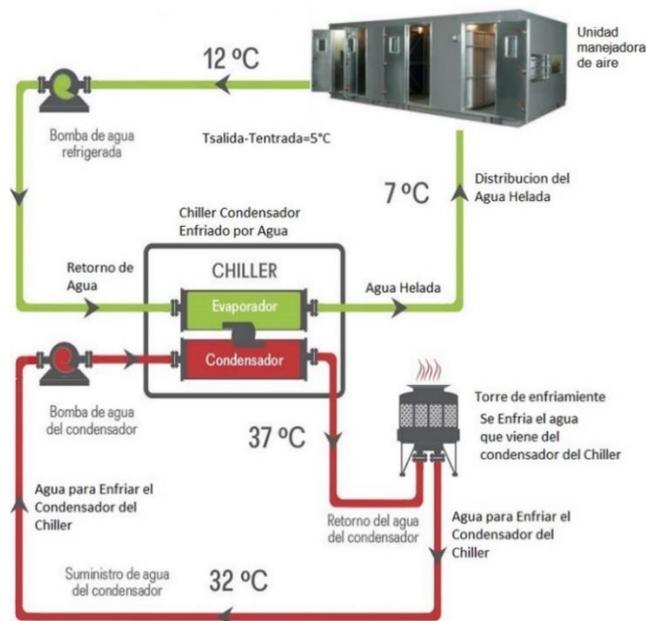


Figura 13. Sistema de Refrigeración

Unidad manejadora de aire (UMA)

Las unidades manejadoras de aire cumplen con la función de inyectar aire climatizado a una temperatura controlada, mediante el uso de un ventilador y el intercambio de calor llevado a cabo en el serpentín. Las manejadoras de aire están distribuidas en diversos puntos a lo largo de toda la planta para homogenizar las condiciones del aire en toda la nave. En la Tabla 10 se muestran las características de las manejadoras de aire con que cuenta la planta textil.

Tabla 10. Características técnicas de las unidades manejadores de aire.

ID	Marca	Modelo	RPM	Voltaje [V]	Potencia [HP]	Capacidad [Toneladas de refrigeración]	Tamaño de filtro [Pulgadas]
UMA 1	McQuay	OAH065GDAC	836	460	20	60	2"
UMA 2	McQuay	OAH065GDAC	836	460	20	60	2"
UMA 3	McQuay	OAH065GDAC	836	460	20	60	2"
UMA 4	McQuay	OAH065GDAC	836	460	20	60	2"
UMA 5	McQuay	OAH065GDAC	836	460	20	60	2"
UMA 6	McQuay	OAH065GDAC	836	460	20	60	2"
UMA 7	McQuay	OAH065GDAC	836	460	20	60	2"

En la Figura 14 se muestra un esquema de la distribución de las 7 unidades manejadoras de 60 toneladas de refrigeración en el piso de producción, estas cuentan con una distribución estratégica para poder ambientar todo el edificio y circular el aire mediante ductos inflables que sirven como difusores.



Figura 14. Distribución de Unidades Manejadoras de Aire (UMA) en el piso de producción

“Chiller”

Es el equipo principal del sistema de enfriamiento. Este sistema se basa en el principio del ciclo de refrigeración. En el evaporador del equipo se lleva a cabo la transferencia de calor entre el líquido refrigerante (R134a) y el agua del ciclo cerrado, con esto obtenemos “agua fría”, la cual es bombeada hacia las unidades manejadoras de aire en donde se realiza el intercambio de calor con el aire que suministra el ventilador de la unidad manejadora de aire.

El compresor lleva el gas refrigerante al condensador para realizar la transferencia de calor con el agua enfriada proveniente de la torre de enfriamiento, este circuito suele ser abierto y con agua previamente suavizada.

El agua proveniente de la torre eleva su temperatura al quitar el calor del refrigerante regresando al ciclo abierto para ser enfriada de nuevo.

El refrigerante es llevado a la válvula de expansión para nivelar la presión y temperatura de este para iniciar el ciclo de refrigeración.

En este sistema es donde se integran los demás procesos del sistema de enfriamiento, por lo que compone un sumo cuidado y mantenimiento en cada uno de sus componentes, tomando en cuenta que forma parte del confort de los colaboradores ubicados en la planta de manufactura.

Torre de enfriamiento

La torre de enfriamiento es la que se encarga de enfriar el agua que ingresa al condensador del “chiller”. La torre de enfriamiento utilizada es de tiro inducido, pues son muy eficientes y de mantenimiento muy práctico. Funcionan mediante la succión del aire por medio del ventilador instalado en la parte superior de la torre, haciendo circular el aire en contracorriente con el agua que desciende desde la cisterna caliente en la parte superior. El relleno de la torre permite incrementar el área de contacto entre el agua y el aire, permitiendo así un buen enfriamiento del agua. El motor del ventilador tiene un voltaje de operación de 480 voltios y una potencia de 15 HP. Posee un flotador que acciona una válvula mecánica para permitir o restringir el flujo de agua de reposición para la torre de enfriamiento.

Sistema de Tratamiento de agua

El sistema de tratamiento de agua está conformado por un suavizador de agua y una nanofiltración. La etapa de suavizador tiene como objetivo disminuir la dureza del agua. En cambio, la nanofiltración, busca retener partículas metales, así como partículas orgánicas.

La importancia del sistema de tratamiento de agua es muy alta ya que es el agua que utiliza el “chiller” en el circuito abierto para poder condensar el refrigerante, este intercambio ocurre dentro de una coraza y tubos de cobre, donde la circulación del agua enfriada podría generar incrustaciones si no se le alimenta una calidad de agua baja en minerales y otros agentes incrustantes, las cuales podrían conllevar a pérdida drástica de eficiencia en el equipo.

Sistema de bombeo de torre de enfriamiento

Es una bomba centrífuga de 2 HP a 220 voltios. Cumple con la función de transportar el agua previamente enfriada en la torre de enfriamiento hacia el condensador del “chiller”.

Se cuenta con redundancia debido a que la ausencia de su función puede paralizar el sistema de enfriamiento al no contar con un nivel de temperatura adecuado en el condensador de la unidad principal de enfriamiento.

Sistema de bombeo de “chiller”

Es una bomba centrífuga de 30 HP a 480 voltios. Cumple con la función de transportar el agua enfriada desde el “chiller” hasta las diferentes manejadoras de aire.

Se cuenta con redundancia debido a que los tiempos de mantenimiento preventivo o correctivo (falla) suelen de larga duración y podría paralizarse el sistema global de enfriamiento a falta de la capacidad de enfriar el aire que está siendo inyectado a la nave industrial.

2.4.6 Equipos contra incendio

En la planta textil manufacturera en estudio, la materia prima son cortes de tela, los cuales son inflamables, hay desperdicios que se deben controlar como desecho, algunas partículas en el aire, máquinas eléctricas y que disipan calor, entre otros riesgos.

Dicho lo anterior, es de vital importancia contar con un sistema contraincendios que pueda mitigar un conato de incendio que pudiera comprometer la vida de los colaboradores, sobre todo cuando se toma en cuenta el volumen de personal que opera en dicha planta. Es por ello que se cuenta con los equipos descritos a continuación:

Bomba contraincendios

La bomba contraincendios está conformada por motor de combustión, bomba, panel de control, línea de distribución y una cisterna de 90 metros cúbicos.

Se cuenta con una bomba “jockey” que ayuda a mantener presurizada toda la línea de distribución ante caídas de presión por dilatación de la tubería por condiciones térmicas o leves descensos, parametrizada en su presostato.

El tipo de bomba es horizontal, con una presión de descarga de hasta 12 bares con motor de combustión a Diesel.

Las salidas son mediante gabinetes en donde se cuenta con mangueras de 14 metros, distribuidas en el área de bodega y piso de producción.

2.4.7 Equipos de recepción y almacenaje

Esta área comprende la fase inicial del proceso de manufactura, los procesos y equipos deben estar destinados a garantizar un adecuado almacenamiento de materia prima, de tal manera que puedan ser despachados de manera eficiente al área de producción sin retrasos ni inconvenientes que afecten las fechas de la planificación de la producción.

Al igual que los equipos del área de exportación, el área de recepción y bodega cuenta con equipos que ayudan a desplazar en este caso la materia prima y alimenta al proceso productivo, es por eso que son de gran importancia ya que la falta de disponibilidad de estos equipos puede representar pérdidas en la producción.

“Pallet Jack”

Similares a los “*pallets Jack*” del área de exportación son equipos sencillos como se muestra en la Figura 15, pero por su función es de los más utilizados en la planta industrial para carga y descarga de manera horizontal.

Su mantenimiento no es complejo, normalmente se lleva a la falla de los rodos o del mecanismo de elevación. El área cuenta con 10 *pallets Jack* los cuales sirven para desplazar manualmente la materia prima e insumos hacia las unidades de producción que se encuentran dentro del piso de producción.



Figura 15. “Pallet Jack” del área de recepción y bodega.

Montacargas de descarga

Este equipo como su nombre lo indica se encarga de descargar la materia prima que viene de los contenedores, dicha materia prima al venir en bultos individuales y embalados hace que la descarga se complique si no es con uno de estos equipos ya que estos contienen un accesorio llamado “*clamp*” o de pinza que tiene dos paletas cilíndricas como se muestra en la Figura 16, las cuales se abren y cierran para poder agarrar los bultos y colocarlos en tarimas listos para almacenarlos o distribuirlos en el piso de producción.

La planta cuenta con 3 montacargas de descarga de los cuales 2 están en constante uso y uno por lo general se mantiene como respaldo en caso que uno falle o que se necesite sacar un equipo para mantenimiento.



Figura 16. Montacargas de descarga con accesorio de pinza o “*clamp*”.

Montacargas de servicios

Los montacargas de servicio son los que se encargan de labores de desplazamiento horizontal, al igual que los pallet Jack sin embargo la ventaja de estos equipos es que tienen capacidad para mover más de una tarima al mismo tiempo, ya sea por el peso que manejan y por la maniobrabilidad que tienen, suelen colocar las tarimas en el área de servicio para el piso de producción de manera eficiente, además de eso también sirven a los montacargas de bodega que se encargan de estibar las tarimas en los bastidores de almacenamiento de bodega. El accesorio que normalmente manejan este tipo de montacargas son paletas planas y que son fijas como se muestra en la Figura 17 de tal manera que puedan agarrar fácilmente las tarimas.

Al ser equipos que tienen mucha utilidad en la operación, la planta cuenta con 6 de estos equipos para poder realizar de manera ágil las actividades y suelen tener 4 en uso y 2 de respaldo en caso de falla o necesidad de un mantenimiento preventivo.



Figura 17. Montacarga de servicio con accesorio paletas fijas.

Montacargas de bodega

Este equipo tiene características únicas debido a la naturaleza de la infraestructura de la bodega donde se almacena la materia prima, como se ha explicado anteriormente, no toda la materia prima pasa directamente al piso de producción para ser transformada, mucha de esta materia prima es almacenada esperando su respectiva planificación para entrar al piso de producción. La bodega cuenta con 6 pasillos de 1.50 metros de ancho con 7 niveles de bastidores de almacenamiento que en su totalidad suman 13 metros de altura. Es por ello que este montacarga tiene un mástil vertical con una cabina y paletas que suben con ella para poder subir y bajar las tarimas que se desean guardar o extraer como se observa en la Figura 18. Este montacarga es de gran importancia para la operación ya que sin este la materia prima no pudiera ser almacenada de manera eficiente en el espacio que posee la bodega, y al mismo tiempo al tener materia prima almacenada en la parte superior de los bastidores de almacenamiento, es el único que puede bajar el cargamento. Es por ello que se tienen 6 equipos en la planta, uno asignado a cada pasillo para que puedan tener un flujo más eficiente para la operación.



Figura 18. Montacarga de bodega.

Panel de control magnético

Debido al riesgo que corre el almacenaje de materia prima en los pasillos de 1.5 metros de ancho y 13 metros de altura, estos equipos cuentan con un mecanismo para que sea dirigido de manera segura, para esta función se cuenta con un control magnético que evita posibles impactos del montacargas en los bastidores de almacenamiento. Se cuenta con una guía magnética instalada en medio de cada pasillo comprendido entre bastidores de almacenamiento, con el objetivo que el montacargas mantenga una trayectoria recta sin importar un error humano, evitando que el montacargas pueda golpear las estructuras de almacenamiento y materia prima.

