Mejora del proceso de producción de la inyectora Welltec 190 SE II mediante el análisis de fallas potenciales y el desarrollo de un plan de mantenimiento que aumente el indicador de disponibilidad

Joseph David Molina Peña

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director
Paula Andrea Cuervo Velázquez
Doctorado en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Programa Académico de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga
2026

Dedicatoria

A **Dios**, por acompañarme en cada paso de este camino, por darme fortaleza cuando las fuerzas parecían faltar y por permitirme llegar hasta este momento. A Él encomiendo también los caminos que están por comenzar.

A mis **padres**, por ser el fundamento de todo lo que soy. Por sus sacrificios, su amor, sus consejos y por creer en mí incluso cuando el camino se hizo difícil. Este logro es también fruto de todo lo que ustedes han hecho por mí y, por eso, les pertenece tanto como a mí.

A mi querido **mentor**, quien fue como un segundo padre y una guía durante una parte muy importante de mi vida, por las enseñanzas que trascendieron lo académico y por dejar en mí principios y recuerdos que seguirán acompañándome. Aunque hoy no pueda compartir contigo este momento, quiero que estas páginas también lleven parte de aquello que sembraste en mí.

A mi **novia**, por caminar a mi lado durante esta etapa, por acompañarme en cada logro y en cada dificultad, por su paciencia, amor y apoyo incondicional.

A ustedes, que de diferentes maneras fueron parte de este sueño, **dedico con todo mi corazón este logro, que hoy marca el final de una etapa y el comienzo de todo lo que está por venir.**

Agradecimientos

A la **Universidad Industrial de Santander**, por brindarme durante estos años los conocimientos, espacios y oportunidades que contribuyeron a mi formación como ingeniero.

A la **ingeniera Paula Andrea Cuervo Velázquez y al ingeniero Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra**, gracias por su orientación, acompañamiento, confianza y por compartir sus conocimientos, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo y para mi formación profesional.

A **Metalcort Ingeniería S.A.S.** y a todas las personas que me acompañaron durante esta etapa, gracias por la confianza, las enseñanzas y la oportunidad de enfrentarme al mundo laboral.

A mis **padres**, gracias por su amor, sacrificios, apoyo incondicional y por creer en mí durante todo este proceso. Este título lleva mi nombre, pero también representa todo lo que ustedes hicieron para que pudiera llegar hasta aquí. **Este logro también es de ustedes.**

A mi querido y **difunto pastor**, quien fue como un segundo padre y un mentor para mí, gracias por cada consejo, enseñanza y palabra de ánimo. Me habría gustado poder compartir contigo este momento y decirte: "**Lo logré"**. Aunque ya no estés aquí, tu legado y tus enseñanzas permanecen conmigo.

A mi **novia**, gracias por acompañarme en cada etapa de mi carrera y durante mi periodo de prácticas; por tu paciencia, cariño y apoyo en los días buenos y en los difíciles. Gracias por creer en mí y caminar a mi lado durante este proceso.

Finalmente, gracias a **familiares, amigos, compañeros, profesores y a todas las personas que hicieron parte de este sueño**. Cada palabra, enseñanza, oportunidad y gesto de apoyo contribuyó a que hoy pueda cerrar esta etapa con orgullo y gratitud.

A todos ustedes, gracias. Este logro también es suyo.

Tabla de Contenido

Pág.

Introducción 10
1. Planteamiento del problema 12
2. Objetivos 14
2.1 Objetivo General 14
2.2 Objetivos Específicos 14
3. Marco Teórico 15
3.1 Estado del arte 15
3.1.1 Mantenimiento en máquinas inyectoras de plástico 15
3.1.2 Mantenimiento e industria del plástico 16
3.2 Base teórica 17
4. Metalcort Soluciones de Ingeniería S.A.S. 23
4.1 Misión 23
4.2 Visión 23
4.3 Contextualización de los activos para mantenimiento 23
4.3.1 Activos de apoyo de relevancia operacional 27
4.4 Importancia estratégica de la línea de inyección 28
4.5 Diagnóstico del departamento de mantenimiento 29
4.6 Diagnóstico del equipo 30
4.6.1 Hallazgos de la inspección directa 32
4.6.2 Cultura de mantenimiento actual 34
4.6.3 Inventario de repuestos existente antes del proyecto 34
4.6.4 Dependencia de equipos auxiliares 35
5. Resultados 35
5.1 Taxonomía y codificación ISO 14224 de la inyectora 35
5.2 Diagnóstico del equipo: historial de fallas y disponibilidad operativa 37
5.3 Matriz FMECA y matriz de decisión RCM 45
5.3.1 Matriz FMECA 45

5.3.2 Matriz de decisión RCM 48
5.4 Plan de mantenimiento, rutas de mantenimiento e inventario de repuestos 51
5.4.1 Plan de mantenimiento 51
5.4.2 Rutas de mantenimiento 52
5.4.3 Inventario de repuestos 53
5.4.4 Integración de herramientas para la gestión del mantenimiento 55
6. Conclusiones 62
7. Recomendaciones 65
Referencias Bibliográficas 67

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Resumen de la taxonomía y codificación ISO 14224 de la inyectora Welltec 190 SE II 36
Tabla 2. Historial de fallas correctivas de la inyectora Welltec 190 SE II (2019-2025) 39
Tabla 3. Distribución de los modos de falla evaluados en la Matriz FMECA, por sistema 45
Tabla 4. Escala de valoración de Severidad, Ocurrencia y Detección empleada en la Matriz FMECA 46
Tabla 5. Los 10 modos de falla de mayor criticidad de la Matriz FMECA 47
Tabla 6. Secuencia de decisión RCM aplicada a los modos de falla 49
Tabla 7. Resultado de la matriz de decisión RCM por política de mantenimiento 50
Tabla 8. Tareas descartadas de la matriz de decisión (política T5) 50
Tabla 9. Distribución de tareas del plan de mantenimiento por responsable de ejecución 51
Tabla 10. Distribución de las entradas de ruta de mantenimiento por frecuencia 52
Tabla 11. Distribución del inventario de repuestos por clasificación VED 53
Tabla 12. Repuestos vitales de mayor criticidad del inventario 54

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Jerarquía taxonómica según ISO 14224 19
Figura 2. Jerarquía taxonómica de los activos de Metalcort según ISO 14224 26
Figura 3. Línea de producción de inyección de Metalcort 27
Figura 4. Compresor de la bodega principal de Metalcort Ingeniería S.A.S. 28
Figura 5. Subsistemas de la máquina inyectora 31
Figura 6. Ficha técnica elaborada de la máquina inyectora 31
Figura 7. Evidencia de guía de desplazamiento del carro de inyección rayada 32
Figura 8. Suciedad acumulada en zona de cierre de molde 33
Figura 9. Residuos de grasa y aceite acumulados en la base de la inyectora 33
Figura 10. Acumulación de polvo sobre la superficie de las guardas de la inyectora 34
Figura 11. Codificación interna previa del equipo 35
Figura 12. Muestra de orden de trabajo proporcionada por IMOCOM 37
Figura 13. Disponibilidad semanal estimada de la inyectora Welltec 190 SE II según el historial de intervenciones de 2019-2025. 42
Figura 14. Distribución de las horas de parada documentadas por sistema de la inyectora Welltec 190 SE II. 43
Figura 15. Extracto de la Matriz FMECA del sistema hidráulico 55
Figura 16. Plan de mantenimiento de la inyectora Welltec 190 SE II 58
Figura 17. Rutas de mantenimiento diaria y semanal 58
Figura 18. Inventario de repuestos y consumibles de la inyectora Welltec 190 SE II 59
Figura 19. Verificación de especificaciones pendientes del inventario de repuestos 59

Resumen

Título: Mejora del proceso de producción de la inyectora Welltec 190 SE II mediante el análisis de fallas potenciales y el desarrollo de un plan de mantenimiento que aumente el indicador de disponibilidad[*]

Autor: Joseph David Molina Peña[**]

Palabras Clave: Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM), FMECA, disponibilidad operativa, plan de mantenimiento preventivo, inyección de plásticos

Descripción: Este proyecto desarrolla un plan de mantenimiento preventivo para la inyectora Welltec 190 SE II de Metalcort Ingeniería S.A.S., empresa del sector metalmecánico cuyo activo crítico de producción es dicha máquina, mediante la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), conforme a los estándares SAE JA1011 y SAE JA1012. Para esto, se construyó primero la taxonomía jerárquica de la inyectora bajo la norma ISO 14224, codificando 40 componentes en sus respectivos sistemas hidráulico, eléctrico, de control electrónico, de refrigeración, entre otros. A partir de esta taxonomía y del historial de fallas correctivas registrado por IMOCOM entre 2019 y 2025, se elaboró una Matriz de Análisis de Modos, Efectos y Criticidad de Fallas (FMECA), identificando 69 modos de falla y calculando su Número de Prioridad de Riesgo (NPR); el 36 % de los modos superó el umbral crítico establecido, concentrados principalmente en los sistemas hidráulico y de refrigeración. Con esta información se aplicó la lógica de decisión RCM, clasificando cada modo según sus consecuencias de seguridad, ambientales, operacionales o no operacionales, y seleccionando la política de mantenimiento técnicamente viable y rentable para cada uno; de ahí resultaron 63 tareas proactivas y 6 tareas descartadas. Estas tareas se organizaron en rutas de mantenimiento por frecuencia y responsable, se documentaron en hojas de trabajo estandarizadas por sistema, y se vincularon a un inventario de 42 repuestos y consumibles clasificados bajo el criterio VED, del cual el 55 % se catalogó como vital. Adicionalmente, se calculó la disponibilidad operativa de la inyectora sobre una base semanal (93,18 %), como indicador para la planificación del programa de mantenimiento frente a la demanda de producción, que puede presentarse en cualquier momento. Con este trabajo se logró construir un proceso RCM riguroso y trazable a partir de información escasa, dejando además una herramienta de gestión de mantenimiento que puede replicarse en otros activos de la empresa.

---

[*] Trabajo de Grado

[**] Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Paula Andrea Cuervo Velázquez, Doctorado en Ingeniería Mecánica.

Abstract

Title: Production process improvement of the Welltec 190 SE II injection molding machine through potential failure analysis and the development of a maintenance plan to increase the availability indicator*

Author: Joseph David Molina Peña**

Key Words: Reliability-centered maintenance (RCM), FMECA, operational availability, preventive maintenance plan, plastic injection molding

Description: This project develops a preventive maintenance plan for the Welltec 190 SE II injection molding machine at Metalcort Ingeniería S.A.S., a company in the metal-mechanic sector whose critical production asset is this machine, using the Reliability-Centered Maintenance (RCM) methodology, in accordance with the SAE JA1011 and SAE JA1012 standards. To do this, the machine's hierarchical taxonomy was built first under the ISO 14224 standard, coding 40 components within their respective systems (hydraulic, electrical, electronic control, cooling, among others). Based on this taxonomy and on the corrective-failure history recorded by IMOCOM between 2019 and 2025, a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) matrix was developed, identifying 69 failure modes and calculating their Risk Priority Number (RPN); 36% of the modes exceeded the established critical threshold, concentrated mainly in the hydraulic and cooling systems. With this information, the RCM decision logic was applied, classifying each failure mode according to its consequences (safety, environmental, operational or non-operational) and selecting the technically feasible and cost-effective maintenance policy for each one; this resulted in 63 proactive tasks and 6 discarded tasks. These tasks were organized into maintenance routes by frequency and responsible party, documented in standardized work sheets by system, and linked to an inventory of 42 spare parts and consumables classified under the VED criterion, of which 55% were rated as vital. Additionally, the machine's operational availability was calculated on a weekly basis (93.18%), as an indicator for planning the maintenance program against production demand, which can arise at any time. This work made it possible to build a rigorous and traceable RCM process from scarce information, leaving in addition a maintenance management tool that can be replicated for other assets of the company.