Sus componentes son la fuente DC, la línea magnética distribuida en el área de almacenamiento de materia prima y su controlador.

Cambiador de batería

Al tener una flota completa con montacargas electrónicos todos tienen baterías las cuales tienen un tamaño y un peso considerablemente grande y no pueden cambiarse fácilmente, por lo anterior, se tiene un cambiador de baterías el cual facilita el intercambio de estas, cuenta con bandeja de rodillos para un intercambio seguro y eficiente debido a que el cambio de baterías se hace directamente del montacargas al intercambiador sin que el operador realice algún esfuerzo manual como se observa en la Figura 19.



Figura 19. Cambiador de baterías.

Cargador de batería

Una vez cambiadas las baterías, las que han sido cambiadas por falta de carga pasan a una zona donde se conectan a un cargador de baterías, estos equipos son los encargados de suministrar la energía eléctrica requerida a las baterías. Los cargadores para la batería de los montacargas cuentan con su tarjeta electrónica de mando y el transformador AC/DC como fuente de alimentación y varían entre el rango de voltaje que puede ser desde una entrada AC de 480V a una salida DC de 36V o 48V dependiendo de la batería que se desee cargar.



Figura 20. Cargador de baterías para montacargas eléctricos

3. CAPITULO III: Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo de graduación se ha optado como metodología el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad o mejor conocido como “RCM”, por sus siglas en inglés “*Reliability Centered Maintenance*”. Dicha metodología contiene una serie de fases que se desarrollarán haciendo uso de otras metodologías como jerarquización de equipos, matriz de criticidad basada en riesgos y análisis de modo y efectos de falla.

3.1 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM)

Esta metodología fue creada en los años 60 por la colaboración de una industria aeronáutica y el gobierno norteamericano los cuales buscaban optimizar las frecuencias de mantenimiento de las aeronaves, creando así diferentes procedimientos para los equipos y que se acoplaban a su verdadera necesidad, reduciendo tiempos de mantenimientos y costos operativos. (Jones, 1995)

En síntesis, el concepto de RCM es “una filosofía de gestión del mantenimiento, en la cual un equipo multidisciplinario de trabajo, se encarga de optimizar la confiabilidad operacional de un sistema que funciona bajo condiciones de trabajo definidas, estableciendo las actividades más efectivas de mantenimiento en función de la criticidad de los activos pertenecientes a dicho sistema, tomando en cuenta los posibles efectos que originarán los modos de fallos de estos activos, a la seguridad, al ambiente y a las operaciones”. (Parra, Mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC), 2009)

A continuación, se muestra un esquema en la Figura 21 en la cual se observan las diferentes fases para la implementación de la metodología RCM y que se abordarán de manera más detallada posteriormente.

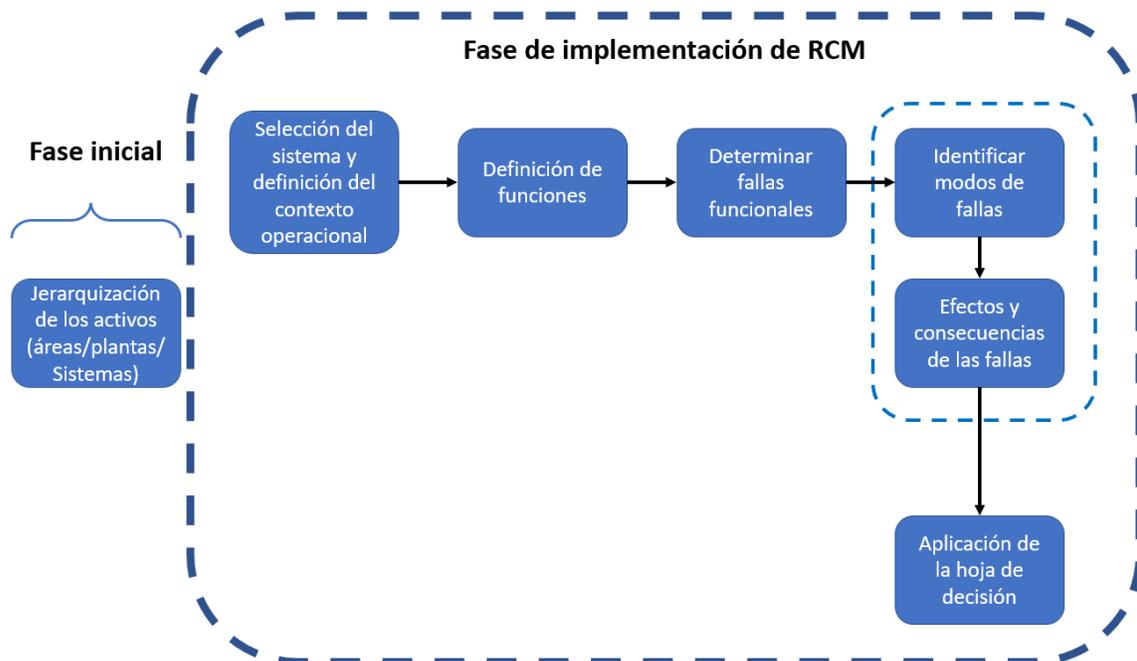


Figura 21. Fases de implementación de RCM

3.1.1 Jerarquización de activos

La ejecución del mantenimiento centrado en confiabilidad necesita de una estructuración previa de los equipos, en la que los activos se encuentran dentro de un sistema de jerarquización, esto hace que sea factible la implementación del RCM debido a que se enfoca en un conjunto de equipos que desarrollan una función específica. La jerarquización de equipos también es base para aplicar otras metodologías, como lo son la criticidad y los análisis de modos de falla y efectos.

Para la jerarquización de los equipos se hará uso de la herramienta de árbol jerárquico la cual nos ayudará a tener un enfoque más claro de los equipos que se encuentran dentro de la planta.

Un árbol jerárquico es una herramienta que nos permite clasificar y ordenar los equipos que una empresa posee en base a un criterio de jerarquía previamente establecido.

Para la elaboración de este árbol jerárquico se tomaron en cuenta los siguientes elementos:

- ¿Cómo están clasificadas las áreas del proceso?
- ¿Cuántos equipos se encuentran en la planta?
- ¿Dónde están ubicados los equipos?
- ¿Cuál es la función del equipo y a que área del proceso pertenece?

Una vez definida las respuestas a las interrogantes anteriores, se establece una clasificación o jerarquía que permite ubicar a los equipos con un enfoque basado en el proceso. De esta manera, cada activo está clasificado y ordenado de forma clara y sistemática. Una clasificación como esta facilita el tratamiento de los equipos dentro de la Gestión del Mantenimiento.

A manera de ilustración, en la Figura 22 se muestra un ejemplo aplicado, en el cual el primer nivel de la clasificación es la Planta, a partir de ahí se subdivide en áreas de proceso, sistemas, subsistemas, equipos, hasta llegar a las parte objeto que es el nivel de mayor detalle de la ubicación de los activos, en este caso se ubica en el sexto nivel la válvula temporizada con la cual se drenan la condensación de agua generada a partir de la compresión del aire ambiente .

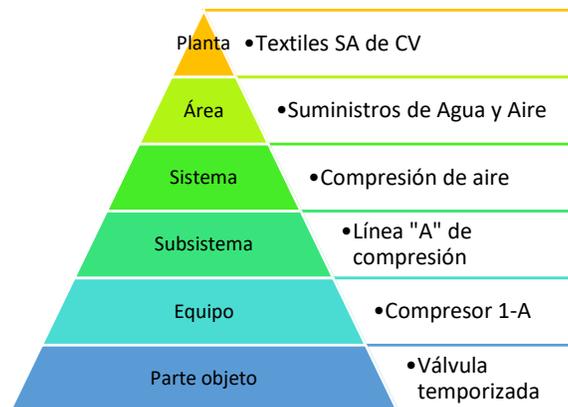


Figura 22. Pirámide taxonómica de la clasificación de los activos

3.1.2 Criticidad basada en la matriz de riesgo

Un análisis de criticidad establece un método para determinar el nivel de riesgo asociado a la falla funcional de un equipo o sistema. Para la planta manufacturera en estudio, la aplicación de una matriz basada en riesgo permitirá un mejor manejo, toma efectiva de decisiones y el direccionamiento de esfuerzos y recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional. Los criterios a evaluar dependen de la naturaleza de cada proceso por lo que no hay una matriz absoluta aplicable a todos los rubros.

La matriz que se aplicará a la empresa en estudio es una metodología que busca identificar el sistema más crítico mediante dos características principales como son la frecuencia de fallos y la consecuencia que el fallo conlleva.

El modelo aplicado está basado en la estimación del factor riesgo a través de las siguientes expresiones: (Parra & Crespo, Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos, 2012)

$$Riesgo = FF \times C \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

FF = Frecuencia de fallos.

C = Consecuencia del fallo.

Frecuencia de fallas (FF)

La frecuencia de fallos está dada por la cantidad de fallas que se presentan en el año, es decir, que se analiza el número de veces que el sistema ha presentado algún desperfecto. Para ello se muestran a continuación los criterios de frecuencia evaluada en la escala de 1 – 5 que son aplicables a la organización:

- 1.- Excelente: ningún evento en el año.
- 2.- Bueno: 1 evento al año.
- 3.- Promedio: 2 eventos al año.
- 4.- Pobre: 3 eventos al año.
- 5.- Muy pobre: 4 o más eventos al año.

Consecuencia (C)

La consecuencia es el impacto que las fallas generan sobre el proceso. Para clasificar las consecuencias se toman en cuenta los criterios más relevantes para la organización, estos son, Calidad de productos, Salud Higiene y Ambiente e Impacto a la Producción y Costes de Mantenimiento. Al tomar en cuenta estos factores, el impacto generado por cualquiera de estos afectará el resultado de la matriz. Como parte de esta metodología se evalúa el riesgo de cada factor y se selecciona el mayor de ellos.

A continuación, se describen los criterios anteriormente mencionados:

Calidad

Para la empresa en estudio, la calidad es sumamente importante, es por ello que este criterio es fundamental para evaluar las consecuencias que impactan en la producción, de esta manera se asegura que los equipos relacionados al proceso productivo cumplan con los estándares de calidad que la compañía desea. Los criterios evaluados del 1 al 5 para la calidad son los siguientes:

- 1.- No genera ningún impacto en calidad.
- 2.- Afectación en calidad (pérdida <2%).
- 3.- Afectación en calidad (pérdida >2%, <5%).
- 4.- Afectación en calidad (pérdida >5%, <10%).
- 5.- Afectación en calidad (pérdida >10%).

Seguridad – Higiene – Ambiente (SHA)

Estos tres criterios están estrechamente relacionados, es por eso que tanto seguridad, higiene y ambiente son tomados en cuenta como un parámetro para el impacto dentro de la empresa, esto debido que para la organización es de suma importancia cuidar de su personal el cual es su capital máspreciado, así como busca cumplir con los requisitos medioambientales. De acuerdo a lo anterior se establecen los siguientes criterios del 1 al 5.

- 1.- No genera ningún impacto sobre la seguridad y el ambiente.
- 2.- Evento genera: alarma potencial en seguridad y/o incidente ambiental sin repercusión sobre la normativa legal vigente.
- 3.- Evento genera: daños menores a la integridad física y/o afectación al ambiente controlable.
- 4.- Evento genera: lesión incapacitante y/o afectación sensible al ambiente.
- 5.- Evento catastrófico: muerte y/o alto impacto ambiental.

Impacto en producción y costos de mantenimiento (IP-CM)

Otros de los factores más importantes para evaluar el riesgo es el impacto que tienen las fallas en los equipos del proceso productivo, es decir, la afectación al negocio generada a consecuencia de un paro de maquinaria, así como también la generación de costos por mantenimientos que los equipos demandan para la corrección de fallas. Para la organización, una hora de parada productiva es considerada una consecuencia económica menor y considera intolerable una parada igual o mayor a 9 horas consecutivas como se muestra en el cálculo del Anexo A, este rango de horas de afectación a la producción podemos traducirlo al lenguaje económico como costos que se generan a la empresa y cuyos criterios se presentan a continuación en una escala del 1 al 5.

- 1.- Costos menor a \$12,000.00
- 2.- Costos entre \$12,000.00 y \$36,000.00

- 3.- Costos entre \$36,000.00 y \$60,000.00
- 4.- Costos entre \$60,000.00 y \$120,000.00
- 5.- Costos superiores a \$120,000.00

Una vez establecidos los impactos de cada criterio es necesario definir la consecuencia, para ello se ingresan los impactos de cada criterio en una tabla, como se muestra en la Tabla 11, y la metodología establece que se tomará el impacto con mayor consecuencia entre los 3 criterios evaluados.

Tabla 11. Tabla ejemplo de consecuencia

Subsistema	SHA	CALIDAD	IP-CM	CONSECUENCIAS
Subsistema 1	1	5	3	5
Subsistema 2	1	2	1	2
Subsistema 3	1	1	3	3
Subsistema 4	4	1	1	4

Una vez definidos los resultados de los factores anteriores, tanto de frecuencia como de consecuencia, se pueden clasificar los riesgos de falla de cada uno de los equipos del árbol jerárquico en una matriz de 5x5 como se muestra en la Figura 23, la cual posee en el eje vertical la escala de frecuencia de fallos y en el eje horizontal la escala de la consecuencia. Con esta matriz, una vez definidos los niveles de cada factor del riesgo, la matriz nos indicará el nivel de criticidad en el que se encuentra el equipo y clasificándolo en 4 posibles categorías:

- **MA: Muy Alta Criticidad**
- **A: Alta Criticidad**
- **M: Media Criticidad**
- **B: Baja Criticidad**

Frecuencia

5	A	A	MA	MA	MA
4	M	A	A	A	MA
3	B	M	M	M	A
2	B	B	B	M	M
1	B	B	B	B	B
	1	2	3	4	5

Consecuencias

Figura 23. Matriz de criticidad

La utilidad de la matriz de riesgo para la aplicación de la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad es que nos permite visualizar cuáles son aquellos equipos de mayor riesgo a los que es conveniente enfocar los esfuerzos y recursos a modo de mejorar su confiabilidad operacional.

3.1.3 Contexto operacional

Una vez seleccionado el sistema mediante la herramienta de matriz de criticidad, es necesario realizar un levantamiento del contexto operacional de dicho sistema. Esto con el objetivo de identificar las funciones que tiene cada proceso del sistema para que de esta manera brinde información necesaria que nos ayudará a analizar más detalladamente cualquier posible falla.

Para el desarrollo del contexto operacional es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- **Resumen operativo:** Se debe de especificar el propósito del sistema que se estudiará, de tal manera que se describan los equipos que lo componen y las metas o indicadores que este tiene que cumplir para desempeñar correctamente su función.
- **Personal:** Se deberá describir la cantidad de personas que intervienen directamente con el sistema, rotaciones de turnos, y parámetros de calidad que tienen definidos.
- **División de procesos:** Se establecerán los límites del proceso junto con sus divisiones que las componen, así como sus indicadores y dispositivos de seguridad.

Para visualizar el proceso se hace uso de un esquema de Entrada-Proceso-Salida (EPS), como el ejemplo que se muestra en la Figura 24. Dicho diagrama ayuda a identificar las entradas que requiere el proceso, las cuales pueden ser identificadas como: materia prima, servicios, controles de alarmas, etc. De igual manera el esquema muestra las salidas esperadas por el proceso como productos primarios, productos secundarios y controles de alarmas.

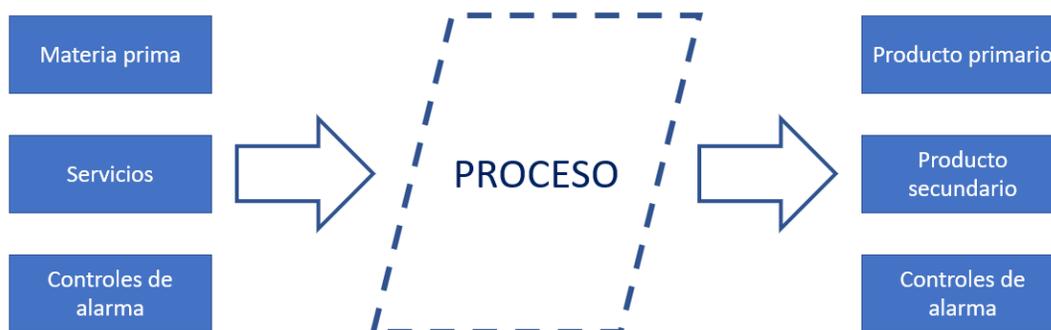


Figura 24. Esquema de Entrada-Proceso-Salida

3.1.4 Análisis de modos y efectos de fallas AMEF

El análisis de modos y efectos de fallas AMEF o conocido en inglés como “FMEA: *Failure Mode and Effects Analysis*” es un método sistemático que permite identificar los problemas antes de que ocurran y puedan afectar a los procesos y productos en un área determinada, bajo un contexto operacional dado (Woodhouse, 1997).

Esta es la herramienta principal de la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad, esto debido a que analiza los activos desde su contexto operacional obteniendo información para prevenir las consecuencias y los efectos de los posibles fallos a partir del mantenimiento adecuado para dichos activos.

El objetivo principal del AMEF es identificar los siguientes aspectos:

- Función de los activos y sus respectivos estándares de operación.
- Fallos funcionales asociados a cada función del activo.
- Modos de fallos asociados a cada fallo funcional.
- Establecer los efectos y consecuencias asociados a cada modo de fallo.

Función de los activos y sus respectivos estándares de operación

El primer paso es identificar la función principal del equipo, es decir, el propósito para lo que existe el activo, además de definir los parámetros operativos con los cuales el equipo opera de manera óptima. Existen activos que pueden cumplir con más de una función, sin embargo, una debe de ser la principal, mientras las otras se pueden colocar como funciones secundarias.

Fallos funcionales asociados a cada función del activo

Una vez identificada la función principal se debe de identificar las fallas funcionales. Un *fallo funcional* se define como una ocurrencia no previsible, que no permite que el activo alcance el funcionamiento esperado en el contexto operacional en el cual se desempeña (Moubray, 1991).

Modos de fallos asociados a cada fallo funcional

Los modos de fallas se pueden definir como las causas físicas que originan la aparición de las fallas funcionales, pueden ser totales o parciales. A este punto debemos tomar en cuenta que la metodología de mantenimiento basado en confiabilidad orienta las actividades preventivas a atacar modos de fallo asociados a cada falla funcional en específico. Esta es la cualidad que diferencia la gestión de mantenimiento tradicional y la del mantenimiento basado en confiabilidad.

Establecer los efectos y consecuencias asociados a cada modo de fallo

Para establecer los efectos y consecuencias asociados a cada modo de fallo es necesario identificar el impacto del modo de falla dentro del contexto operacional donde trabaja el activo, el estándar de ejecución deseado para la función del activo y de las consecuencias físicas originadas debido a la aparición del modo de fallo. Los factores antes mencionados pueden hacer que en cada modo de fallo tenga una forma característica de impactar en seguridad, ambiente y en las operaciones.

Una vez establecido los criterios del AMEF se colocan como se muestra en la Tabla 12 donde se muestra el equipo, la función del equipo, la falla funcional, el modo de falla y finalmente el efecto de falla.

A continuación, se muestran las diferentes estrategias de mantenimiento con las que se contara en la metodología RCM a aplicar.

Mantenimiento preventivo: Son las actividades de rutina orientadas a mantener operativo el activo y se realiza de manera sistemática en intervalos de tiempo.

Mantenimiento correctivo: Es la actividad que consiste en reparar un activo que ha presentado una avería de modo que vuelvan a su funcionalidad.

Mantenimiento basado en condición: Es la actividad técnica de mantener en monitoreo periódico la condición del activo para determinar actividades o intervenciones según los parámetros presentados en sus evaluaciones.

3.1.6 Análisis del riesgo económico

Como parte de la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, se vuelve necesario establecer parámetros económicos para la toma de decisiones, eso será base para decidir entre realizar o no algunas actividades mantenimiento, es decir, optar entre los costos asociados a dichas actividades de mantenimiento o tomar el riesgo de esperar hasta que la falla ocurra y en dicho momento intervenir todo lo necesario para reestablecer la función de los equipos dañados. Para lo anterior se define como base un riesgo económico por cada hora de paro de planta o indisponibilidad para la producción, a esto se le conocerá como impacto a la producción por fallas.

Dentro de la planta en estudio, podemos afirmar que el impacto económico al proceso productivo tanto por fallas y la indisponibilidad generada es un tema crítico. Esto se debe al elevado número de prendas producidas por hora. El experimentar una parada de tiempo considerable se traduce en pérdidas cuantiosas, esto sumado a los costos asociados a las acciones correctivas que se realizan para reestablecer la producción hacen que las pérdidas sean elevadas.

El riesgo económico anual asociado a una falla se calcula tomando en cuenta el costo de la reparación directa de la falla sumado al costo del impacto productivo por maquinaria parada, tomando en cuenta las unidades dejadas de producir en cada evento.

En la siguiente ecuación se detalla lo anterior:

$$Riesgo = f \times [(TPPR \times Imp. prod.) + C directos] \quad (Ecuación 2)$$

Donde:

f: frecuencia de fallos por año

TPPR: tiempo promedio para reparar

Imp. prod: Impacto en la producción por hora (\$/h)

C directos: Costos directos por falla (reparaciones) (\$/falla)

A manera de ejemplo, podemos suponer un fallo en la subestación eléctrica que abastece un área de producción textil completo, suponiendo que la planta de emergencia solamente abastece a un 75% de la maquinaria de costura mientras que el otro 25% deja de producir. Teniendo en cuenta que la planta produce 600,000 prendas diarias a un costo de producción de \$2.1 por docena,

operando únicamente 8 horas por día. El 25% de la producción que se perdería en una hora ronda las 18,750 prendas. Estimando una frecuencia de fallo de una vez por año y un costo directo de reparación de \$1,000. El tiempo para reparación y reestablecer la función se estima de 3 horas.

El cálculo quedaría de la siguiente manera:

$$Riesgo\ económico = 1 \frac{f}{año} \times \left[\left(3\ h \times \left(18,750 \frac{prenda}{h} \right) * \left(\frac{2.1\ \$}{12\ prenda} \right) \right) + \$1000 \right] \quad (Ecuación\ 3)$$

El riesgo económico del ejemplo práctico sería de \$10,843.75 dólares anuales.

Una vez calculado el valor del riesgo económico, este se contrasta contra la estrategia del plan óptimo de mantenimiento como se muestra en la lógica de la Figura 26, de esta manera se podrá asignar recursos a las tareas que lo requieran y poder identificar los potenciales ahorros al aplicar una buena estrategia a los activos sometidos a las metodologías anteriormente descritas.

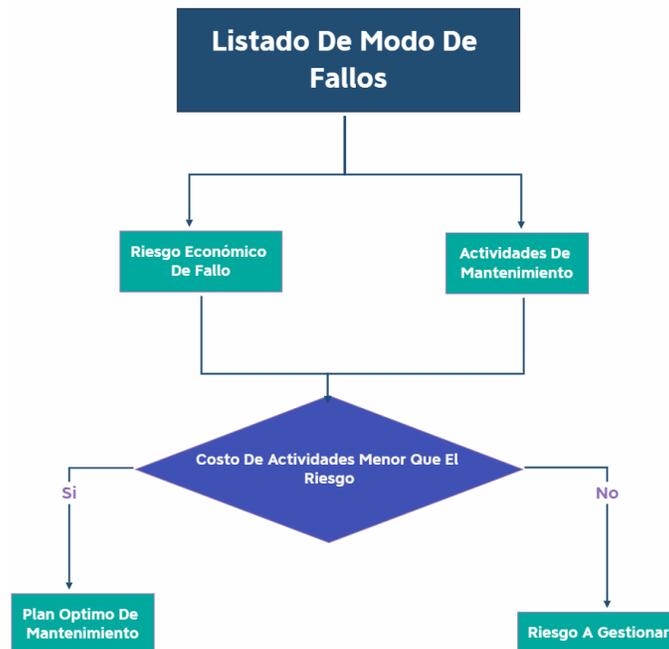


Figura 26. Flujograma de toma de decisiones entre plan óptimo y riesgo económico.