---

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Paula Andrea Cuervo Velázquez, PhD in Mechanical Engineering.

Introducción

Después de la revolución industrial, el mantenimiento ha sido parte fundamental en la industria y ha ido evolucionando a lo largo de la historia. En la actualidad, se puede pensar que el mantenimiento reactivo es una práctica del pasado, sin embargo, podemos darnos cuenta de que es la realidad de muchas empresas. Esta práctica además de producir costos elevados en reparaciones de emergencia causa un deterioro de la maquinaria, una baja en la calidad del producto terminado que incluso en ocasiones puede llegar a poner a la empresa en desventaja frente a la competencia.

Metalcort Ingeniería S.A.S. es una empresa perteneciente al sector metalmecánico, petrolero y de la construcción. Su propósito es brindar soluciones de ingeniería con manufactura de primer nivel. En esta empresa, aunque ya se tenía una estructura de mantenimiento, se encontraba en abandono por parte del personal, solo se registraban algunos de los mantenimientos correctivos por parte de terceros y como no cuentan con técnicos de mantenimiento en su nómina, dependen en gran medida del personal técnico externo, por lo que el mantenimiento preventivo es casi inexistente bajo el modelo actual.

Aunque esta empresa principalmente destaca en el sector metalmecánico, su negocio estratégico está en su bodega de inyección de plásticos, con la inyectora Welltec 190 SE II la cual representa el activo crítico de la compañía y, además, es la fuente de mayor ingreso.

Este proyecto nace con el objetivo de desarrollar un plan de mantenimiento preventivo para la inyectora Welltec 190 SE II, mediante el análisis de fallas potenciales y la definición de un inventario de repuestos, para asegurar la disponibilidad operativa del proceso de producción. Para llevarlo a cabo, se estructura un diagnóstico del equipo basado en la norma ISO 14224 y se

aplica un Análisis de Modos, Efectos y Criticidad de Fallas (FMECA) sobre sus componentes críticos. Luego mediante una matriz de confiabilidad se traducen los resultados en un plan de mantenimiento y un inventario de repuestos priorizado por criticidad.

1. Planteamiento del problema

En la actualidad, la empresa Metalcort depende financiera y operativamente de su línea de producción principal, con la máquina inyectora de plásticos Welltec 190 SE II la cual representa la mayor fuente de ingresos de la compañía. Este equipo constituye el activo físico más crítico de la planta, su impacto en la rentabilidad y en el flujo de caja es tan grande que la empresa podría sostenerse casi en su totalidad solo con la producción de este activo.

Aunque la importancia estratégica de la inyectora es tan grande, la empresa está en una situación crítica debido a que no hay una gestión de activos estructurada y, además, una cultura de mantenimiento en su mayoría reactiva. Hoy en día, el mantenimiento de la empresa se lleva a cabo bajo un enfoque correctivo, interviniendo el equipo únicamente cuando ya ha fallado y la máquina ha quedado total o parcialmente inoperante.

Esta dinámica ha llevado una serie de consecuencias que amenazan la estabilidad económica de la empresa. Cada falla inesperada de la inyectora inmediatamente se convierte en paradas de producción no planificadas, lo que ocasiona que se comprometan los ingresos y las entregas a los clientes. Además de esto, la empresa constantemente tiene gastos operativos significativos y no presupuestados para pagar mano de obra externa, pagarle horas extras a los trabajadores y para la compra apresurada de repuestos, algunos son de importación, por lo que pueden tardar incluso meses en llegar.

Al ser la inyectora el activo de mayor peso económico, cada hora que pasa fuera de servicio representa una pérdida de capital que el modelo de mantenimiento actual no logra controlar, lo que nos lleva a hacernos la siguiente pregunta: ¿puede el diseño de un plan de mantenimiento, fundamentado en el análisis de fallas potenciales, mitigar los mantenimientos

correctivos de emergencia y mejorar la disponibilidad operativa de la inyectora Welltec 190 SE II en Metalcort?

Este proyecto pretende dar respuesta a la necesidad crítica de blindar la producción mediante la implementación de mantenimiento preventivo para asegurar la disponibilidad. Al ser la máquina que más ingresos genera, su disponibilidad no es negociable. La aplicación de herramientas y estrategias como FMECA para priorizar actividades de mantenimiento permitirán anticipar y reducir las fallas antes de que se conviertan en paradas costosas. Asimismo, la gestión técnica de repuestos se vuelve una inversión estratégica, ya que al contar con un stock de seguridad de componentes críticos minimiza el riesgo de paradas de producción ante fallas inesperadas, protegiendo así los ingresos económicos y el nivel de servicio al cliente.

El desarrollo de este plan demuestra que la ingeniería mecánica no solo se encarga del funcionamiento de los mecanismos, sino que se puede desempeñar a un nivel de excelencia en el área de mantenimiento para la maximización de la confiabilidad operativa como motor de la productividad. De este modo, se entrega una solución técnica estandarizada que asegura que el activo más valioso de la empresa opere en condiciones eficientes y seguras.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar un plan de mantenimiento preventivo para la inyectora de plásticos, mediante el análisis de fallas potenciales y la definición de un inventario de repuestos, para asegurar la disponibilidad operativa del proceso de producción.

2.2 Objetivos Específicos

Elaborar el diagnóstico de la inyectora para la identificación de fallas potenciales basado en la norma ISO 14224.

Determinar el Análisis de Modos, Efectos y Criticidad de Fallas (FMECA) para establecer las actividades de mantenimiento preventivo en los sistemas críticos de la inyectora.

Estructurar el plan de mantenimiento y el inventario de repuestos para asegurar la disponibilidad de la inyectora en el proceso.

3. Marco Teórico

3.1 Estado del arte

En la industria en Colombia, la transición de un modelo de mantenimiento meramente correctivo a uno preventivo y estructurado en plantas de inyección de plástico ha sido la estrategia más efectiva para aumentar la disponibilidad.

3.1.1 Mantenimiento en máquinas inyectoras de plástico

En la industria de transformación de plásticos, las máquinas de moldeo por inyección constituyen sistemas altamente complejos cuyo desempeño depende de la interacción precisa entre variables mecánicas, térmicas y operativas. En este contexto, la literatura técnica ha demostrado que la confiabilidad de estos equipos no solo está asociada a su diseño, sino principalmente a la gestión del mantenimiento y al control adecuado de sus condiciones de operación (Groover, 2014).

Uno de los componentes más críticos dentro de la unidad de inyección es el husillo, encargado de transportar, fundir y homogeneizar el material polimérico. Su correcto funcionamiento depende de variables como la temperatura de operación, la presión, el tipo de material procesado y las condiciones de alimentación. Estudios han evidenciado que fallas en el husillo, como desgaste, mala plastificación o contaminación del material, afectan directamente la calidad del producto, generan inestabilidad en el proceso y aumentan la probabilidad de paradas no planificadas (Brydson, 1999).

Adicionalmente, el control de las condiciones de operación es un factor determinante en la prevención de fallas. Variables como el perfil de temperatura, la humedad del material, la granulometría y el correcto ingreso del polímero influyen significativamente en el desempeño del

equipo. Una inadecuada gestión de estas condiciones puede generar defectos en las piezas, sobrecargas mecánicas en el husillo y deterioro prematuro de los componentes (Groover, 2014).

Desde el enfoque del mantenimiento, diversas investigaciones han demostrado que la implementación de metodologías como el AMEF y el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) permite identificar fallas potenciales en sistemas de inyección y establecer estrategias preventivas que reducen significativamente los tiempos muertos y los costos operativos (Mendoza, 2020; Jiménez, 2019). Asimismo, se ha evidenciado que el paso de un mantenimiento correctivo a uno preventivo estructurado contribuye a estabilizar el proceso productivo y aumentar la disponibilidad de las máquinas (Gómez, 2021).

En este sentido, el estado del arte resalta la importancia de integrar el análisis de fallas, el control de condiciones operativas y la estructuración de planes de mantenimiento como elementos clave para garantizar la confiabilidad de las máquinas inyectoras. Sin embargo, en muchas empresas, especialmente en contextos industriales locales, estas prácticas no se encuentran formalmente implementadas, lo que evidencia una oportunidad de mejora mediante la aplicación de metodologías de ingeniería de mantenimiento adaptadas a la realidad operativa.

3.1.2 Mantenimiento e industria del plástico

Para desarrollar este proyecto, se toman como referencia trabajos de aplicación que han validado el uso de herramientas de confiabilidad:

- **Uso del AMEF para el control de fallas funcionales:** En un trabajo desarrollado en la empresa Iberplast S.A.S., que fue enfocado en la optimización del mantenimiento de sistemas de inyección, se pudo evidenciar que la aplicación del AMEF permite potenciar el control de las rutinas de prevención (Jiménez, 2019). Además, el estudio concluye que documentar y analizar las posibles fallas funcionales evita detenciones repentinas de la

producción, lo cual es fundamental para asegurar la rentabilidad del proceso continuo (Jiménez, 2019).

- **Reducción de costos correctivos y mejora de disponibilidad:** En una investigación aplicada a máquinas inyectoras en una empresa de plásticos mediante Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), se utilizó el AMEF como herramienta central para identificar y mitigar riesgos operativos (Mendoza, 2020). Este enfoque sistemático logró reducir los costos de mantenimiento correctivo en casi un 40%, demostrando que la priorización de fallas y la estructuración de un inventario de repuestos justifican económicamente la inversión en planes preventivos (Mendoza, 2020).
- **Disminución de tiempos muertos mediante acciones sistemáticas:** En una investigación aplicada a máquinas inyectoras en una empresa de plásticos mediante Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), se utilizó el AMEF como herramienta central para identificar y mitigar riesgos operativos (Mendoza, 2020). Este enfoque sistemático logró reducir los costos de mantenimiento correctivo en casi un 40%, demostrando que la priorización de fallas y la estructuración de un inventario de repuestos justifican económicamente la inversión en planes preventivos (Mendoza, 2020).

3.2 Base teórica

Es necesario establecer los fundamentos conceptuales de los equipos y las metodologías implementadas para el desarrollo técnico del plan de mantenimiento propuesto para la planta de producción:

- **Proceso de Inyección de Plásticos:** El moldeo por inyección es un proceso de manufactura semicontinuo utilizado para la producción de piezas de plástico. Consiste

fundamentalmente en fundir material polimérico y forzar su entrada a alta presión en las cavidades de un molde cerrado. Una vez el material se enfría y solidifica, el molde se abre para expulsar la pieza terminada (Brydson, 1999). Este proceso requiere de una sincronización precisa entre la unidad de inyección, la unidad de cierre y los sistemas de control térmico y de presión.