4. CAPITULO IV: Presentación y análisis de resultados

4.1.1 Árbol jerárquico de equipos

Como se explicó en el capítulo anterior, la jerarquización de equipos es el primer paso para la implementación de la metodología RCM.

Actualmente la planta en estudio no contaba con un árbol jerárquico que mostrara de manera ordenada los diferentes equipos. Es por eso que se ha elaborado una propuesta para el presente trabajo de graduación, con la que se pretende mostrar los diferentes niveles jerárquicos de acuerdo a criterios como la ubicación de los activos dentro del proceso y las funciones que desempeñan dichos equipos.

La propuesta del árbol jerárquico se ha dividido en los siguientes 5 niveles:

Planta: Es el nivel más alto del árbol jerárquico y como su nombre lo indica representa la planta a la que pertenecen todos los activos. Para este caso se ha tomado el nombre *“Manufacturera textil”* para representar dicho nivel.

Área: Este nivel corresponde a la ubicación en la que se encuentran los activos. Dicha ubicación se definió de acuerdo al macroproceso al que estos pertenecen y estos son:

- Recepción y almacenamiento.
- Servicios e instalaciones.
- Exportación.

Sistema: Este nivel es asignado al conjunto de equipos que realizan una función general. Para este caso, cada sistema es asignado con el nombre dicha función. Por ejemplo, el *“sistema de aire comprimido”* se encarga de proveer el aire comprimido de acuerdo a los estándares que la producción lo requiere y este pertenece al área de *“Servicios e instalaciones”*.

Subsistema: Dentro de este nivel se encuentran las funciones específicas que realiza un conjunto de equipos. Al igual que los sistemas, estos son nombrados de acuerdo a la función específica que desempeñan. Por ejemplo, Dentro del *“sistema de aire comprimido”* se encuentran los subsistemas de *“Compresión de aire”* y *“Secado de aire”*. La primera se encarga de la compresión del aire y la segunda de extraer la humedad que se haya generado en el proceso anterior, para de esta manera entregar el servicio de aire comprimido y seco con la calidad que se requiere para el proceso productivo.

Equipo: Es el nivel en el que se encuentran los activos que se desean analizar. Estos activos trabajan de manera individual, pero en conjunto forman parte de subsistemas que realizan una función específica. Por ejemplo, el subsistema *“Compresión de aire”* está compuesto por 6 equipos individuales: *“compresor de aire 1”*, *“compresor de aire 2”*, *“compresor de aire 3”*, *“compresor de aire 4”*, *“compresor de aire 5”* y *“compresor de aire 6”*. Cada uno de ellos trabaja de manera independiente, pero en conjunto aportan a la función específica la cual es entregar un volumen de aire comprimido.

Parte: Es el elemento mantenible que se encuentra dentro del equipo y es capaz de brindar mayor detalle para poder realizar un mejor análisis. Por ejemplo, para el equipo “Compresor de aire 1” lo conforman las siguientes partes: “Motor”, “Filtro de aceite”, “Acumulador”, “Sistema de control”, “Tornillo de compresión”, “Sistema de lubricación”, “Elemento compresor”, “Cilindro de compresor”, “Filtro de aire”, “Enfriador de aceite”, “Separador de aceite”, “Válvulas”, “Enfriador de aire”.

En la Figura 27 se muestra el árbol jerárquico propuesto. En esta se observa el desglose de los ejemplos descritos anteriormente de acuerdo a los niveles correspondientes. En el Anexo F se muestra el árbol jerárquico propuesto para el desarrollo de este estudio.

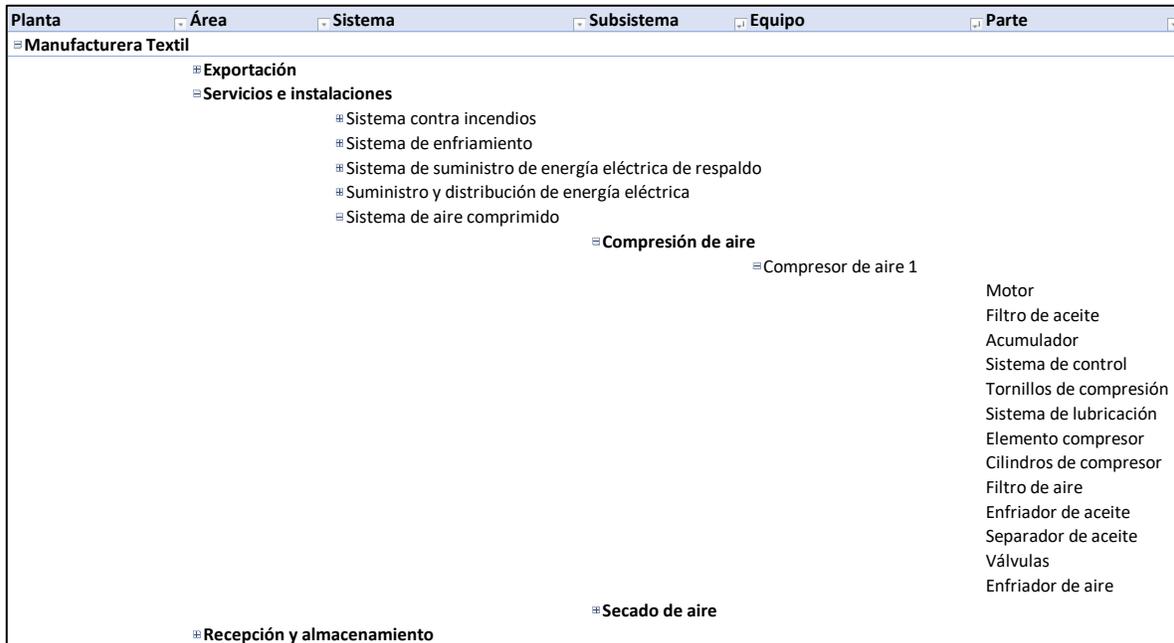


Figura 27. Ejemplo de propuesta de árbol jerárquico.

4.1.2 Análisis de criticidad basada en matriz de riesgo

Una vez definido el árbol jerárquico aplicaremos la metodología de análisis de criticidad basada en la matriz de riesgo.

Como se explicó en el capítulo 3, el análisis de criticidad consta de una apropiada elección de distintos parámetros que toma en cuenta tanto los valores cuantitativos como cualitativos. Esto se logra evaluando la estimación de la ocurrencia de fallas de un periodo de tiempo determinado, y la evaluación del impacto del fallo en las áreas de: Calidad, Seguridad-Higiene-Ambiente, y el Impacto productivo.

La matriz de criticidad se le aplicará en los **subsistemas del árbol jerárquico propuesto**, esto con el objetivo de clasificar de acuerdo a la criticidad las funciones específicas que el conjunto de equipos realiza, de esta manera se podrá delimitar el área de análisis y se podrá enfocar esfuerzos en aquel conjunto de equipos que más lo requiere según los criterios establecidos.

A continuación, se muestra en la Tabla 13 la matriz de criticidad basada en riesgos para determinar la criticidad de los activos aplicada a los subsistemas del árbol jerárquico.

Tabla 13. Matriz de criticidad basada en riesgo aplicada a los subsistemas.

Código de Equipo	Sistema	Subsistema	FRECUENCIA FALLAS	SHA	CALIDAD	IP-CM	CONSECUENCIAS	TOTAL	JERARQUIZACIÓN
E.1	Embalaje	Embalaje	1	1	1	3	3	3	Baja Criticidad
TP1	Transporte de PT	Aduana	2	1	2	1	2	4	Baja Criticidad
TP2		Exportacion	1	1	1	3	3	3	Baja Criticidad
TP3		Transporte manual de PT	1	1	1	1	1	1	Baja Criticidad
SC	Sistema contra incendios	Sistema contra incendios	1	4	3	1	4	4	Media Criticidad
CH	Sistema de enfriamiento	Chiller	3	3	4	4	4	12	Alta Criticidad
UMA		Manejadoras de aire	2	3	4	2	4	8	Media Criticidad
BCH		Sistema de bombeo chiller	1	4	4	3	4	4	Media Criticidad
BT		Sistema de bombeo torre	1	4	4	3	4	4	Media Criticidad
STA		Sistema de tratamiento de agua	2	4	4	3	4	8	Media Criticidad
TE		Torre de enfriamiento	1	4	4	2	4	4	Media Criticidad
PE	Sistema de suministro de energía eléctrica de respaldo	Plantas de emergencia	2	4	4	5	5	10	Alta Criticidad
SUB1	Suministro y distribución de energía eléctrica	Subestacion 1	1	4	4	5	5	5	Alta Criticidad
SUB2		Subestacion 2	1	4	4	5	5	5	Alta Criticidad
CA	Sistema de aire comprimido	Compresion de aire	1	2	4	5	5	5	Alta Criticidad
SA		Secado de aire	2	2	4	5	5	10	Alta Criticidad
TMP1	Transporte de MP	Almacenamiento de MP	4	1	2	1	2	8	Media Criticidad
TMP2		Centro de carga	1	2	2	1	2	2	Baja Criticidad
TMP3		Descarga de MP	3	3	2	2	3	9	Media Criticidad
TMP4		Distribucion de MP	2	2	2	1	2	4	Baja Criticidad
TMP5		Transporte manual de MP	1	3	2	1	3	3	Baja Criticidad

En la Tabla 13 se muestran los sistemas con sus respectivos subsistemas a los que se le aplicó la matriz de criticidad. Teniendo en cuenta los criterios que se explicaron en el capítulo 3 se han colocado números del 1 al 5 para determinar la frecuencia de fallas. Así mismo los campos de Seguridad-Higiene-Ambiente (SHA), Calidad e Impacto en producción y costos de Mantenimiento son evaluados de la misma manera para dar paso al nivel de consecuencia, el cual será el número mayor de estos campos evaluados. Una vez se ha obtenido la columna de frecuencia de fallas y la de consecuencia se procede a multiplicar ambos valores para obtener un número que servirá para representar la criticidad del subsistema.

Una vez obtenido los datos, observamos las cantidades de los subsistemas que pertenecen a cada clasificación de criticidad como se muestra en la

Criticidad	Cantidad de Subsistemas
Muy Alta criticidad	0
Alta Criticidad	6
Media Criticidad	8
Baja Criticidad	7

Tabla 14. Cantidad de subsistemas de acuerdo a su criticidad.

Criticidad	Cantidad de Subsistemas
Muy Alta criticidad	0
Alta Criticidad	6
Media Criticidad	8
Baja Criticidad	7

En la Figura 28 se muestra el gráfico de pastel en donde se observa que el porcentaje de los subsistemas tienden a ser bastante equilibrados entre alta, media y baja criticidad al tener un porcentaje similar y ninguno con muy alta criticidad, obteniendo el 29% de los subsistemas con “Alta criticidad”, el 38 % con “Media criticidad”, y finalmente el 33% con “Baja criticidad”.

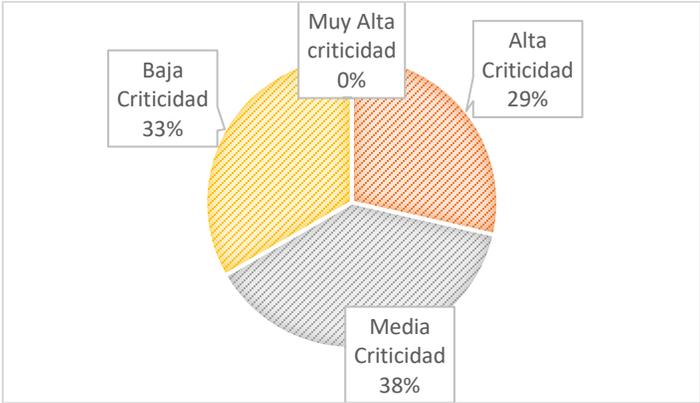


Figura 28. Gráfico de pastel para el porcentaje de subsistemas según criticidad.

En la Figura 29 se muestran los subsistemas ordenados de mayor a menor criticidad y en el cual se observa que el subsistema “chiller” es el de mayor criticidad, obteniendo 12 puntos de acuerdo a la metodología de matriz de criticidad establecida.



Figura 29. Subsistemas de mayor a menor criticidad.

Una vez definido que el subsistema “Chiller”, con código “CH”, es el de más alta criticidad para la planta, se le aplicará la metodología RCM. Sin embargo, debido a que pertenece al sistema de enfriamiento y guarda estrecha relación en referencia al funcionamiento y dependencia de otros subsistemas dentro del mismo grupo, se le aplicara la metodología RCM al “Sistema de enfriamiento” en su totalidad, y el cual está compuesto por los siguientes subsistemas:

- Chiller
- Manejadoras de aire
- Sistema de bombeo “chiller”
- Sistema de bombeo torre
- Sistema de tratamiento de agua
- Torre de enfriamiento

4.1.3 Análisis del contexto operacional

Resumen Operativo

En esta planta de manufactura textil, la climatización es de vital importancia para mantener condiciones óptimas de confort para el personal operativo, esto a su vez permite que dicho personal mantenga su productividad en términos del número de prendas confeccionadas por hora. Además, para la empresa en cuestión, mantener excelentes condiciones de climatización para su recurso humano forma parte de los estándares de salud y calidad exigidos y adoptados como parte de las políticas institucionales.

Un elemento importante a tener presente y que permite comprender mejor la criticidad asociada con este equipo es que, en dado caso, si no se cuenta con la climatización adecuada del aire, eventualmente desembocará en una parada de producción y confección de prendas, esto debido a que las condiciones de temperatura ambiente se vuelven inmanejables por el elevado número de operarios que se encuentran laborando en la nave industrial. Se encuentran operando al mismo tiempo alrededor de 3000 personas en la planta objeto de estudio.

Para lograr estas condiciones de climatización el sistema de enfriamiento está compuesto por una serie de unidades manejadoras de aire, dos sistemas de bombeo, un “Chiller” enfriado por agua, donde dicha agua también posee un circuito abierto de enfriamiento por medio de una torre, adicionalmente, se cuenta con un sistema de tratamiento para el agua de enfriamiento del “Chiller”. El régimen de operación de este sistema de climatización es de 44 horas semanales, operando de lunes a sábado.

Sistema de enfriamiento

El proceso cumple con la función de enfriar el agua proveniente de las manejadoras de aire de las salas de producción mediante un “chiller”, realizando un intercambio de calor con el refrigerante en el proceso del ciclo de refrigeración, luego este gas es enfriado con la transferencia de calor del agua fría que va al condensador del “chiller” proveniente de la torre de enfriamiento.

El “chiller” está instalado en la azotea del edificio, separadas con cortinas de plástico para ambientes fríos para evitar la humedad del cuarto de bombas de agua helada. En el interior del edificio se encuentran las unidades manejadoras de aire (UMA).

Descripción del proceso

El objetivo del proceso es lograr una adecuada climatización del piso de producción mediante aire enfriado en una serie de manejadoras de aire. El agua fría proviene de un ciclo de refrigeración compuesto por un sistema de bombeo, sistema de tratamiento de agua, torres de enfriamiento y "chiller".

El "chiller" y las UMA (unidad manejadora de aire) están conectadas en el mismo circuito cerrado, el agua circulará impulsada por el sistema de bombeo a 7°C y retorna a 12°C por el intercambio de calor de la manejadora con el aire ambiente que proviene de una toma externa.

Por la temperatura del agua retornada de las UMA, el refrigerante se ve expuesto a un aumento de temperatura por lo que es necesario extraer el calor del refrigerante, esto se logra con agua proveniente de una torre de enfriamiento con temperatura alrededor de 32°C y es inyectada al condensador del "chiller", luego, este flujo de agua abandona el condensador a 37°C. El agua del circuito desde el condensador del "chiller" a la torre de enfriamiento es previamente tratada para suavizarla y removerle minerales que puedan obstruir el condensador del "chiller".

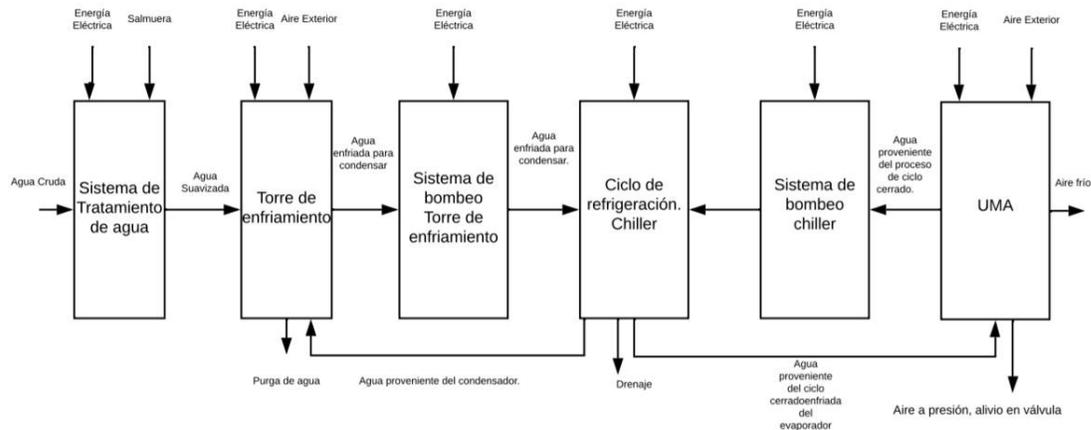


Figura 30. Diagrama Entrada Proceso Salida: Sistema de Enfriamiento

Variables más importantes del proceso

- Temperatura de aire frío: 23 a 25 °C
- Temperatura de agua fría para manejadoras: 7°C
- Temperatura de agua fría para condensador "chiller": 32°C
- Temperatura del aceite para arranque de compresor: 45°C
- Dureza del agua al condensador: 0-17 (ppm)
- pH del agua tratada entre 6.5 y 7.5

Equipos principales

- "Chiller".
- Torre de enfriamiento.
- Sistema de bombeo torre.
- Sistema de bombeo "chiller".
- Nanofiltración.
- Unidades manejadoras de aire.

Fases de funcionamiento del sistema de enfriamiento por cada sistema

A continuación, en las siguientes tablas se muestra a detalle las fases de funcionamiento del sistema de enfriamiento por cada subsistema, mencionando los dispositivos de seguridad y componentes que ayudan a tener una visión más amplia del contexto operacional al que están sometidos los equipos.

Tabla 15. Fase del funcionamiento del subsistema Chiller.

SUBSISTEMA	Chiller
MARCA/MODELO	DAIKIN, modelo WSC. 500 TR.
DESCRIPCION DEL PROCESO	<p>El “<i>chiller</i>” es el encargado de enfriar el agua por el que la manejadora de aire en los pasillos de producción pasará en el intercambiador de calor. Opera mediante un fluido refrigerante (R134A en este caso en particular) en estado líquido se fuerza hasta experimentar su presión para la evaporación bajándola en el sector del “<i>chiller</i>” conocido como evaporador, en la que toma el calor del agua con la que se pone en intercambio, es acá donde se produce el enfriamiento del agua que será bombeada.</p> <p>Una vez esto, el refrigerante en estado de vapor es comprimido por el compresor recorriendo el ciclo de refrigeración. A continuación, el vapor refrigerante es llevado al condensador en donde se torna líquido intercambiando el calor que extrajo en el evaporador con agua proveniente de la torre de enfriamiento.</p> <p>En resumen, en el evaporador extrae calor del agua el refrigerante, este vuelve vapor y es llevado bajo compresión al condensador, con quien libera calor ganado intercambiándolo con el agua fría, entonces podemos concluir que hay un movimiento de calor en este proceso.</p>
CONECTIVIDAD	Características del motor: 3/480 voltios/60Hz 343 HP
PARTES	<ul style="list-style-type: none">• Evaporador• Válvula de expansión• Condensador• Compresor• Bomba de aceite• Panel de control• Tablero de potencia

DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD

- Relé de sobreintensidad: Situado en el tablero de potencia, protege al compresor de sobreintensidad mayores a 500 A.
- Interruptor de alta presión: Instalado en el tubo de descarga de la unidad y mide la presión del condensador (salida del compresor). Ajustado en 130 psi.
- Interruptor de baja presión: Instalador en el tubo de succión de la unidad y mide la presión en el evaporador (entrada al compresor). Ajustado en 40 psi.
- Monitor de fase: Protege ante la ausencia una o más de sus fases, verifica el estado correcto de la secuencia de fases. Situado en tablero de control.
- Protección de descarga térmica: El protector térmico de descarga se activa cuando la temperatura del refrigerante que sale del compresor se eleva demasiado. Cuando esta temperatura vuelve a sus valores normales, el protector se reinicializa automáticamente, pero el controlador tiene que ser reinicializado manualmente.
- Contacto de interbloqueo: Para evitar que la unidad funcione sin agua.

Tabla 16. Fase del funcionamiento del subsistema Torre de enfriamiento.

SUBSISTEMA	Torre de enfriamiento
MARCA/MODELO	Torre de enfriamiento de tiro inducido marca TRANE.90 GLP.
DESCRIPCION DEL PROCESO	<p>El agua del circuito del condensador es llevada de nuevo a las torres, previamente se encuentra un sistema de tratamiento de agua para llevarla suavizada y evitar incrustaciones. El aire y agua se mueven la misma dirección a través del relleno, cayendo en el plano enfriada.</p>
CONECTIVIDAD	<p>Características del motor: 3/480 voltios/60Hz 15 HP</p>
PARTES	<ul style="list-style-type: none"> • Flotador • Plato • Relleno • Ventilador
DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD	<ul style="list-style-type: none"> • Monitor de fases: Protege al ventilador de la ausencia de una o más de sus fases eléctricas. • Flotador: Ubicado en el plato de la torre, evita rebalse de agua enfriada.

Tabla 17. Fase del funcionamiento del subsistema Bombeo Chiller.

SUBSISTEMA	Bombeo “chiller”
MARCA/MODELO	Wärtsilä
DESCRIPCION DEL PROCESO	
<p>Se cuenta con redundancia en el sistema de bombas centrifugas para mantenimiento. Cumple con la función de transportar el fluido mediante un motor eléctrico que mueve el impulsor a la velocidad de giro según su capacidad. A la salida del impulsor la velocidad del flujo es muy elevada, mientras que la velocidad del flujo a la salida de la bomba es muy inferior. En la voluta se recoge el flujo al tiempo que se reduce la velocidad del flujo y la presión aumenta.</p>	
CONECTIVIDAD	
<p>Características del motor: 3/480 voltios/60Hz 30 HP</p>	
PARTES	
<ul style="list-style-type: none"> • Impulsor • Terminales • Rodamientos • Válvula • Sello mecánico • Rodamientos 	
DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD	
<ul style="list-style-type: none"> • Monitor de fases: Protege al ventilador de la ausencia de una o más de sus fases eléctricas. • Protección sobreintensidades 60 A. • Arrancador suave. 	

Tabla 18. Fase del funcionamiento del subsistema Bombeo Torre.

SUBSISTEMA	Bombeo de Torre
MARCA/MODELO	Toshiba
DESCRIPCION DEL PROCESO	Bomba centrífuga. Cumple con la función de transportar el agua previamente enfriada en la torre de enfriamiento hacia el condensador del “ <i>chiller</i> ”, mediante motor eléctrico que mueve el impulsor a la velocidad de giro según su capacidad.
CONECTIVIDAD	Características del motor: 3/220 voltios/60Hz 2 HP
PARTES	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba • Motor • Terminales • Válvula
DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD	<ul style="list-style-type: none"> • Monitor de fases: Protege al ventilador de la ausencia de una o más de sus fases eléctricas. • Protección sobreintensidades 60 A. • Arrancador suave.

Tabla 19. Fase del funcionamiento del subsistema Tratamiento de agua.

SUBSISTEMA	Tratamiento de agua
MARCA/MODELO	ASME
DESCRIPCION DEL PROCESO	<p>55 pie³ de carbono activado Flujo normal: 165 galones/minuto Flujo pico: 275 galones/minuto</p>
CONECTIVIDAD	<p>Características del motor: 120 voltios/ 60 Hz</p>
PARTES	<ul style="list-style-type: none"> • Bomba del sistema (salmuera) • Tanque de carbono activado • Tanque de químicos • Mezclador • Membrana de nano filtración • Cisterna • Tablero de control • Válvula de control • Tanque suavizador o separador
DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD	<ul style="list-style-type: none"> • Monitor de fases: Protege al ventilador de la ausencia de una o más de sus fases eléctricas.