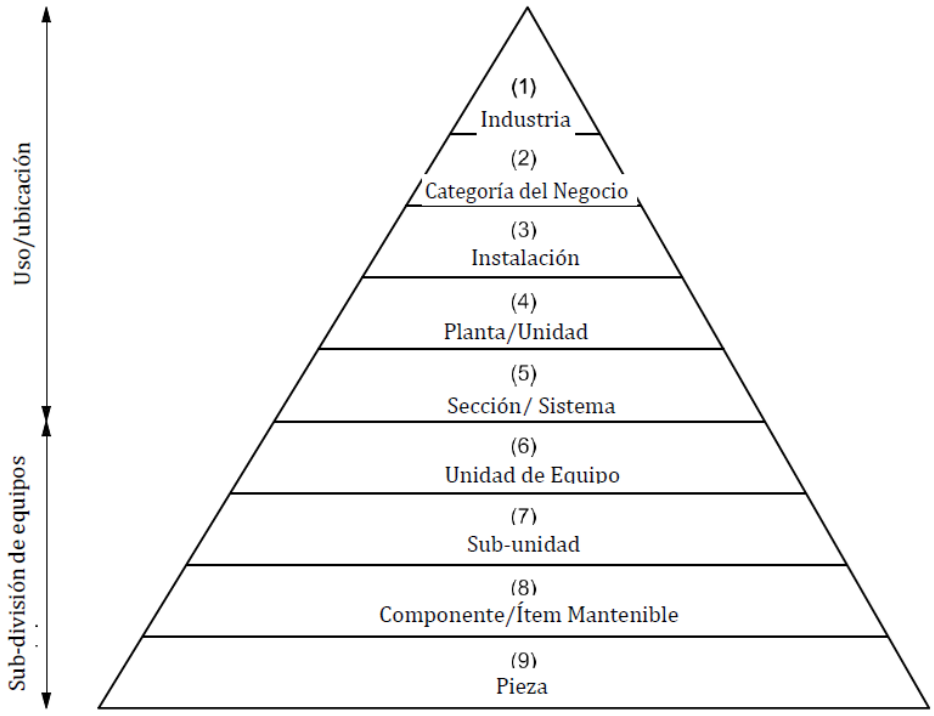
- **Máquina Inyectora Welltec 190 SE II:** La Welltec 190 SE II es una máquina de moldeo por inyección que cuenta con una fuerza de cierre de 190 toneladas. La denominación "SE" (Servo Energy) indica que está equipada con un sistema de accionamiento por servomotores, lo cual mejora el consumo energético y mejora la precisión de los movimientos hidráulicos en comparación con las máquinas convencionales. Su operatividad depende de subsistemas críticos interactuantes: el sistema hidráulico (bombas, válvulas proporcionales), el sistema mecánico de cierre, el husillo, el sistema de calentamiento y el sistema electrónico de control (PLC). Por su complejidad y volumen de producción, requiere un control estricto de sus parámetros operativos y rutinas de inspección.
- **Mantenimiento Preventivo:** Se define como el conjunto de intervenciones sistemáticas y programadas que se realizan sobre un activo físico con el objetivo de prevenir la ocurrencia de averías, reducir la probabilidad de fallas inesperadas y prolongar la vida útil del equipo (Moubray, 1997). A diferencia del mantenimiento correctivo, que actúa tras la avería, el preventivo se basa en frecuencias de tiempo o ciclos de operación para ejecutar tareas de lubricación, ajustes, limpieza y reemplazo de piezas desgastadas.
- **Disponibilidad Operativa:** Es un indicador clave de desempeño en la gestión de activos que representa la probabilidad de que un equipo se encuentre en condiciones óptimas

para operar satisfactoriamente en el momento en que se le requiera. Se calcula como la relación entre el tiempo real que la máquina estuvo produciendo y el tiempo total que estaba planificada para operar. Aumentar este indicador es el objetivo principal para garantizar la rentabilidad del proceso productivo.

- **Norma ISO 14224:** Es un estándar internacional diseñado originalmente para la industria del petróleo y gas, pero ampliamente adaptado en la manufactura, que proporciona una base metodológica para la recolección y estandarización de datos de confiabilidad y mantenimiento (Organización Internacional de Normalización, 2016). Su aplicación permite establecer una taxonomía jerárquica de los equipos como se muestra en la Figura 1, dividiendo la inyectora en clases, sistemas y componentes, y definir fronteras claras para registrar los modos de falla de manera uniforme.

Figura 1

Jerarquía taxonómica según ISO 14224



Nota. La figura muestra la estructura jerárquica de la norma ISO 14224:2016, tomado de Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos (ISO 14224:2016)

- **Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF):** Es una herramienta de ingeniería sistemática y proactiva que se utiliza para identificar, evaluar y prevenir posibles fallas en el diseño de un producto o en un proceso operativo (Stamatis, 2003). En el contexto del mantenimiento, permite evaluar cómo puede fallar cada componente de la inyectora, qué impacto tendría sobre la producción o seguridad, y cuáles son las causas fundamentales. A través del cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR), el AMEF facilita la toma de decisiones para asignar tareas preventivas y definir el inventario de repuestos críticos.
- **Análisis de Modos, Efectos y Criticidad de Fallas (FMECA):** Es una extensión metodológica del AMEF que incorpora una evaluación cuantitativa o cualitativa de la criticidad de cada falla potencial en un sistema (Birolini, 2017). Mientras que el AMEF se limita a identificar cómo pueden fallar los componentes y cuáles son sus consecuencias operativas, el FMECA jerarquiza estos modos de falla evaluando la combinación entre la severidad del efecto, la probabilidad de ocurrencia y la facilidad de detección. En la gestión de activos, esta herramienta es fundamental para priorizar los riesgos, permitiendo focalizar los recursos económicos, las rutinas preventivas y el inventario de repuestos en aquellos subsistemas que representan el mayor impacto para la continuidad del proceso productivo (Birolini, 2017).
- **Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM):** Es un proceso utilizado para determinar qué debe hacerse para asegurar que un activo físico continúe cumpliendo las

funciones que su usuario desea, en su contexto operacional actual (SAE JA1011, 1999). La norma SAE JA1011 establece los siete criterios mínimos que cualquier proceso debe satisfacer para poder llamarse legítimamente RCM, entre ellos identificar las funciones y estándares de desempeño del activo, sus formas de falla funcional, los modos de falla, sus efectos y sus consecuencias. La norma SAE JA1012 complementa a la anterior como una guía de implementación, precisando el significado práctico de cada criterio y orientando la aplicación consistente de la metodología (SAE JA1012, 2002). A estas dos normas se suma como referencia clásica el desarrollo de Moubray (2004) en su obra RCM II, que sistematiza la lógica de decisión entre tareas a condición, restauración programada, sustitución programada, búsqueda de fallas o rediseño, en función de las consecuencias de cada modo de falla sobre la seguridad, el ambiente y la operación.

- **NPR y lógica RCM, una distinción metodológica:** Conviene precisar que el NPR (Severidad × Ocurrencia × Detección) empleado en el FMECA pertenece a la metodología clásica de la industria automotriz (AIAG/ASQ) y en este proyecto se usa exclusivamente como criterio de priorización, es decir, para decidir qué modos de falla revisar primero. La política de mantenimiento que efectivamente se asigna a cada tarea mantenimiento a condición, restauración programada, sustitución programada, búsqueda de fallas o ningún mantenimiento programado, siempre se decide mediante la lógica de consecuencias de seguridad, ambiente, operación y no operación (S/E/O/N) que establecen SAE JA1011, SAE JA1012 y Moubray (2004), y nunca a partir del valor numérico del NPR. Esta distinción evita la confusión frecuente entre priorizar (FMECA) y decidir la tarea de mantenimiento (RCM), y es coherente con el hecho de que ambos marcos, aunque complementarios, provienen de tradiciones normativas distintas.

- **UNE-EN 13306:** Norma europea que establece la terminología general del mantenimiento, unificando conceptos como disponibilidad, fiabilidad, mantenibilidad, mantenimiento preventivo y correctivo. Se adopta en este proyecto para garantizar el uso consistente del vocabulario técnico a lo largo de todo el documento y de las hojas de trabajo.
- **UNE-EN 13460:** Norma que especifica los documentos que deben generarse en las distintas fases de la gestión del mantenimiento (preparatoria, operativa y de análisis), incluyendo órdenes de trabajo, listas de referencias cruzadas de repuestos y registros históricos de parámetros. Constituye la base documental sobre la que se estructuraron el plan de mantenimiento, las rutas de mantenimiento y las hojas de trabajo desarrolladas en este proyecto.
- **SAE JA1011:** Norma que establece los criterios mínimos obligatorios que cualquier proceso debe cumplir para ser reconocido legítimamente como Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)
- **SAE JA1012:** Es una guía técnica que detalla los criterios y procedimientos para aplicar el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.

4. Metalcort Soluciones de Ingeniería S.A.S.

4.1 Misión

Metalcort, es una empresa del sector industrial que busca alcanzar liderazgo en el mercado nacional, ofreciendo una alta gama de productos y servicios de la industria metalmecánica, infraestructura, plásticos de ingeniería e hidrocarburos, ayudando a nuestros clientes a alcanzar sus metas de negocio y generando en la región crecimiento social y beneficiando el entorno.

4.2 Visión

Metalcort a 2026, quiere ser la empresa preferida por los clientes de la industria metalmecánica y de infraestructura en Colombia, quiere ser reconocida como una empresa innovadora, que mira hacia el futuro, brindando soluciones y donde los trabajadores encuentren un ambiente laboral extraordinario.

4.3 Contextualización de los activos para mantenimiento

Para el desarrollo del presente proyecto, la descripción de Metalcort Soluciones de Ingeniería S.A.S. se aborda desde la perspectiva de la gestión del mantenimiento, con el fin de ubicar el equipo objeto de estudio dentro de la estructura operativa de la empresa y establecer su relación con los demás activos físicos involucrados en el proceso productivo. Este enfoque permite delimitar el contexto operacional de la inyectora Welltec 190 SE II y constituye la base para el diagnóstico técnico orientado a la identificación de fallas potenciales.

Con este propósito, se adopta como referencia la norma ISO 14224, la cual proporciona una estructura jerárquica para la clasificación de activos y una base metodológica para la recolección y organización de información de confiabilidad y mantenimiento. En este trabajo,

dicha norma se utiliza para ubicar los activos desde los niveles generales de industria e instalación hasta el nivel de equipo, permitiendo establecer fronteras funcionales claras antes de descomponer la inyectora en sistemas, subequipos e ítems mantenibles.

Desde esta perspectiva, Metalcort se clasifica dentro de la industria manufacturera, con participación en actividades asociadas a la metalmecánica, los plásticos de ingeniería y los hidrocarburos. A nivel de instalación se identifica a Metalcort Soluciones de Ingeniería S.A.S., dentro de la cual se reconocen dos unidades principales para efectos del análisis: la bodega principal y la bodega de inyección. En la bodega principal se localizan activos asociados a la línea de corte CNC, la línea de mecanizado, el sistema de aire comprimido y equipos de izaje. Allí se encuentran las mesas de corte CNC, tornos CNC, centros de mecanizado, el compresor principal y otros equipos de apoyo, los cuales forman parte de la operación general de la empresa.

Por su parte, la bodega de inyección constituye la unidad productiva donde se encuentra instalado el equipo objeto de estudio. En esta bodega opera la línea de inyección, la cual está conformada principalmente por la inyectora Welltec 190 SE II y la tolva de secado. Adicionalmente, en esta misma unidad se encuentran la línea de roscado de varillas, compuesta por dos roscadoras Jaguar, y la línea de soldadura, compuesta por dos equipos de soldadura. Aunque esta bodega se encuentra físicamente separada de la bodega principal, existe articulación permanente con las áreas de seguridad y salud en el trabajo, mantenimiento, producción y ventas, lo que evidencia su importancia operativa dentro de la empresa.

Dentro de esta configuración, la línea de inyección se reconoce como la línea de producción principal de la bodega de inyección, y dentro de ella la inyectora Welltec 190 SE II se identifica como el activo principal, dado que constituye el equipo central del proceso y sobre él recae la transformación del material y la continuidad de la producción. Esta condición justifica que el proyecto concentre su diagnóstico técnico en dicho activo, sin perder de vista la interacción funcional con equipos auxiliares como la tolva de secado y el sistema de refrigeración.

La Figura 2 presenta la taxonomía general de los activos de Metalcort según la ISO 14224, mostrando la jerarquía desde industria hasta equipo. Esta representación permite ubicar la bodega de inyección dentro de la instalación y reconocer la línea de inyección como sección funcional, en la cual la inyectora Welltec 190 SE II se establece como equipo principal para el presente estudio.

La Figura 3 complementa esta contextualización mediante el esquema del proceso operativo de la línea de producción de inyección, en el que se ilustra la secuencia general del proceso y se resalta la participación de la inyectora como activo central de la línea.