Tabla 20. Fase del funcionamiento del subsistema Unidades manejadoras de aire.

SUBSISTEMA	Unidades Manejadoras de Aire
MARCA/MODELO	McQuay/OAH065GDAC
DESCRIPCION DEL PROCESO	Las unidades manejadoras de aire reciben al serpentín el agua fría proveniente del evaporador del “chiller” y por medio del “blower” proveen aire fresco a los pisos de producción.
CONECTIVIDAD	Características del motor: 3/460 voltios/60 Hz
PARTES	<ul style="list-style-type: none"> • “Blower” • Serpentín • Filtro
DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD	<ul style="list-style-type: none"> • Guardamotor 15 Amperios • Contactor bobina A1 110 V

4.1.4 Implementación del análisis de modos y efectos de fallas (AMEF)

A continuación, se presentan extractos de los resultados relacionados con la aplicación del análisis de modos y efectos de falla (AMEF), los riesgos económicos asociados a cada modo de fallo, las actividades de mantenimiento propuestas, así como también la comparación entre los riesgos actuales y futuros para la toma de decisión entre ejecutar o no las actividades de mantenimientos propuestas. Lo anterior nos permite elaborar un plan de mantenimiento donde se optimizan los recursos ya que se hace uso de una comparación económica para la toma de decisiones.

Las etapas a continuación desglosadas incluyen:

- Modos y efectos de falla
- Cálculos de riesgo actual
- Actividades de Mantenimiento propuestas
- Comparación de riesgos y decisión
- Plan óptimo de Mantenimiento

Modos y efectos de falla

En la se muestra un extracto del Anexo C donde presentamos a los equipos y sus modos de falla más relevantes, así como también los efectos de esta. Entre los efectos se menciona la afectación a la Salud Higiene y Ambiente (SHA), si las fallas son evidentes o no para identificarlas, los efectos operacionales y las acciones correctivas necesarias para devolver la función al equipo.

Una aclaración importante es que, dado que el sistema de climatización de la planta manufacturera textil incorpora 6 unidades manejadoras de aire, para la presentación de resultados del Anexo C se muestra exclusivamente una de estas unidades, ya que sería impráctico plasmar los mismos modos de fallo, acciones correctivas y demás para las 6 unidades ya que estas son idénticas.

Tabla 21. Modos y efectos de falla.

Equipo	ID EQUIPO	Modo de falla	ID MF	Efecto de Falla
"Chiller"	CH	Circuito de tuberías de succión y descarga, uniones, accesorios	CH-01	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): No hay intercambio de calor Acción correctiva: Buscar y sellar fuga de refrigerante. Posteriormente recargar.
		Bomba de aceite	CH-02	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Incremento en temperatura del compresor haciendo que el sistema del "chiller" se proteja y deshabilite todas las funciones Acción correctiva: Sustitución de bomba de aceite
		Tarjeta electrónica, controlador	CH-03	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Paro total del sistema de "chiller" Acción correctiva: Sustitución de tarjeta electrónica dañada
		Válvula de expansión	CH-04	Evidente Si/No: No Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Pérdida de funcionamiento para la climatización del aire Acción correctiva: Sustitución de la válvula de expansión

Cálculos de riesgo actual

Para cada modo de falla y basándonos en la frecuencia de ocurrencia, los tiempos medios para reparar, el impacto económico a la producción y el impacto en la seguridad, higiene y ambiente (SHA), mostramos a continuación en la Tabla 22 un extracto del Anexo D que detalla el impacto económico esperado por la ocurrencia de cada modo de fallo bajo el contexto al que está sometida la planta manufacturera textil.

Tabla 22. Cálculos de riesgo actual.

Equipo	ID MF	Frecuencia de eventos por año (fallas/año)	TPPR (horas)	Imp. Prod. (\$/h)	Costos directos por falla (\$/falla)	Imp. SHA (\$/falla)	Riesgo económico actual (\$/año)
"Chiller"	CH-01	1	24	\$13,125	\$1,200	\$0	\$316,200
	CH-02	0.25	24	\$13,125	\$550	\$0	\$78,888
	CH-03	0.5	8	\$13,125	\$5,000	\$0	\$55,000
	CH-04	0.2	16	\$13,125	\$1,400	\$0	\$42,280

Actividades de Mantenimiento propuestas

Presentamos a continuación, luego de la identificación de los modos y efectos de falla, una serie de actividades de mantenimiento propuestas como resultado de la aplicación de la metodología RCM (mantenimiento centrado en confiabilidad). En la Tabla 23 se muestra un extracto del Anexo E donde

se detallan tanto las frecuencias de aplicación, los responsables de ejecución, la estrategia seleccionada y los costos estimados para la aplicación de dichas actividades de mantenimiento sobre una base anual. Posteriormente, la estimación de riesgos de la sección anterior servirá de base para la comparación contra el riesgo futuro luego de aplicar estas actividades de mantenimiento.

Tabla 23. Actividades de mantenimiento propuestas.

Equipo	ID MF	Estrategia de mantenimiento	ID Actividad de mantenimiento	Actividad de mantenimiento	Frecuencia de aplicación (Actividad/Año)	Responsable	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta (\$/año)
"Chiller"	CH-01	Mantenimiento preventivo	CH-01-01	Prueba e identificación de fugas, restauración de los sellos en uniones, etc.	1	Proveedor especialista	\$6,700
	CH-02	Basado en condición	CH-02-01	Inspección sensorial, toma de parámetros	52	Mecánico	\$130
	CH-03	Mantenimiento preventivo	CH-03-01	Mantenimiento con limpiador de contactos, termografía y medición de parámetros en varistores y resistencias	12	Técnico electricista	\$330
	CH-04	Mantenimiento preventivo	CH-04-01	Sustitución cíclica de la válvula	0.25	Técnico en refrigeración	\$360

Comparación de riesgos y decisión

Presentamos a continuación, en la Tabla 24, un extracto del Anexo F, donde se detalla una evaluación económica para cada modo de falla en donde se comparan los riesgos actuales contra los riesgos futuros por la aplicación de las actividades de mantenimiento descritas en la sección anterior. La diferencia económica entre los dos riesgos permite tomar la decisión entre la ejecución o no del mantenimiento propuesto para cada modo de falla. En la columna "Ahorro potencial" se muestra dicha diferencia, siendo los valores positivos los que indican una ejecución de las actividades y los valores negativos indicarían la no ejecución de las actividades.

Tabla 24. Comparación de riesgos y decisión.

Equipo	ID MF	Frecuencia esperada de eventos por año (fallas/año)	TPPR (horas)	Riesgo económico actual (\$/año)	Riesgo Futuro esperado (\$/año)	Ahorro potencial (\$/año)	Decisión
"Chiller"	CH-01	0.00	24	\$316,200	\$0	\$309,500	Hacer mantenimiento
	CH-02	0.2	24	\$78,888	\$63,110	\$15,648	Hacer mantenimiento
	CH-03	0.2	8	\$55,000	\$22,000	\$32,670	Hacer mantenimiento
	CH-04	0.2	16	\$42,280	\$42,280	-\$360	No hacer mantenimiento

Plan óptimo de Mantenimiento

Luego de sustraer las actividades que en la sección anterior evalúa como contraproducentes obtenemos el plan de mantenimiento optimizado bajo la metodología del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). Presentamos en la Tabla 25 un extracto del Anexo G donde se muestran las

actividades, sus frecuencias de aplicación, los responsables de ejecución y la estimación de costos relacionados a cada actividad para este plan óptimo de mantenimiento.

Tabla 25. Plan óptimo de mantenimiento.

Equipo	ID MF	ID Actividad de mantenimiento	Frecuencia de aplicación (Actividad/Año)	Responsable	Costo del plan óptimo de Mantto, anual (\$/año)
"Chiller"	CH-01	CH-01-01	1	Proveedor especialista	\$6,700
	CH-02	CH-02-01	52	Mecánico	\$130
	CH-03	CH-03-01	12	Técnico electricista	\$330

A nivel de resumen, se muestra en la Tabla 26, los valores económicos globales asociados a los riesgos económicos actuales, es decir, antes de proponer el plan optimizado de mantenimiento, también se muestran los costos de dicho plan propuesto, los riesgos económicos futuros con la implementación del plan propuesto y el ahorro potencial proyectado que trae la implementación de esta metodología. Nótese que los riesgos económicos actuales se ven disminuidos en gran medida, esto responde a que con la aplicación del mantenimiento propuesto se están previniendo aquellos modos de fallo que impactan gravemente al volumen de producción.

Tabla 26. Resumen económico de la aplicación de la metodología de mantenimiento centrado en confiabilidad

Riesgo económico actual (\$/año)	Costos del plan anual (\$/año)	Riesgo Futuro esperado (\$/año)	Ahorro potencial (\$/año)
\$1,306,981	\$19,735	\$390,276	\$896,970

5. CAPITULO V: Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- La metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad (por sus siglas en ingles RCM) ha permitido determinar y delimitar las tareas de mantenimiento necesarias para mantener a los activos en óptimo funcionamiento y así reducir la indisponibilidad en los sistemas que impactan los objetivos del negocio, generando una optimización de recursos y enfocarlos a aquellos que requieren mayor atención por los riesgos asociados a las paradas de planta y por ende pérdidas económicas. La metodología empleada es integral debido a que permite un abordaje más específico y detallado de los activos los cuales son sometidos a evaluación mediante criterios técnicos, previene fallos funcionales importantes y genera una cultura proactiva del mantenimiento enfocada en optimizar recursos asignando a los sistemas críticos de la organización.
- El análisis de criticidad es una herramienta que facilita la implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), esto debido a que delimita los equipos a los cuales es prioritario la implementación de dicha metodología, incorporando parámetros de manera objetiva los cuales son de interés para la compañía como la calidad, la seguridad, higiene, medio ambiente y costos operacionales, enfocando así los recursos de manera estratégica a los activos. Para la planta de manufactura textil se observó que el sistema de enfriamiento posee el equipo con mayor criticidad, por lo cual se le realizó el análisis enfocado en maximizar la disponibilidad de los equipos en dicho sistema.
- El análisis de modo y efecto de falla es una herramienta analítica clave para determinar las causas de las fallas y los efectos potenciales de estas, tratarlas, prevenirlas y eventualmente eliminarlas de forma sistemática, nos permite entender la forma en que opera el sistema y las razones por las que falla. Con este análisis se identificaron los modos de falla para el sistema de enfriamiento de la planta, se establecieron las consecuencias potencias de los diferentes modos de falla evidenciando riesgos de parada de planta. Con ello se establecieron las tareas de mantenimiento estratégicas para atender cada uno de estos modos de falla y poder realizar un plan de mantenimiento enfocado en la prevención y eliminación de estas.
- El desarrollo del plan de mantenimiento óptimo para la planta basado en confiabilidad se enfoca en aplicar actividades de mantenimiento según los modos de falla detectados acorde a su impacto. Lo anterior permite migrar de esquemas tradicionales, como correctivo a la falla o preventivos sistemáticos donde puede incurrir en un sobre mantenimiento, hacia una mezcla de estrategias de mantenimiento evaluadas desde la parte técnica y económica que permite no solo aumentar la disponibilidad de los equipos, sino que también optimizar el recurso económico.

5.2 Recomendaciones

- Para que la implementación de metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad sea exitosa es importante implementar la mejora continua a través de registrar cada modo y efecto de falla con el objetivo de generar una base de datos robusta que ayude a mejorar el análisis y toma de decisiones para ajustar el plan de mantenimiento anualmente. Para ello se sugiere codificar los modos de falla y hacer uso de un sistema digital que permita analizar de manera más eficiente la información registrada. Otra razón para revisar el plan de mantenimiento de forma anual es que las plantas de producción suelen realizar proyectos, mejoras o incorporación de activos nuevos lo cual genera un dinamismo en la gestión de dichos activos.
- Tomando como base la metodología del mantenimiento centrado en confiabilidad y su consecuente plan de mantenimiento, se sugiere elaborar un listado de repuestos importantes para mantenerlos en inventario y esto brindará la oportunidad de reducir los tiempos de mantenibilidad de los activos.
- Capacitar e involucrar al personal clave relacionado en los procesos estratégicos y de gestión de mantenimiento para fomentar una cultura de confiabilidad operacional en la planta, para que a su vez estos sean partícipes de las revisiones periódicas al plan de mantenimiento óptimo ante posibles cambios dentro de los sistemas.
- Se recomienda la adopción del árbol jerárquico y matriz de criticidad propuestos y continuar desarrollándolos a medida ocurra la incorporación de nuevos equipos y sistemas, así como también una revisión y actualización anual.

6. BIBLIOGRAFIA

Libros

- Parra, C. (2009). *Mantenimiento centrado en confiabilidad (MCC)*.
- Woodhouse, J. (1997). *Failure Modes and Effects Analysis* (5a edición, ed.). Woodhouse Partnership.
- Moubray, J. (1991). *RCM II: Reliability Centered Maintenance*. New York, USA: Industrial Press Inc.
- Parra, C., & Crespo, A. (2012). *Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos*.
- Jones, R. (1995). *Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach*. Houston: Gulf Publishing Company.

Trabajos de graduación

- Chiquillo, R., Fernández, C., & Ramos, E. (2021). *Desarrollo de un plan de mantenimiento centrado en confiabilidad e índices de eficiencia energética para el proceso de turbogeneración en la industria azucarera*. San Salvador.
- Cruz, M. A. (2017). *Diseño de una Plan de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad para Top Rolls en Vidrio Andino S.A.* Bogota D.C.: Universidad de Santo Tomas.

Sitios Web

- OTEXA. (2021). *otexa.trade.gov*. Recuperado el 15 de Enero de 2022, de https://otexa.trade.gov/topten/dol_ytd/cat1.htm
- Reserva, B. C. (s.f.). *www.bcr.gob.sv*. Recuperado el 30 de Enero de 2022, de <https://www.bcr.gob.sv/bcrsite/?cat=1012&lang=es>

Presentaciones

- Parra, C. (2020). *Análisis de Modos de Fallas, Efectos y Criticidad por Riesgo & Optimización de Planes de Mantenimiento*. Grupo CASSA, El Salvador.

ANEXOS

ANEXO A: Cálculo del impacto a la producción.

Producción semanal	250,000 Docenas por semana
Horas laboradas semanalmente	44 Horas
Costo por docena producida	\$2.10

De acuerdo a los datos anteriormente mostrados, el cálculo del costo de producción horaria es:

$$\left(\frac{250,000}{44}\right) \times 2.10 = 11,931.81 \left[\frac{\$}{h}\right]$$

Para la empresa una hora de parada productiva es considerada como una consecuencia razonable, mientras que la jornada laboral completa que consta de 9 horas es considerada intolerable, de esta manera se obtienen los siguientes rangos:

Pérdida por hora	Real	Redondeo
9 horas	\$ 107,386.36	\$ 110,000.00
5 horas	\$ 59,659.09	\$ 60,000.00
3 horas	\$ 35,795.45	\$ 36,000.00
1 hora	\$ 11,931.82	\$ 12,000.00

De esta manera se definió los criterios de impacto en producción siguientes:

Escala	Criterio	Impacto a la producción
5	Mayor a 9 horas	Costos superiores a \$120,000.00
4	Entre 5 horas y 9 horas	Costos entre \$60,000.00 y \$120,000.00
3	Entre 3 horas y 5 horas	Costos entre \$36,000.00 y \$60,000.00
2	Entre 1 hora y 3 horas	Costos entre \$12,000.00 y \$36,000.00
1	Menor a 1 hora	Costos menores a \$12,000.00

ANEXO B: Árbol jerárquico de equipos

Planta	Área	Sistema	Subsistema	Equipo
Manufacturera Textil				
	Exportación			
		Embalaje		
			Embalaje	
				Paletizadora 1
				Paletizadora 2
		Transporte de PT		
			Aduana	
				Montacarga de aduana 1
				Montacarga de aduana 2
				Montacarga de aduana 3
			Exportación	
				Montacarga de exportación 1
				Montacarga de exportación 2
				Montacarga de exportación 3
			Transporte manual de PT	
				Pallet Jack de salida 1
				Pallet Jack de salida 2
				Pallet Jack de salida 3
				Pallet Jack de salida 4
				Pallet Jack de salida 5
				Pallet Jack de salida 6
				Pallet Jack de salida 7
				Pallet Jack de salida 8
				Pallet Jack de salida 9
				Pallet Jack de salida 10

(Continuación de ANEXO B)

Planta	Área	Sistema	Subsistema	Equipo
Manufacturera Textil				
	Servicios e instalaciones			
		Sistema contra incendios		
			Sistema contra incendios	
				Bomba de emergencia
		Sistema de enfriamiento		
			Chiller	
				Chiller
			Manejadoras de aire	
				Unidad Manejadora de aire 1
				Unidad Manejadora de aire 2
				Unidad Manejadora de aire 3
				Unidad Manejadora de aire 4
				Unidad Manejadora de aire 5
				Unidad Manejadora de aire 6
				Unidad Manejadora de aire 7
			Sistema de bombeo chiller	
				Bomba chiller
				Motor
				Válvula
			Sistema de bombeo torre	
				Bomba torre
				Motor
				Válvula
			Sistema de tratamiento de agua	
				Nanofiltrador
			Torre de enfriamiento	
				Torre de enfriamiento

(Continuación de ANEXO B)

Planta	Área	Sistema	Subsistema	Equipo
Manufacturera Textil				
	Servicios e instalaciones			
		Sistema de suministro de energía eléctrica de respaldo		
			Plantas de emergencia	
				Planta de emergencia 1125 kVA
				Planta de emergencia 1875 kVA
				Planta de emergencia 360 kVA
		Suministro y distribución de energía eléctrica		
			Subestación 1	
				Regulador de voltaje 1 Sub1
				Regulador de voltaje 2 Sub 1
				Regulador de voltaje 3 Sub 1
				Tablero general 1
				Tablero general 2
				Transformador Padmount TXP1 1000 kVA
				Transformador Padmount TXP2 500 kVA
				Transformador seco TS-Cocina
				Transformador seco TS-MOD MAQ1
				Transformador seco TS-Oficinas
			Subestación 2	
				Regulador de voltaje 1 Sub2
				Regulador de voltaje 2 Sub2
				Regulador de voltaje 3 Sub2
				Tablero general 3
				Tablero general 4
				Transformador Padmount TXP4 500 kVA
				Transformador seco TS-MOD MAQ2
				Transformador TXP3 2000 kVA

(Continuación de ANEXO B)

Planta	Área	Sistema	Subsistema	Equipo
Manufacturera Textil				
	Servicios e instalaciones			
		Sistema de aire comprimido		
			Compresión de aire	
				Compresor de aire 1
				Compresor de aire 2
				Compresor de aire 3
				Compresor de aire 4
				Compresor de aire 5
				Compresor de aire 6
			Secado de aire	
				Filtro de humedad 1
				Filtro de humedad 2
				Filtro de humedad 3
				Filtro de humedad 4
				Filtro de humedad 5
				Filtro de humedad 6
				Filtro de partículas 1
				Filtro de partículas 2
				Filtro de partículas 3
				Filtro de partículas 4
				Filtro de partículas 5
				Filtro de partículas 6
				Secador 1
				Secador 2
				Secador 3
				Secador 4
				Secador 5
				Secador 6
				Tanque húmedo 1
				Tanque húmedo 2
				Trampa de agua 1
				Trampa de agua 2
				Trampa de agua 3
				Trampa de agua 4
				Trampa de agua 5
				Trampa de agua 6

(Continuación de ANEXO B)

Planta	Área	Sistema	Subsistema	Equipo
Manufacturera Textil				
	Recepción y almacenamiento			
		Transporte de MP		
			Almacenamiento de MP	
				Montacarga de bodega 1
				Montacarga de bodega 2
				Montacarga de bodega 3
				Montacarga de bodega 4
				Montacarga de bodega 5
				Montacarga de bodega 6
				Panel de control magnético
			Centro de carga	
				Cambiador de batería
				Cargador de batería
			Descarga de MP	
				Montacarga de descarga 1
				Montacarga de descarga 2
				Montacarga de descarga 3
			Distribución de MP	
				Montacarga de servicio 1
				Montacarga de servicio 2
				Montacarga de servicio 3
				Montacarga de servicio 4
				Montacarga de servicio 5
				Montacarga de servicio 6
			Transporte manual de MP	
				Pallet Jack de entrada 1
				Pallet Jack de entrada 2
				Pallet Jack de entrada 3
				Pallet Jack de entrada 4
				Pallet Jack de entrada 5
				Pallet Jack de entrada 6
				Pallet Jack de entrada 7
				Pallet Jack de entrada 8
				Pallet Jack de entrada 9
				Pallet Jack de entrada 10

ANEXO C: Modos y efectos de falla.

Equipo	ID EQUIPO	Modo de falla	ID MF	Efecto de Falla
Chiller	CH	Circuito de tuberías de succión y descarga, uniones, accesorios	CH-01	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): No hay intercambio de calor Acción correctiva: Buscar y sellar fuga de refrigerante. Posteriormente recargar.
		Bomba de aceite	CH-02	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Incremento en temperatura del compresor haciendo que el sistema del "chiller" se proteja y deshabilite todas las funciones Acción correctiva: Sustitución de bomba de aceite
		Tarjeta electrónica, controlador	CH-03	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Paro total del sistema de "chiller" Acción correctiva: Sustitución de tarjeta electrónica dañada
		Válvula de expansión	CH-04	Evidente Si/No: No Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Pérdida de funcionamiento para la climatización del aire Acción correctiva: Sustitución de la válvula de expansión
Torre de enfriamiento	TE	Relleno de la torre (obstruido)	TE-01	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Aumenta la temperatura por pérdida de eficiencia en intercambio de calor Acción correctiva: Purgar torre de enfriamiento y realizar limpieza
		Motor de la torre de enfriamiento (Sobrecalentamiento de bobina)	TE-02	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Aumenta la temperatura del agua considerablemente Acción correctiva: Rebobinar motor o sustituir
		Plato de torre	TE-03	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Pérdida de agua en el sistema de enfriamiento Acción correctiva: Sellar plato de torre
Unidad manejadora de aire #1	UMA1	Filtro de manejadora	UMA-01	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): No hay flujo de aire dentro del piso de producción Acción correctiva: Limpieza o cambio de filtro
		Correa de ventilador	UMA-02	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Incremento de temperatura por falta de aire en piso de producción Acción correctiva: Sustitución de correa
		Motor de ventilador	UMA-03	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Incremento de temperatura por falta de aire en piso de producción Acción correctiva: Rebobinar motor o sustitución
		Serpentín	UMA-04	Evidente / No evidente: No Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): No hay intercambio de calor por tanto el aire no enfría Acción correctiva: Limpieza de serpentín

(Continuación de ANEXO C)

Equipo	ID EQUIPO	Modo de falla	ID MF	Efecto de Falla
Sistema de bombeo torre de enfriamiento	BT	Motor	BT-01	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Paro de bomba Acción correctiva: Rebobinado o sustitución del motor
		Eje de bomba	BT-02	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Se interrumpe la función total del sistema de bombeo Acción correctiva: Fabricar y sustituir eje
		Rodamientos	BT-03	Evidente Si/No: No Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Paro de bomba Acción correctiva: Sustitución de rodamientos
		Sello mecánico	BT-04	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Paro de bomba Acción correctiva: Rebobinado o sustitución del motor
		Impulsor	BT-05	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): No hay flujo de agua para el intercambio de calor Acción correctiva: Reparación o sustitución de impulsor
Sistema de bombeo "chiller"	BCH	Motor	BCH-01	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Paro de bomba Acción correctiva: Rebobinado o sustitución del motor
		Eje de bomba	BCH-02	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Se interrumpe la función total del sistema de bombeo Acción correctiva: Fabricar y sustituir eje
		Rodamientos	BCH-03	Evidente Si/No: No Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Paro de bomba Acción correctiva: Sustitución de rodamientos
		Sello mecánico	BCH-04	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Paro de bomba Acción correctiva: Rebobinado o sustitución del motor
		Impulsor	BCH-05	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): No hay flujo de agua para el intercambio de calor Acción correctiva: Reparación o sustitución de impulsor
Sistema de tratamiento de agua	STA	Membranas	STA-01	Evidente Si/No: No Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Bloqueo de membranas generando paro de producción de agua en la planta de nanofiltración Acción correctiva: Sustitución de membranas
		Válvula de control	STA-02	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): Paro en el sistema de tratamiento de agua por diferencias de presiones Acción correctiva: Sustitución de válvula dañada
		Bomba del sistema	STA-03	Evidente Si/No: Si Afecta SHA: NO Efecto operacional (síntomas): No hay flujo de agua tratada para el sistema de enfriamiento en el "chiller" Acción correctiva: Sustitución de bomba quemada

ANEXO D: Cálculos de riesgo actual.