A partir de esta contextualización general, es posible desarrollar en las siguientes secciones la taxonomía específica de la inyectora y su posterior diagnóstico, en coherencia con el objetivo de identificar fallas potenciales con base en la norma ISO 14224.

De esta manera, la organización previa de los activos no solo permite entender la ubicación funcional del equipo, sino también sustentar técnicamente su desagregación en sistemas y componentes para fines de mantenimiento.

Figura 2

Jerarquía taxonómica de los activos de Metalcort según ISO 14224



Nota. La figura adapta la jerarquía de la norma ISO 14224 al caso de Metalcort, ubicando la inyectora Welltec 190 SE II dentro de la planta y el sistema de producción a los que pertenece.

Figura 3

Línea de producción de inyección de Metalcort



Nota. La fotografía corresponde a la línea de producción de inyección de Metalcort en la cual se encuentra instalada la inyectora Welltec 190 SE II, objeto de este trabajo.

4.3.1 Activos de apoyo de relevancia operacional

Adicionalmente, dentro de la taxonomía general de activos de Metalcort se identifican equipos de apoyo cuya función incide sobre más de un proceso productivo. Entre ellos se encuentra el compresor principal de la bodega principal, encargado de suministrar aire comprimido a la línea de corte por plasma y a los centros de mecanizado. Debido a esta dependencia, una indisponibilidad del compresor puede afectar simultáneamente diferentes equipos y comprometer la operación de dos líneas de producción.

Aunque este equipo no forma parte de la línea de producción de inyección, su inclusión dentro de la contextualización taxonómica permite evidenciar la relación funcional existente

entre los activos de la empresa y reconocer aquellos equipos que prestan servicios comunes o de apoyo a diferentes procesos. Esta identificación resulta relevante desde la perspectiva del mantenimiento, ya que una falla en un activo auxiliar puede generar consecuencias operacionales sobre varios equipos de producción.

Figura 4

Compresor de la bodega principal de Metalcort Ingeniería S.A.S.



Nota. Este equipo es de suma importancia, ya que de él depende el suministro de aire para la línea de corte por plasma y los centros de mecanizado que son equipos neumáticos, una parada del compresor impacta directamente 2 líneas de producción al tiempo.

4.4 Importancia estratégica de la línea de inyección

Aunque Metalcort Soluciones de Ingeniería S.A.S. desarrolla diferentes actividades dentro del sector metalmecánico, una de sus líneas estratégicas de negocio está asociada a la fabricación de componentes para sistemas de bombeo mecánico y de cavidades progresivas, particularmente mediante la producción por inyección de guías para varillas. Esta actividad ha permitido consolidar la línea de inyección como un proceso de importancia dentro de la operación de la empresa.

La línea de inyección constituye en sí una de las actividades estratégicas de Metalcort Soluciones de Ingeniería S.A.S., debido a su participación en la fabricación de guías plásticas utilizadas en sistemas de bombeo mecánico y de cavidades progresivas. Dentro de esta línea, la inyectora Welltec 190 SE II se identifica como el activo principal, al ser el equipo encargado de realizar la transformación del material polimérico y constituir la única máquina de inyección disponible en el proceso.

Esta configuración genera una dependencia directa de la producción respecto de la disponibilidad de la inyectora. Una falla que provoque su salida de servicio implica la interrupción de la línea, por lo que el equipo representa un punto único de falla y un potencial cuello de botella operacional. Asimismo, su funcionamiento depende de equipos auxiliares, entre ellos la tolva de secado y el sistema de refrigeración mediante chiller, los cuales deben considerarse dentro del contexto operacional del activo.

Por esta razón, la Welltec 190 SE II se selecciona como el activo prioritario para el diagnóstico técnico, la identificación de fallas potenciales y la posterior estructuración del plan de mantenimiento preventivo.

4.5 Diagnóstico del departamento de mantenimiento

Con el propósito de establecer el contexto en el cual se gestiona actualmente la inyectora Welltec 190 SE II, se realizó un diagnóstico general de la función mantenimiento en Metalcort Soluciones de Ingeniería S.A.S. Para ello se revisó la documentación disponible y se consultó al personal relacionado con las actividades de operación y mantenimiento.

A partir de esta revisión se identificó que la gestión del mantenimiento presenta un enfoque predominantemente correctivo, dado que las intervenciones se realizan principalmente después de la aparición de una falla o cuando el equipo presenta condiciones que afectan su

funcionamiento. Aunque se ejecutan algunas actividades preventivas, estas no responden a una planificación sistemática ni a frecuencias formalmente establecidas. En el caso particular de la inyectora, se identificó como actividad preventiva una limpieza general realizada aproximadamente una vez al año, sin evidencia de una ejecución consistente.

Asimismo, la empresa presenta una alta dependencia de servicios técnicos externos para la ejecución de intervenciones especializadas, debido a que no dispone de personal técnico de mantenimiento dedicado dentro de su estructura permanente. Esta condición puede incrementar los tiempos de respuesta ante fallas y limita la capacidad para desarrollar actividades sistemáticas de inspección, seguimiento y prevención.

Otro aspecto identificado corresponde a la gestión de la información de mantenimiento. Los registros históricos disponibles son limitados y parte de las intervenciones realizadas por terceros constituyen la principal fuente documental para reconstruir el comportamiento del equipo. De igual manera, el inventario de repuestos existente no se encontraba formalmente registrado, por lo cual fue necesario identificarlo mediante consultas al personal y revisión física de los elementos disponibles en planta.

En consecuencia, el diagnóstico evidencia oportunidades de mejora relacionadas con la planificación y programación del mantenimiento, documentación de intervenciones, administración de repuestos, seguimiento de fallas y establecimiento de rutinas preventivas. Estas condiciones justifican la estructuración de un plan de mantenimiento para la inyectora Welltec 190 SE II basado en el análisis sistemático de sus sistemas y modos de falla

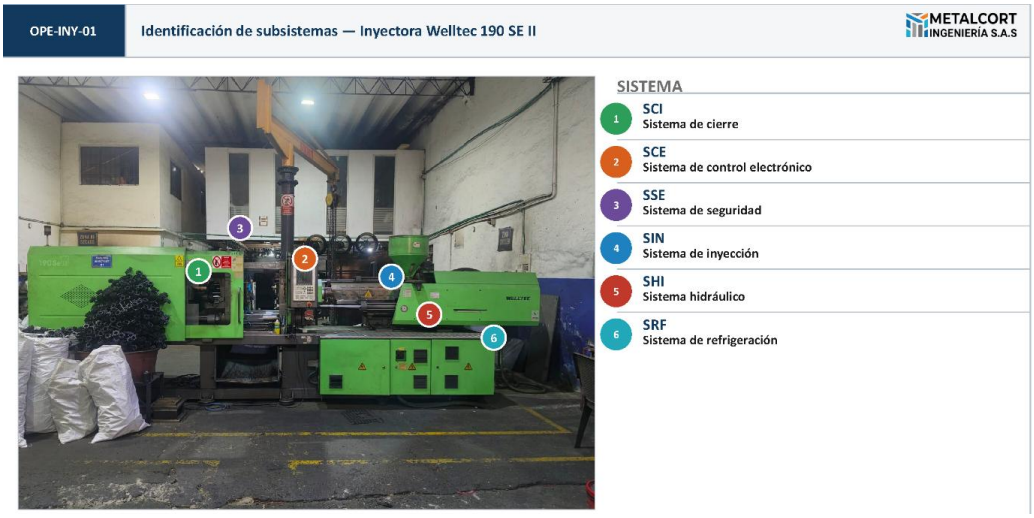
4.6 Diagnóstico del equipo

Para realizar el diagnóstico del equipo, fue necesario primero familiarizarse con la inyectora. La Figura 5 muestra la ubicación de cada uno de los subsistemas de la inyectora. Por

otro lado, la Figura 6 muestra la ficha técnica que se elaboró del equipo con los datos del fabricante con el fin tener la información consolidada y facilitar la revisión y consulta de datos.

Figura 5

Subsistemas de la máquina inyectora



Nota. La figura señala la ubicación física de cada uno de los subsistemas de la inyectora sobre la máquina real, como apoyo para su identificación durante el diagnóstico.

Figura 6

Ficha técnica elaborada de la máquina inyectora



Nota. La ficha técnica fue elaborada a partir de la información suministrada por Metalcort y por el fabricante, y recopila las especificaciones técnicas principales de la inyectora Welltec 190 SE II.

Como parte del diagnóstico del estado actual de la inyectora Welltec 190 SE II, se inició con una inspección directa del equipo y se hizo la revisión del historial de fallas proporcionado por IMOCOM. Además, se hicieron consultas con el personal operativo de Metalcort y el personal técnico de IMOCOM con el fin de obtener más información sobre el equipo.

4.6.1 Hallazgos de la inspección directa

Mediante la inspección visual se pudo evidenciar la acumulación de suciedad en distintos puntos de la inyectora, esto debido a que no hay rutinas periódicas de limpieza. La Figura 7 muestra la superficie rayada de una guía de desplazamiento del carro de inyección del equipo, el personal técnico manifiesta que es debido a que no se limpia periódicamente y la acumulación de suciedad en la grasa causó que se fuera desgastando la guía cada que había un desplazamiento sobre ella. A continuación, se presentan evidencias de los hallazgos de la inspección directa:

Figura 7

Evidencia de guía de desplazamiento del carro de inyección rayada



Nota. Estas guías son las responsables del desplazamiento lineal del sistema de inyección, en el estado en el que se encuentran, el equipo trabaja, pero presenta cierta vibración con cada desplazamiento.

Figura 8

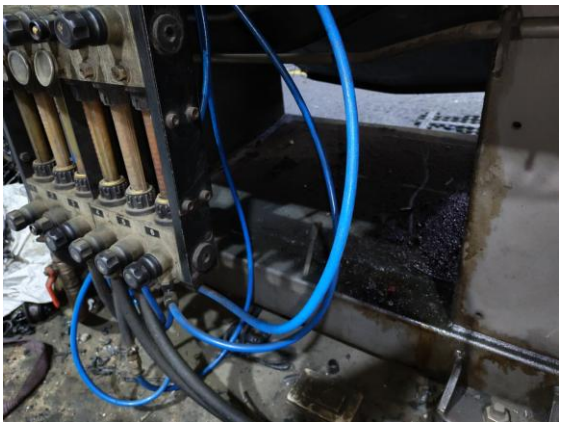
Suciedad acumulada en zona de cierre de molde



Nota. La imagen presentada, muestra una acumulación de residuos en la zona de desplazamiento del sistema de rodillera, concretamente en la zona de movimiento lineal.

Figura 9

Residuos de grasa y aceite acumulados en la base de la inyectora



Nota. En la figura mostrada, se aprecia que hay una evidente acumulación de residuos de grasa y aceite en la base del equipo, lo que dificultaría detectar alguna fuga de manera rápida,

este punto se ubica debajo del sistema de rodillera y justo delante se encuentra el distribuidor de agua fría-caliente del sistema de refrigeración.

Figura 10

Acumulación de polvo sobre la superficie de las guardas de la inyectora



Nota. En esta imagen se aprecia el estado superficial del equipo, polvo en gran cantidad y manchas de grasa en las guardas del equipo, visualmente da impresión de descuido.

4.6.2 Cultura de mantenimiento actual

Se confirmó que la inyectora no tiene un plan de mantenimiento preventivo estructurado. Actualmente la estrategia de mantenimiento es mayormente correctiva, solo la intervienen cuando ocurre una falla o presenta alguna condición que no permita operar con normalidad. La única actividad de mantenimiento preventivo que se le realiza es una limpieza general que se lleva a cabo de manera anual pero no de forma consistente todos los años. Esta condición es afín con lo señalado en el planteamiento del problema del presente proyecto y refuerza la necesidad de una estrategia de mantenimiento estructurada.

4.6.3 Inventario de repuestos existente antes del proyecto

Metalcort contaba de manera informal con un stock de repuestos que no estaba registrado en ningún lugar, se tuvo que entrevistar al personal y realizar una búsqueda por la planta:

- Kit de resistencias y termocuplas
- Tornillo o husillo de repuesto (restaurado en varias ocasiones)
- Chiller de repuesto
- Bomba hidráulica

Es importante tener en cuenta que, aunque se tiene una bomba de repuesto, se debe implementar una estrategia para poder utilizarla, ya que, actualmente requiere de una parada de al menos 20 días para poder instalarla debido a una adaptación para el acople con el servo.

4.6.4 Dependencia de equipos auxiliares

Se identificó que dos funciones críticas para el proceso de inyección recaen sobre dos equipos externos a la inyectora. La refrigeración depende de un chiller marca Shini ubicado en la parte trasera de la máquina, adicional el secado de la materia prima pasa por una tolva de secado ubicada a escasos metros de la inyectora.

5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados del proyecto desarrollado en Metalcort cronológicamente de acuerdo con la metodología establecida.

5.1 Taxonomía y codificación ISO 14224 de la inyectora

Siguiendo la estructura jerárquica de la norma ISO 14224:2016, la inyectora Welltec 190 SE II con código interno definido desde antes de la práctica como OPE-INY-01, evidenciado en la Figura 11, se descompuso desde el nivel de industria (Nivel 1) hasta el nivel de ítem mantenible (Nivel 8), identificando 6 sistemas (Nivel 7) y 40 componentes codificados (Nivel 8), como se resume en la Tabla 1.

Figura 11

Codificación interna previa del equipo



Nota. La figura muestra la codificación interna de la inyectora de plásticos, como se aprecia, además de ser nombrada inyectora #1, se le asignó el código etiquetado en naranja.

Tabla 1

Resumen de la taxonomía y codificación ISO 14224 de la inyectora Welltec 190 SE II

Sistema (código)	N.º componentes	Función principal del sistema
Sistema Hidráulico (SHI)	10	Generar y controlar la presión hidráulica para todos los movimientos de la máquina
Sistema de Cierre (SCI)	8	Abrir, cerrar y sostener el molde bajo las 190 ton de fuerza de cierre
Sistema de Inyección (SIN)	7	Fundir, plastificar, dosificar e inyectar el material polimérico
Sistema de Control Electrónico (SCE)	7	Ejecutar la lógica de control y regular los parámetros de proceso
Sistema de Refrigeración (SRF)	3	Enfriar el molde y el barril durante el ciclo de inyección

Sistema de Seguridad (SSE)	5	Proteger al operador mediante paradas de emergencia e interbloqueos
Total	40	—

Nota. Los códigos completos siguen un formato partiendo del código base que ya estaba definido y que se decidió mantener, ya que, cambiarlo significaba cambiar el código del resto de equipos: OPE-INY-01-[Sistema]-[Componente], p. ej. OPE-INY-01-SHI-SER.

5.2 Diagnóstico del equipo: historial de fallas y disponibilidad operativa

A partir de los registros proporcionados por IMOCOM, como muestra la Figura 12, se estructuró el historial de fallas de la inyectora entre 2019 y 2025, por supuesto, reconociendo que es muy poca información disponible y comprobable. Se identificaron 9 eventos correctivos y se organizaron cronológicamente en la Tabla 2.

Figura 12

Muestra de orden de trabajo proporcionada por IMOCOM



IMOCOM

Reporte de Servicio Técnico

No Reporte: 145219

Pagina 1 de 1 SER FOR 07 Versión 3 - Agosto 2023

Fecha Solicitud: 21/02/2022 08:22:00 a.m.

OTT-AC-BU-726

Tipo Servicio: ☐ Puesta en Marcha ☐ Mto. Correctivo ☐ Mto Preventivo ☐ Capacitación ☐ Taller ☐ Externo Otro:_____

Cliente	METALCORT INGENIERIA SAS	Ciudad	BUCARAMAN	Sucursal	ANDREA COSTA	Dirección	CR 13 22 32 B
Persona que Autoriza	Milton Ortega	E-Mail		Nit	900825897	Telefono	57 (7)642900
Maquina	[TTI 190SE][DH-224023	Marca	WELLTEC	Modelo	TTI 190SE	No Serie/año	DH-22402383
Tecnicos	Daniel Jose Prada Carreño , Tecnico: RAMOS SANCHEZ SERGIO ANDRES .						
Datos Op.	Voltaje	Amperaje		Presion	Temperatura	RPM	Horometro

Descripcion de los trabajos realizados

El cliente solicita mantenimiento preventivo a inyectora welltec 190 SE II con numero de serie: DH-22402383/55.
Se procede a realizar desarme general de guardas e inspección inicial, se procede a realizar calibración y ajuste de elongación de columnas, se realiza limpieza, lubricación y calibración de unidad de inyección, se realiza calibración de sensores en apertura y cierre de molde, se realiza inspección, ajuste pines y tornillos de rodillera con movimientos en alta presión, se procede a verificar nivelación de equipo lo cual se encuentra en condiciones optimas, se procede a realizar limpieza, calibración de sistema de lubricacion verificando la optima operación en sus diferentes puntos, se realiza un chequeo y ajuste de cabina eléctrica, se realiza limpieza general de piñones y calibración de sensor en transmisión apertura molde.
Se realiza lubricacion general maquina en sistemas de grasa y se ejecuta sistema de aceite.
se rearma nuevamente inyectora se hacen pruebas de funcionamiento y se deja operando equipo ok sin fallas ni alarmas.

Relación de repuestos requeridos, instalados, compromisos adquiridos y/o Observaciones

cotizar elemento filtrante para unidad hidráulica.
cotizar manómetro para unidad de elemento filtrante.
cotizar retenedores y oring para cilindros de movimiento de unidad de inyección.

Otros Servicios que el cliente requiere

	(Dia/mes/año)	Llegada	Salida	Horas Efectivas de servicio	Horas desplazamiento	Vo. Bo. Cliente
1	21-02-2022	08:30	17:00	8,5		
2						
3						

	(Dia/mes/año)	Llegada	Salida	Horas Efectivas de servicio	Horas desplazamiento	Vo. Bo. Cliente
4						
5						
6						

☐ Cobro ☐ Contrato ☐ Cortesia ☐ Garantía ☐ Fabrica ☒ Servicio ☐ Otro

RAMOS SANCHEZ SERGIO ANDRES
Nombre y Firma del tecnico Líder de IMOCOM.

Espacio para ser diligenciado por el cliente:

Observaciones:

CONFIRMAMOS QUE LAS HORAS DE TRABAJO INDICADAS FUERON CUMPLIDAS

Acepto Política de tratamiento de Datos. Ver Política aquí

Certifico que se recibe a satisfaccion el servicio realizado ☐ SI ☐ NO

Terminado el servicio Solicitado ☐ Cotizar ☐ Facturar ☐ No Aplica

Firma del cliente

Pagina: 1 de 1 Fecha impresion: 23/04/2024 11:59:55 Impreso por cammaes - sistema de administracion de mantenimiento moderno - www.idaesoluciones.com

Nota. La figura anterior, muestra uno de los reportes proporcionados por IMOCOM del histórico de la inyectora, este reporte corresponde a una orden de trabajo cerrada y generada por el sistema interno de dicha empresa.

Tabla 2

Historial de fallas correctivas de la inyectora Welltec 190 SE II (2019-2025)

Fecha	Sistema	Descripción breve	Horas de parada
17/05/2019	Refrigeración	Filtro de inyectores obstruido; falla en intercambio de temperatura del chiller	3,0 h
27/09/2019	Inyección	Falla en resistencias del ducto de comunicación con tolva	1,5 h
07/07/2022	Refrigeración	Chiller se apaga; intercambiadores y aspas obstruidos	2,0 h
23/11/2022	Inyección	Falla en carga y plastificación; ciclo irregular (25-45 s)	9,17 h
27/02/2023	Control Electrónico	Visita 1/4: diseño de circuito y control de temperatura de tolva secadora	7,00 h
13/06/2023	Control Electrónico	Visita 2/4: montaje de tubo, resistencias y blower de tolva secadora	6,80 h
05/07/2023	Control Electrónico	Visita 3/4: montaje de tolva en su base; cableado del temporizador	2,92 h
13/07/2023	Control Electrónico	Visita 4/4 (cierre): programación final; prueba estable de 5 h sin alarmas	6,50 h
19/11/2025	Control Electrónico	Cable y contactor dañados; no sube la temperatura programada	3,42 h

Nota. El historial corresponde a los reportes de fallas correctivas registrados por IMOCOM entre 2019 y 2025.

A partir de los registros de mantenimiento suministrados por IMOCOM, se recopiló y organizó el historial de intervenciones de la inyectora Welltec 190 SE II correspondiente al

período 2019-2025. Se identificaron nueve intervenciones documentadas, asociadas a los sistemas de refrigeración, inyección y control electrónico, con un tiempo acumulado de parada reportado de 42,31 horas.

El análisis de estos registros permitió identificar los sistemas que presentaron mayor recurrencia de intervenciones y aquellos que generaron los mayores tiempos de indisponibilidad del equipo. Esta información constituye una base para la identificación de modos de falla y la posterior definición de las actividades de mantenimiento.

Sin embargo, debido a que los registros se encuentran distribuidos en un período de aproximadamente siete años y corresponden únicamente a las intervenciones documentadas por el proveedor externo, su análisis global puede ocultar el impacto que cada falla genera sobre la continuidad de la producción.

Por esta razón, además de analizar el tiempo acumulado de parada, se evaluó la disponibilidad de la inyectora considerando una jornada semanal de referencia de 42 horas, con el propósito de determinar la proporción de tiempo productivo potencial que se pierde durante una semana en la que ocurre una intervención.

Este enfoque permite identificar las consecuencias operacionales de las fallas y establecer una relación entre los resultados del diagnóstico, la criticidad de los sistemas y las necesidades de mantenimiento del equipo.

Los resultados de la Figura 13 evidencian que las intervenciones registradas presentan un impacto variable sobre la disponibilidad semanal de la inyectora. Mientras que algunos eventos generan pérdidas inferiores a cinco puntos porcentuales, otros comprometen una proporción considerable del tiempo programado de producción.

La mayor afectación corresponde a la intervención del 23 de noviembre de 2022, asociada al sistema de inyección, durante la cual se registraron 9,17 horas de parada. Bajo la jornada semanal de referencia, este evento reduce la disponibilidad estimada al 78,17 %, lo que representa una pérdida de 21,83 puntos porcentuales respecto a una semana sin paradas por falla.

Este resultado evidencia que una sola intervención puede comprometer más de una quinta parte del tiempo semanal programado, aun cuando el número de fallas registradas durante el período histórico sea reducido.

Asimismo, las intervenciones del sistema de control electrónico registradas el 27 de febrero, el 13 de junio y el 13 de julio de 2023 presentan disponibilidades estimadas del 83,33 %, 83,81 % y 84,52 %, respectivamente. Estos valores reflejan pérdidas de tiempo superiores al 15 % de la jornada semanal de referencia.