Equipo	ID MF	Frecuencia de eventos por año (fallas/año)	TPPR (horas)	Imp. Prod. (\$/h)	Costos directos por falla (\$/falla)	Imp. SHA (\$/falla)	Riesgo económico actual (\$/año)
Chiller	CH-01	1	24	\$13,125	\$1,200	\$0	\$316,200
	CH-02	0.25	24	\$13,125	\$550	\$0	\$78,888
	CH-03	0.5	8	\$13,125	\$5,000	\$0	\$55,000
	CH-04	0.2	16	\$13,125	\$1,400	\$0	\$42,280
Torre de enfriamiento	TE-01	1.0	8	\$13,125	\$500	\$0	\$105,500
	TE-02	0.2	24	\$13,125	\$600	\$0	\$63,120
	TE-03	0.125	16	\$13,125	\$750	\$0	\$26,344
Unidad manejadora de aire #1	UMA-01	4	2	\$0	\$150	\$0	\$600
	UMA-02	0.5	1	\$0	\$100	\$0	\$50
	UMA-03	0.2	24	\$0	\$750	\$0	\$150
	UMA-04	3	4	\$0	\$100	\$0	\$300
Sistema de bombeo torre de enfriamiento	BT-01	0.2	24	\$13,125	\$850	\$0	\$63,170
	BT-02	0.1	16	\$13,125	\$1,000	\$0	\$21,100
	BT-03	1	3	\$13,125	\$300	\$0	\$39,675
	BT-04	2	3	\$13,125	\$50	\$0	\$78,850
	BT-05	0.2	16	\$13,125	\$550	\$0	\$42,110
Sistema de bombeo "chiller"	BCH-01	0.2	24	\$13,125	\$850	\$0	\$63,170
	BCH-02	0.1	16	\$13,125	\$1,000	\$0	\$21,100
	BCH-03	1	3	\$13,125	\$300	\$0	\$39,675
	BCH-04	2	3	\$13,125	\$50	\$0	\$78,850
	BCH-05	0.2	16	\$13,125	\$550	\$0	\$42,110
Sistema de tratamiento de agua	STA-01	0.125	16	\$0	\$12,000	\$0	\$1,500
	STA-02	0.2	6	\$13,125	\$1,200	\$0	\$15,990
	STA-03	0.5	16	\$13,125	\$1,500	\$0	\$105,750

ANEXO E: Actividades de mantenimiento propuestas.

Equipo	ID MF	Estrategia de mantenimiento	ID Actividad de mantenimiento	Actividad de mantenimiento	Frecuencia de aplicación (Actividad/Año)	Responsable	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta (\$/año)
Chiller	CH-01	Mantenimiento preventivo	CH-01-01	Prueba e identificación de fugas, restauración de los sellos en uniones, etc.	1	Proveedor especialista	\$6,700
	CH-02	Basado en condición	CH-02-01	Inspección sensorial, toma de parámetros	52	Mecánico	\$130
	CH-03	Mantenimiento preventivo	CH-03-01	Mantenimiento con limpiador de contactos, termografía y medición de parámetros en varistores y resistencias	12	Técnico electricista	\$330
	CH-04	Mantenimiento preventivo	CH-04-01	Sustitución cíclica de la válvula	0.25	Técnico en refrigeración	\$360
Torre de enfriamiento	TE-01	Mantenimiento preventivo	TE-01-01	Limpieza periódica y aplicación de alguicidas. Realizar limpieza de ser necesario	26	Mecánico	\$4,420
	TE-02	Basado en condición	TE-02-01	Realizar mediciones y análisis de amperajes y temperatura, realizar reajuste en terminales y borneras, realizar limpieza de borneras, realizar limpieza externa de equipo, realizar verificación de protecciones eléctricas	52	Técnico electricista	\$1,170
	TE-03	Basado en condición	TE-03-01	Inspección visual de fugas de agua (fisuras, rupturas) en plato de torre; de ser necesario planificar reparación	52	Mecánico	\$33
Unidad manejadora de aire #1	UMA-01	Mantenimiento preventivo	UMA-01-01	Limpieza de filtros	26	Técnico en refrigeración	\$377
	UMA-02	Mantenimiento preventivo	UMA-02-01	Cambio periódico de correas	1	Técnico en refrigeración	\$11
	UMA-03	Basado en condición	UMA-03-01	Realizar mediciones y análisis de amperajes y temperatura, realizar reajuste en terminales y borneras, realizar limpieza de borneras, realizar limpieza externa de equipo	52	Técnico electricista	\$390
	UMA-04	Mantenimiento preventivo	UMA-04-01	Limpieza con desincrustante de ácido concentrado	12	Técnico en refrigeración	\$150

(Continuación de ANEXO E)

Equipo	ID MF	Estrategia de mantenimiento	ID Actividad de mantenimiento	Actividad de mantenimiento	Frecuencia de aplicación (Actividad/Año)	Responsable	Costos directos de la actividad de Mantenimiento propuesta (\$/año)
Sistema de bombeo torre de enfriamiento	BT-01	Basado en condición	BT-01-01	Realizar mediciones y análisis de amperajes y temperatura Realizar reajuste en terminales y borneras Realizar limpieza de borneras Realizar limpieza externa de equipo	52	Técnico electricista	\$130
	BT-02	Basado en condición	BT-02-01	Análisis de vibraciones	12	Técnico mecánico	\$15
	BT-03	Basado en condición	BT-03-01	Análisis de vibraciones	12	Técnico mecánico	\$15
	BT-04	Mantenimiento correctivo	BT-04-01	Rediseño, selección de un mejor sello mecánico	0.33	Mecánico	\$51
	BT-05	Basado en condición	BT-05-01	Inspección visual, revisión superficial y búsqueda de ruidos anormales	52	Mecánico	\$130
Sistema de bombeo "chiller"	BCH-01	Basado en condición	BCH-01-01	Realizar mediciones y análisis de amperajes y temperatura Realizar reajuste en terminales y borneras Realizar limpieza de borneras Realizar limpieza externa de equipo	52	Técnico electricista	\$130
	BCH-02	Basado en condición	BCH-02-01	Análisis de vibraciones	12	Técnico mecánico	\$15
	BCH-03	Basado en condición	BCH-03-01	Análisis de vibraciones	12	Técnico mecánico	\$15
	BCH-04	Mantenimiento correctivo	BCH-04-01	Rediseño, selección de un mejor sello mecánico	0.33	Mecánico	\$51
	BCH-05	Basado en condición	BCH-05-01	Inspección visual, revisión superficial y búsqueda de ruidos anormales	52	Mecánico	\$130
Sistema de tratamiento de agua	STA-01	Basado en condición	STA-01-01	Monitoreo de presión del sistema de nanofiltración y cambio oportuno de las membranas.	52	Personal externo especialista	\$33
	STA-02	Mantenimiento correctivo	STA-02-01	Sustitución a la falla	0.2	Personal externo especialista	\$243
	STA-03	Basado en condición	STA-03-01	Inspección visual, medición de parámetros eléctricos y termografía	52	Técnico electricista	\$65

ANEXO F: Comparación de riesgos y decisión.

Equipo	ID MF	Frecuencia esperada de eventos por año (fallas/año)	TPPR (horas)	Riesgo económico actual (\$/año)	Riesgo Futuro esperado (\$/año)	Ahorro potencial (\$/año)	Decisión
Chiller	CH-01	0.00	24	\$316,200	\$0	\$309,500	Hacer mantenimiento
	CH-02	0.2	24	\$78,888	\$63,110	\$15,648	Hacer mantenimiento
	CH-03	0.2	8	\$55,000	\$22,000	\$32,670	Hacer mantenimiento
	CH-04	0.2	16	\$42,280	\$42,280	-\$360	No hacer mantenimiento
Torre de enfriamiento	TE-01	0.20	8	\$105,500	\$21,100	\$79,980	Hacer mantenimiento
	TE-02	0.1	24	\$63,120	\$31,560	\$30,390	Hacer mantenimiento
	TE-03	0.125	16	\$26,344	\$26,344	-\$33	No hacer mantenimiento
Unidad manejadora de aire #1	UMA-01	0	2	\$600	\$0	\$223	Hacer mantenimiento
	UMA-02	0	1	\$50	\$0	\$39	Hacer mantenimiento
	UMA-03	0.0	24	\$150	\$0	-\$240	No hacer mantenimiento
	UMA-04	0	4	\$300	\$0	\$150	Hacer mantenimiento
Sistema de bombeo Torre de enfriamiento	BT-01	0.1	24	\$63,170	\$31,585	\$31,455	Hacer mantenimiento
	BT-02	0	16	\$21,100	\$0	\$21,085	Hacer mantenimiento
	BT-03	0	3	\$39,675	\$0	\$39,660	Hacer mantenimiento
	BT-04	0.25	3	\$78,850	\$9,856	\$68,943	Hacer mantenimiento
	BT-05	0.1	16	\$42,110	\$21,055	\$20,925	Hacer mantenimiento
Sistema de bombeo "chiller"	BCH-01	0.1	24	\$63,170	\$31,585	\$31,455	Hacer mantenimiento
	BCH-02	0	16	\$21,100	\$0	\$21,085	Hacer mantenimiento
	BCH-03	0	3	\$39,675	\$0	\$39,660	Hacer mantenimiento
	BCH-04	0.25	3	\$78,850	\$9,856	\$68,943	Hacer mantenimiento
	BCH-05	0.1	16	\$42,110	\$21,055	\$20,925	Hacer mantenimiento
Sistema de tratamiento de agua	STA-01	0.05	16	\$1,500	\$600	\$868	Hacer mantenimiento
	STA-02	0.2	6	\$15,990	\$15,990	-\$243	No hacer mantenimiento
	STA-03	0.2	16	\$105,750	\$42,300	\$63,385	Hacer mantenimiento

ANEXO G: Plan óptimo de mantenimiento.

Equipo	ID MF	ID Actividad de mantenimiento	Frecuencia de aplicación (Actividad/Año)	Responsable	Costo del plan óptimo de Mantto, anual (\$/año)
Chiller	CH-01	CH-01-01	1	Proveedor especialista	\$6,700
	CH-02	CH-02-01	52	Mecánico	\$130
	CH-03	CH-03-01	12	Técnico electricista	\$330
Torre de enfriamiento	TE-01	TE-01-01	26	Mecánico	\$4,420
	TE-02	TE-02-01	52	Técnico electricista	\$1,170
Unidad manejadora de aire #1	UMA-01	UMA-01-01	26	Técnico en refrigeración	\$377
	UMA-02	UMA-02-01	1	Técnico en refrigeración	\$11
	UMA-04	UMA-04-01	12	Técnico en refrigeración	\$150
Sistema de bombeo Torre de enfriamiento	BT-01	BT-01-01	52	Técnico electricista	\$130
	BT-02	BT-02-01	12	Técnico mecánico	\$15
	BT-03	BT-03-01	12	Técnico mecánico	\$15
	BT-04	BT-04-01	0.33	Mecánico	\$51
	BT-05	BT-05-01	52	Mecánico	\$130
Sistema de bombeo "chiller"	BCH-01	BCH-01-01	52	Técnico electricista	\$130
	BCH-02	BCH-02-01	12	Técnico mecánico	\$15
	BCH-03	BCH-03-01	12	Técnico mecánico	\$15
	BCH-04	BCH-04-01	0.33	Mecánico	\$51
	BCH-05	BCH-05-01	52	Mecánico	\$130
Sistema de tratamiento de agua	STA-01	STA-01-01	52	Personal externo especialista	\$33
	STA-03	STA-03-01	52	Técnico electricista	\$65