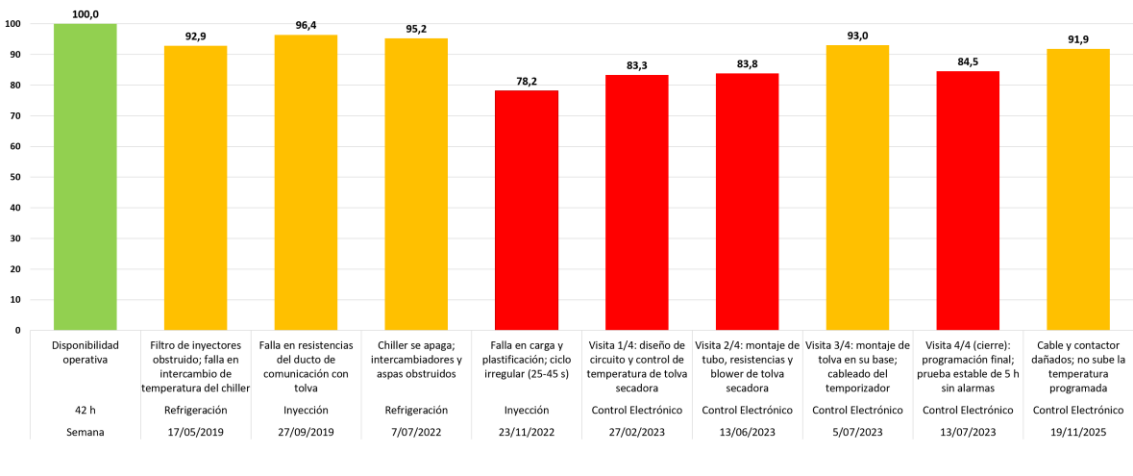
En contraste, las intervenciones asociadas al sistema de refrigeración presentan disponibilidades estimadas del 92,86 % y 95,24 %, correspondientes a tiempos de parada de 3 y 2 horas, respectivamente. Aunque su impacto individual resulta menor que el de las intervenciones previamente mencionadas, su recurrencia permite identificar la necesidad de establecer actividades periódicas de inspección, limpieza y mantenimiento de los componentes de refrigeración.

Desde el punto de vista operacional, los resultados permiten establecer que la frecuencia de ocurrencia no constituye el único criterio relevante para evaluar las consecuencias de una falla. También es necesario considerar su duración y la proporción de tiempo productivo que puede comprometer.

En consecuencia, el análisis semanal complementa el historial de fallas, dado que permite identificar intervenciones que, aunque poco frecuentes, pueden generar una pérdida considerable de disponibilidad durante el período en el que ocurren.

Figura 13

Disponibilidad semanal estimada de la inyectora Welltec 190 SE II según el historial de intervenciones de 2019-2025.



Nota. Disponibilidad estimada con base en 42 horas semanales y los tiempos de parada documentados por IMOCOM. Elaboración propia.

El análisis de Pareto de la Figura 14, se evidencia que el sistema de control electrónico concentra la mayor proporción de las horas de parada documentadas, con un total de 26,64 horas, equivalentes al 62,96 % del tiempo acumulado.

El sistema de inyección ocupa el segundo lugar, con 10,67 horas de parada, equivalentes al 25,22 %, mientras que el sistema de refrigeración representa el 11,82 % restante, correspondiente a 5 horas.

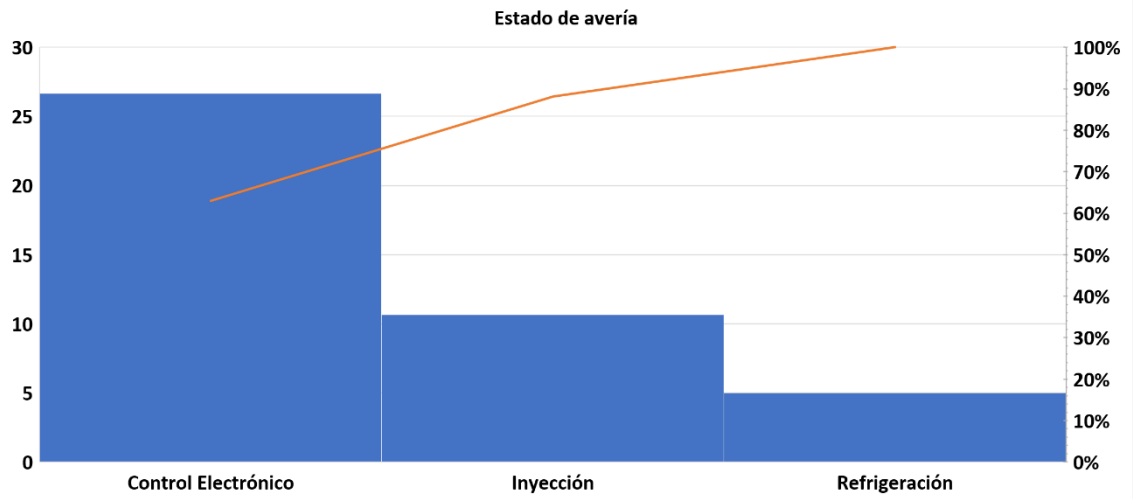
En conjunto, los sistemas de control electrónico e inyección concentran el 88,18 % del tiempo total de parada documentado. Esta distribución permite identificar los sistemas sobre los cuales debe profundizarse el análisis de los modos de falla y sus consecuencias operacionales.

Sin embargo, es importante señalar que la concentración de horas de parada no constituye, por sí sola, una medida de criticidad. La definición de las estrategias de mantenimiento también debe considerar la severidad de las consecuencias, la ocurrencia y la posibilidad de detección de los modos de falla, aspectos abordados mediante la matriz FMECA y la lógica de decisión RCM.

Adicionalmente, las intervenciones registradas en el sistema de control electrónico incluyen actividades relacionadas con el diseño, montaje y programación de la tolva secadora. Por tanto, antes de interpretar todas las horas correspondientes como tiempo de reparación correctiva, es necesario verificar cuáles actividades se realizaron efectivamente como consecuencia de una falla y cuáles correspondieron a modificaciones o mejoras programadas.

Figura 14

Distribución de las horas de parada documentadas por sistema de la inyectora Welltec 190 SE II.



El análisis del historial de intervenciones evidencia que la disponibilidad de la inyectora puede verse afectada significativamente durante las semanas en las que ocurren fallas o se requieren intervenciones que demandan su detención.

Aunque el registro histórico disponible presenta un número limitado de eventos, el análisis semanal permite visualizar las consecuencias que una parada de varias horas puede generar sobre la capacidad productiva del equipo.

En particular, se identificaron intervenciones capaces de reducir la disponibilidad semanal estimada a valores inferiores al 85 %. Esta condición adquiere relevancia considerando que la inyectora Welltec 190 SE II constituye el equipo principal de la línea de inyección y que su indisponibilidad puede comprometer directamente la continuidad del proceso productivo.

Los resultados justifican la necesidad de establecer una estrategia de mantenimiento orientada no solamente a reducir la ocurrencia de fallas, sino también a disminuir su duración y facilitar la recuperación de las condiciones de operación del equipo.

Para ello, el plan de mantenimiento propuesto debe integrar actividades de inspección y prevención de fallas, seguimiento de las condiciones operacionales, procedimientos estandarizados de intervención y disponibilidad de repuestos críticos.

Asimismo, considerando que la demanda de producción de la empresa es variable, las actividades de mantenimiento programado deben coordinarse con los períodos en los cuales el equipo no se encuentre requerido para la producción, siempre que se respeten las frecuencias y condiciones técnicas establecidas en el plan.

De esta manera, los resultados del análisis semanal de disponibilidad permiten relacionar el diagnóstico histórico del equipo con la selección de estrategias de mantenimiento desarrolladas en la matriz FMECA y la posterior estructuración del plan.

La disponibilidad semanal constituye, además, un indicador que podrá utilizarse para evaluar el desempeño del equipo una vez implementado el plan de mantenimiento, mediante la comparación de los tiempos de parada y los valores de disponibilidad registrados antes y después de su aplicación.

5.3 Matriz FMECA y matriz de decisión RCM

5.3.1 Matriz FMECA

Para cada uno de los 40 componentes codificados se identificó su función y estándar de desempeño, la falla funcional asociada, el o los modos de falla y los efectos de la falla, y la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detección (D) según la escala documentada en la Tabla 4, obteniendo el Número de Prioridad de Riesgo (NPR = S × O × D) de cada modo. En total se evaluaron 69 modos de falla, distribuidos por sistema como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Distribución de los modos de falla evaluados en la Matriz FMECA, por sistema

Sistema	Cantidad de modos de falla evaluados
Sistema Hidráulico	21
Sistema de Control Electrónico	14
Sistema de Cierre	13
Sistema de Inyección	9
Sistema de Refrigeración	7
Sistema de Seguridad	5
Total	69

Nota. La distribución muestra que el sistema hidráulico concentra la mayor cantidad de modos de falla evaluados dentro de los 40 componentes codificados en la Matriz FMECA.

Los criterios de valoración empleados para calificar Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detección (D) en cada modo de falla, adaptados de la escala estándar de la industria AIAG/ASQ para la metodología FMEA, se presentan en la Tabla 4. Cabe aclarar que esta escala no forma parte de los estándares SAE JA1011, SAE JA1012 ni del libro de Moubray (2004), dado que dichas fuentes no emplean un puntaje numérico de riesgo; el NPR se usó en este proyecto únicamente como criterio de priorización para decidir qué modos de falla revisar primero, mientras que la política de mantenimiento de cada uno se definió con la lógica S-E-O-N descrita en la sección 5.3.2.

Tabla 4

Escala de valoración de Severidad, Ocurrencia y Detección empleada en la Matriz FMECA

Valor	Severidad (S)	Ocurrencia (O)	Detección (D)
9-10	Peligroso: afecta la seguridad de la operación o incumple una norma/regulación, con o sin previo aviso.	Muy alta: la falla es casi inevitable.	Absoluta incertidumbre / muy remota: no existe un control capaz de detectar la causa o el modo de falla antes de que ocurra.
7-8	Alto: pérdida total o muy severa de la función primaria; el equipo queda inoperable o gravemente degradado.	Alta: fallas repetidas, ocurre con relativa frecuencia.	Baja: el control tiene poca probabilidad de detectar la causa o el modo de falla a tiempo.
5-6	Moderado: la función sigue operando, pero con desempeño reducido o pérdida de	Moderada: fallas ocasionales.	Moderada: el control tiene una probabilidad media de detectar la causa o el modo de falla.

	comodidad/conveniencia.		
3-4	Bajo: defecto menor, perceptible, pero de poco impacto en la operación.	Baja: pocas fallas.	Alta: el control tiene buena probabilidad de detectar la causa o el modo de falla antes de que ocurra.
1-2	Muy bajo o nulo: sin efecto perceptible en la operación.	Remota: la falla es muy improbable.	Casi certeza: el control detecta la causa o el modo de falla prácticamente siempre.

Nota. La escala fue adaptada de los criterios de valoración AIAG/ASQ para Severidad, Ocurrencia y Detección, ajustados al contexto operativo de la inyectora Welltec 190 SE II.

La Tabla 5 presenta los diez modos de falla de mayor criticidad de toda la matriz (25 de los 69 modos, el 36 %, superan el umbral crítico de NPR ≥ 200).

Tabla 5

Los 10 modos de falla de mayor criticidad de la Matriz FMECA

Sistema / Componente	Modo de falla	NPR
Hidráulico / SHI-VPD	Bobinas de la válvula atoradas por contaminantes sólidos en el aceite	384
Refrigeración / SRF-CEM	Canales del molde obstruidos por incrustaciones de sarro	343
Control Electrónico / SCE-SDR	Conexión de cableado de potencia suelta por vibración	336
Control Electrónico / SCE-MIO	Aflojamiento de tornillos en borneras del módulo I/O	336
Control Electrónico / SCE-PWM	Pérdida de contacto en borneras de termocuplas	336
Control Electrónico / SCE-TRC	Aflojamiento de bornes de conexión del transformador	336
Hidráulico / SHI-FAI	Malla del filtro de aire rota o saturada	315

Hidráulico / SHI-CAC	Retenedores y O-rings del cilindro de cierre desgastados	315
Inyección / SIN-HCL	Desgaste del collar antirretorno y su asiento	294
Refrigeración / SRF-AAB	Obstrucción interna por sarro en anillo de agua del barril	294

Estos diez modos, que representan el 14 % del total evaluado, no son un caso aislado: el 20 % de los modos de falla más severos concentra, entre todos, el 34 % del riesgo total acumulado (medido en NPR). Esto confirma que el riesgo de la inyectora no está distribuido de forma homogénea entre sus componentes, y que la baja frecuencia histórica de fallas, por sí sola, no es un criterio suficiente para priorizar las actividades de mantenimiento.

5.3.2 Matriz de decisión RCM

La clasificación de cada modo de falla no consistió únicamente en asignarle las categorías S, E, O y N y derivar de ahí, de forma automática, una tarea de mantenimiento. La lógica RCM aplicada, conforme a SAE JA1011, SAE JA1012 y Moubray (2004), se desarrolló en dos etapas sucesivas. En la primera, se determinó si la pérdida de función asociada a cada modo es evidente para el operador en condiciones normales o si, por el contrario, se trata de una falla oculta (H); esta distinción es previa y de naturaleza distinta a las categorías de consecuencia, por lo que H no debe interpretarse como una categoría equivalente a S, E, O o N. En la segunda etapa se evaluaron, en orden estricto y excluyente, las consecuencias de seguridad (S), ambientales (E), operacionales (O) y no operacionales (N) de la falla misma si es evidente, o de la falla múltiple asociada si es oculta, deteniéndose en la primera categoría que aplicara. Solo a partir de esta clasificación se evaluó, para cada modo, la aplicabilidad técnica y la efectividad de las tareas proactivas disponibles, en el orden mantenimiento a condición (T1), restauración programada (T2), sustitución programada (T3) y, cuando la falla es oculta, búsqueda de fallas (T4), seleccionando la primera que resultara técnicamente viable y, si la consecuencia era operacional

o no operacional, también rentable; cuando ninguna tarea proactiva cumplió estas condiciones se adoptó la política T5 (ningún mantenimiento programado), aceptando correr hasta el fallo o, si la consecuencia involucrada era de seguridad o ambiental, exigiendo el rediseño del componente. Cabe aclarar que T1, T2, T3, T4 y T5 corresponden a una codificación adoptada dentro de este proyecto para referirse a estas políticas, y no a una nomenclatura propia de SAE JA1011 o SAE JA1012. La secuencia completa aplicada, con las preguntas y los criterios usados en cada paso, se presenta en la Tabla 6; la aplicación puntual de esta secuencia a cada uno de los 69 modos de falla, con la justificación técnica correspondiente, se documenta en el archivo Excel anexo al proyecto, dado su volumen. El resultado agregado de esta clasificación, por política de mantenimiento seleccionada, se resume en la Tabla 7.

Tabla 6

Secuencia de decisión RCM aplicada a los modos de falla

Paso	Pregunta	Resultado
1. Falla oculta (H)	¿La pérdida de función se vuelve evidente al operador en condiciones normales, si el modo ocurre de forma aislada?	No: falla evidente, se evalúan las consecuencias del modo mismo. Sí: falla oculta, se evalúan las consecuencias de la falla múltiple asociada.
2. Consecuencia (S → E → O → N)	En ese orden estricto: ¿riesgo de seguridad (S)? ¿consecuencia ambiental (E)? ¿efecto operacional (O)? Si ninguna aplica, la única consecuencia es el costo de reparación (N).	Se detiene en la primera categoría que aplique; las siguientes no se evalúan para ese modo.
3. Política de mantenimiento (T1 → T2 → T3 → T4 → T5)	¿Es T1 (a condición) técnicamente aplicable? Si no, ¿T2 (restauración programada)? Si no, ¿T3 (sustitución programada)? Si la falla es oculta y ninguna de las anteriores aplica, ¿T4 (búsqueda de	Se selecciona la primera política técnicamente viable (y rentable, si aplica). Si ninguna lo es, se adopta T5: correr hasta el fallo (consecuencia operacional o no operacional) o

	fallas)? Cuando la consecuencia es operacional o no operacional, se exige además que la tarea sea rentable.	rediseño obligatorio (consecuencia de seguridad o ambiental).

Nota. La secuencia resume la lógica de decisión aplicada a cada uno de los 69 modos de falla, conforme a SAE JA1011, SAE JA1012 y Moubray (2004), para determinar su condición de falla oculta o evidente y la política de mantenimiento correspondiente (T1 a T5).

Tabla 7

Resultado de la matriz de decisión RCM por política de mantenimiento

Política	Descripción	N.° tareas
T1	Mantenimiento a condición	31
T2	Restauración programada	24
T3	Sustitución programada	1
T4	Búsqueda de fallas	7
T5	Ningún mantenimiento programado (descartada)	6
Total	—	69

Nota. De los 69 modos de falla evaluados, 63 derivaron en una tarea proactiva (T1 a T4) y 6 se clasificaron en política T5 (sin mantenimiento programado).

Las 63 tareas con política T1-T4 pasaron a conformar el plan de mantenimiento (desarrollado en la sección siguiente). Las 6 tareas descartadas (T5) se resumen en la Tabla 8, junto con su justificación.

Tabla 8

Tareas descartadas de la matriz de decisión (política T5)

Sistema (código)	Actividad	Motivo del descarte

Hidráulico (SHI-CAI 8A1)	Monitoreo de tiempos de ciclo y presión en HMI	Monitoreo operativo redundante; no genera intervención de mantenimiento independiente
Inyección (SIN-HCL 20A1)	Monitoreo de curva de presión de sostenimiento en HMI	Indicador de proceso ya cubierto por otras tareas de condición
Control Electrónico (SCE-HMI 26A1)	Limpieza superficial con paños secos	Housekeeping general, sin relación directa con el modo de falla
Control Electrónico (SCE-MIO 29A1)	Reapriete de borneras del módulo I/O	Redundante con otras inspecciones/reaprietes de cableado
Control Electrónico (SCE-TRC 31A2)	Limpieza de filtros del gabinete	Redundante con la tarea 27A1 (limpieza de filtros de ventilación)
Refrigeración (SRF-AAB 33A1)	Control de calidad de agua y desincrustación del anillo	Duplicada con la tarea de control de calidad de agua (32A1); se consolida

Nota. Las tareas listadas corresponden a las 6 clasificadas en política T5, descartadas del plan de mantenimiento por tratarse de actividades redundantes, ya cubiertas por otra tarea o de monitoreo operativo sin intervención de mantenimiento asociada.

5.4 Plan de mantenimiento, rutas de mantenimiento e inventario de repuestos

5.4.1 Plan de mantenimiento

Las 63 tareas proactivas seleccionadas en la matriz de decisión se estructuraron en el plan de mantenimiento, especificando para cada una el sistema y componente, la actividad, la frecuencia, el responsable de ejecución, las herramientas requeridas, las condiciones de ejecución, el código de la hoja de trabajo asociada y el código de repuesto (cuando aplica). La Tabla 9 resume la distribución de tareas por responsable de ejecución.

Tabla 9

Distribución de tareas del plan de mantenimiento por responsable de ejecución

Responsable	N.° de tareas
Técnico mecánico de mantenimiento	40
Técnico electricista / instrumentista	14
Técnico de mantenimiento + HSE	5
Analista predictivo / contratista especializado	4
Total	63

Nota. La distribución refleja la asignación de las 63 tareas proactivas del plan de mantenimiento según el perfil del responsable de su ejecución en planta.

5.4.2 Rutas de mantenimiento

Con el fin de facilitar su ejecución en planta, las 63 tareas del plan de mantenimiento se agruparon en rutas por frecuencia y responsable, de modo que cada técnico pueda ejecutar su ronda diaria, semanal, mensual, trimestral, semestral o anual como un solo recorrido, con el listado de actividades y el equipo/herramientas necesarias. Una tarea (SSE-BMS, componente del bloqueo mecánico de seguridad) tiene doble frecuencia diaria y semestral por lo que aparece en dos rutas distintas; en consecuencia, las 63 tareas generan 64 entradas de ruta, distribuidas como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10

Distribución de las entradas de ruta de mantenimiento por frecuencia

Frecuencia	N.° de entradas de ruta
Diaria	16
Semanal	7
Mensual	7
Trimestral	11

Semestral	9
Anual	7
Basada en horas de uso	3
Por evento (cambio de molde/material)	4
Total	64

Nota. El total de 64 entradas de ruta supera el número de tareas (63), dado que la tarea SSE-BMS (bloqueo mecánico de seguridad) tiene doble frecuencia diaria y semestral y por tanto aparece en dos rutas distintas.

5.4.3 Inventario de repuestos

Cada repuesto del inventario se derivó directamente de una tarea proactiva programada (reemplazo hard-time) o de un modo de falla de contingencia identificado en la Matriz FMECA, y se clasificó según el criterio VED: Vital (falla causa parada total, riesgo de seguridad o efecto en cascada; stock permanente obligatorio), Esencial (afecta producción o calidad sin riesgo de seguridad ni parada total inmediata; stock según programación) o Deseable (bajo impacto o sustituible por alternativa genérica; gestión bajo pedido). El inventario resultante comprende 42 ítems, distribuidos como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11

Distribución del inventario de repuestos por clasificación VED

Clasificación VED	N.° de ítems
Vital	23
Esencial	15
Deseable	4
Total	42

Nota. La clasificación VED corresponde a Vital, Esencial y Deseable, según el impacto de cada repuesto sobre la seguridad, la producción y la continuidad operativa de la inyectora.

Más de la mitad de los repuestos (23 de 42, el 55 %) se clasificaron como vitales, coherente con la concentración de riesgo identificada en la matriz FMECA. La Tabla 12 presenta los ocho repuestos vitales de mayor criticidad (por NPR del modo de falla que los origina).

Tabla 12

Repuestos vitales de mayor criticidad del inventario

Sistema	Repuesto / consumible	NPR
Hidráulico	Kit de reparación válvula proporcional/direccional (bobinas + sellos)	384
Refrigeración	Desincrustante químico para circuito de agua	343
Control Electrónico	Termocuplas de barril (juego por zonas)	336
Control Electrónico	Borneras y terminales de conexión (repuesto genérico)	336
Hidráulico	Filtro de aire / respiradero del tanque	315
Inyección	Collar antirretorno (check ring) + asiento	294
Seguridad	Interruptores de límite de seguridad (finales de carrera, puertas)	280
Hidráulico	Rodamientos de bomba/servomotor (kit)	224

Nota. Los repuestos listados corresponden a los de mayor NPR entre los clasificados como vitales, y su criticidad se deriva del modo de falla que los origina.

En conjunto, la taxonomía ISO 14224, la matriz FMECA, la matriz de decisión RCM, el plan de mantenimiento, las rutas de mantenimiento, el inventario de repuestos y las seis hojas de trabajo desarrolladas dan cumplimiento a los tres objetivos específicos planteados para este trabajo: el diagnóstico basado en ISO 14224, el análisis FMECA para determinar las actividades

de mantenimiento preventivo, y la estructuración del plan de mantenimiento y el inventario de repuestos para asegurar la disponibilidad operativa de la inyectora Welltec 190 SE II.

5.4.4 Integración de herramientas para la gestión del mantenimiento

El desarrollo del plan de mantenimiento, las rutas de ejecución y el inventario técnico de repuestos permitió integrar en una misma estructura la información obtenida durante las diferentes etapas del proyecto. De esta manera, la taxonomía establecida con base en ISO 14224, el análisis FMECA y la lógica de decisión RCM se vincularon directamente con las actividades de mantenimiento propuestas, sus frecuencias de ejecución, responsables, recursos requeridos y repuestos asociados. Esta integración responde al tercer objetivo específico del proyecto, orientado a estructurar el plan de mantenimiento y el inventario de repuestos para contribuir a la disponibilidad de la inyectora dentro del proceso productivo.

Como base de todo el análisis presentado en la sección 5.3, se desarrolló la Matriz FMECA en formato Excel, en la cual se documentaron los 40 componentes codificados de la inyectora con su función y estándar de desempeño, su falla funcional, sus modos de falla, los efectos de cada modo, la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detección (D), el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) resultante, y la tarea proactiva seleccionada para cada uno de los 69 modos de falla evaluados. La Figura 15 presenta un extracto de esta matriz correspondiente al sistema hidráulico, el cual concentra varios de los NPR más altos de toda la matriz (ver Tabla 5).

Figura 15

Extracto de la Matriz FMECA del sistema hidráulico

SISTEMA HIDRÁULICO OPE-INY-01-SHI											
TAXONOMÍA (Nivel 8)	Función y Estándar de Desempeño	Falla Funcional	Modo de Falla	Efectos de la Falla y Consecuencia	ID Falla	Evaluación NPR (S × O × D)				Tarea Proactiva Seleccionada	Frecuencia
						S	O	D	NPR		
OPE-INY-01-SHI-SER	Generar presión hidráulica para los cilindros, manteniendo un flujo estable.	Incapaz de generar presión hidráulica en absoluto.	Eje de la bomba roto por fatiga.	La máquina se detiene abruptamente. El panel arroja alarma de caída de presión.	1A1	8	4	7	**224**	Medición de corriente del servomotor y presión de salida de la bomba	Trimestral
			Servomotor quemado (cortocircuito eléctrico).	La máquina se detiene por completo. El control arroja alarma del servo-driver y el interruptor principal se dispara. Olor a quemado.	1A2	8	4	6	**192**	Limpieza en seco (con aire a baja presión o cepillo) de las hojas del ventilador y las aletas de disipación del motor principal	Semestral
			Acople mecánico entre servomotor y bomba cizallado.	El servomotor se escucha girar libremente pero no hay flujo de aceite ni movimiento en la máquina	1A3	8	4	7	**224**	Medición de corriente del servomotor y presión/caudal de salida de la bomba	Trimestral
			Nivel de aceite en el tanque por debajo del punto de succión.	Ruido fuerte de cavitación en la bomba. La bomba succiona aire, la presión cae a cero y los movimientos se detienen	1A4	7	6	2	**84**	Revisión visual del nivel de aceite en el visor lateral del tanque para asegurar que no baje de la línea central	Diario
			Filtro de succión de la bomba totalmente bloqueado.	Ruido de cavitación severo seguido por la caída total de la presión al no poder ingresar fluido a la bomba.	1A5	7	6	5	**210**	Limpieza externa de la escotilla y la parte superior del tanque hidráulico antes de su apertura. Extraer el filtro de succión y sellar la escotilla inmediatamente para proteger el aceite. Lavar la malla del filtro externamente en un contenedor con gasolina, secar con aire comprimido de adentro hacia afuera y reinstalar.	Trimestral
		Genera presión menor a la de trabajo.	Desgaste abrasivo interno en rotores	Lentitud en el ciclo, tiros cortos en piezas.	1B1	6	7	6	**252**	Análisis tribológico (físico-químico y conteo de partículas) del aceite hidráulico para detectar desgaste prematuro de la bomba	Trimestral
			Fuga en la junta de la carcasa.	Aparece una mancha o goteo de aceite en la base de la bomba, visible durante la ronda de inspección. La presión de trabajo baja gradualmente y el nivel del tanque disminuye con el tiempo. Si no se atiende, aumenta el consumo de aceite y el riesgo de resbalones en el área.	1B2	5	6	2	**60**	Inspección visual en busca de fugas.	Diario
		Genera presión mayor a la de trabajo.	Sensor de presión del servomotor descalibrado.	Sobrepresión sin límite. Peligro de estallido de mangueras.	1C1	10	3	9	**270**	Calibración del lazo de control del sensor.	Anual

Nota. La figura corresponde a un extracto de la Matriz FMECA elaborada en formato Excel, correspondiente al sistema hidráulico; la matriz completa, con los 40 componentes y los 69 modos de falla evaluados, se anexa al proyecto dado su volumen.

Como resultado de la matriz de decisión RCM, 63 tareas proactivas fueron incorporadas al plan de mantenimiento. Para cada tarea se definieron campos de gestión como sistema, componente, actividad, frecuencia, responsable, herramientas requeridas, condiciones de ejecución, hoja de trabajo asociada y código de repuesto cuando aplica. Esta estructura permite establecer trazabilidad entre el componente identificado en la taxonomía, el modo de falla evaluado y la acción de mantenimiento finalmente propuesta. La Figura 16 presenta un extracto de esta herramienta implementada en Excel.

Con el propósito de facilitar la aplicación del plan en planta, las tareas se organizaron posteriormente en rutas de mantenimiento por frecuencia y responsable, permitiendo agrupar las intervenciones diarias, semanales, mensuales, trimestrales, semestrales, anuales, por horas de operación y por eventos específicos del proceso. Las 63 tareas generan 64 entradas de ruta debido a que una de ellas requiere más de una frecuencia de ejecución. Esta organización transforma el listado de actividades en una herramienta operativa que puede ser utilizada para la

planificación y programación de las rondas de mantenimiento. La Figura 17 presenta un extracto de las rutas de mantenimiento diaria y semanal.

De manera complementaria, se estructuró un inventario de repuestos y consumibles vinculado a los modos de falla y a las tareas de mantenimiento, incorporando información como sistema, código de componente, modo de falla de referencia, NPR, clasificación VED, justificación de criticidad, especificación técnica, cantidad mínima, tarea asociada y tiempo estimado de suministro. El inventario comprende 42 ítems, de los cuales 23 fueron clasificados como vitales, 15 como esenciales y 4 como deseables. Esta clasificación permite que la gestión de repuestos deje de responder únicamente a compras posteriores a la falla y se oriente hacia una disponibilidad planificada de los elementos con mayor impacto sobre la continuidad operacional. La Figura 18 muestra un extracto de este inventario.

Adicionalmente, se generó una herramienta para la verificación de especificaciones pendientes de los repuestos, en la cual se registra la información técnica faltante, el método propuesto para obtenerla, el responsable de la verificación y su estado. Este elemento resulta relevante debido a que evita incorporar al inventario referencias incompletas o no verificadas y permite que la base de datos sea actualizada progresivamente a partir de información obtenida directamente del equipo, placas, etiquetas, mediciones o documentación técnica. La Figura 19 presenta un extracto de esta herramienta de verificación.

En conjunto, las herramientas desarrolladas en formato digital constituyen una primera etapa de sistematización de la gestión del mantenimiento de la inyectora Welltec 190 SE II. La relación entre taxonomía, fallas, tareas, rutas, hojas de trabajo y repuestos permite pasar de una gestión predominantemente reactiva y con información dispersa hacia una estructura organizada, trazable y susceptible de actualización. El plan desarrollado no constituye por sí solo un sistema

computarizado de gestión de mantenimiento, pero establece una base documental que posteriormente podría ser migrada a este tipo de plataformas.

Finalmente, la Welltec 190 SE II puede considerarse un activo piloto para la estructuración de la gestión del mantenimiento en Metalcort, debido a que la metodología aplicada permite ser replicada progresivamente en otros equipos de la organización. La codificación de activos, la identificación sistemática de modos de falla, la definición de tareas, la generación de rutas y la clasificación de repuestos constituyen elementos que pueden extenderse a otros activos de acuerdo con su criticidad. De esta manera, el proyecto no solo entrega un plan específico para la inyectora, sino que proporciona una estructura inicial para avanzar hacia una gestión del mantenimiento planificada y, posteriormente, hacia prácticas de gestión de activos.

Figura 16

Plan de mantenimiento de la inyectora Welltec 190 SE II

PLAN DE MANTENIMIENTO INYECTORA WELLTEC 190 SE II – OPE-INY-01								
SISTEMA	**CODIGO DEL COMPONENTE**	**ACTIVIDAD**	**FRECUENCIA**	**RESPONSABLE**	**HERRAMIENTAS REQUERIDAS**	**CONDICIONES DE EJECUCIÓN**	**CÓDIGO HT**	**CÓDIGO REPUESTO**
Sistema hidráulico	OPE-INY-01-SHI-SER (1A1)	Medición de corriente del servomotor y presión de salida de la bomba, comparando contra línea base, para detectar tendencias de desgaste de rodamientos o fatiga del eje.	Trimestral	Analista predictivo / contratista especializado	Pinza amperimétrica / analizador de calidad de energía, manómetro o transductor de presión, registrador de datos	Equipo en operación normal y estable; registrar valores base.	HT-OPE-INY-01-SHI-SER-1A1	REP-01
Sistema hidráulico	OPE-INY-01-SHI-SER (1A2)	Limpieza en seco (con aire a baja presión o cepillo) de las hojas del ventilador y las aletas de disipación del motor principal.	Semestral	Técnico mecánico de mantenimiento	Linterna, paños industriales, grasa/aceite especificado, kit de limpieza	Equipo detenido, bloqueado (LOTO) y sin presión.	HT-OPE-INY-01-SHI-SER-1A2	– (sin repuesto asociado)

Nota. La figura corresponde a un extracto del plan de mantenimiento desarrollado en formato Excel.

Figura 17

Rutas de mantenimiento diaria y semanal

RUTA DIARIA para Técnico electricista / instrumentista				
Equipo/herramientas de la ronda: Multímetro; destornillador de torque; pinza amperimétrica y elementos LOTO				
Nº	Sistema	Código FMECA	Actividad	Condición de ejecución
1	Sistema de seguridad	OPE-INY-01-SSE-ILS (38A1) / SSE-T4	1. Abrir la puerta durante movimiento para verificar que el cierre se detiene 2. Revisar físicamente que el interruptor no esté "puenteado" eléctricamente	Prueba controlada con área despejada y permisos HSE.

RUTA SEMANAL para Técnico mecánico de mantenimiento				
Equipo/herramientas de la ronda: EPP y formato de inspección; Herramienta manual estándar; Linterna; grasa/aceite especificado; kit de limpieza; paños industriales				
Nº	Sistema	Código FMECA	Actividad	Condición de ejecución
1	Sistema hidráulico	OPE-INY-01-SHI-ENF (4A2)	Limpieza general (sopleteo) de aspas e intercambiador de calor.	Aplicar EPP y seguir el procedimiento estándar del equipo.
2	Sistema hidráulico	OPE-INY-01-SHI-CEX (9A1)	Engrase de la placa guía del eyector con aceite delgado	Equipo detenido, bloqueado (LOTO) y sin presión.
3	Sistema cierre	OPE-INY-01-SCI-MEP (10A2)	Inspección visual periódica de la palanca buscando "polvo de hierro" (síntoma de desgaste).	Durante ronda rutinaria o parada breve de inspección.
4	Sistema cierre	OPE-INY-01-SCI-AAM (15A1)	Inspección y lubricación de roscas con grasa de litio (Mobilux EP 2).	Aplicar EPP y seguir el procedimiento estándar del equipo.

Nota. La figura corresponde a un extracto de las rutas de mantenimiento diaria y semanal, elaboradas en Excel.

Figura 18

Inventario de repuestos y consumibles de la inyectora Welltec 190 SE II

INVENTARIO DE REPUESTOS Y CONSUMIBLES INYECTORA WELLTEC 190 SE II (OPE-INY-01)													
METALCORT, Bucaramanga (De la Matriz FMECA (ISO 14224 / SAE JA1011-JA1012)) Clasificación VED: Vital / Esencial / Deseable													
Cada repuesto de esta lista sale de una tarea proactiva ya programada, es decir, un reemplazo por tiempo cumplido, o de un modo de falla de contingencia identificado en la Matriz FMECA. Los tiempos de entrega y los costos todavía hay que validarlos con proveedores locales de Bucaramanga y Bogotá, y con Welltec Machinery Ltd, en Hong Kong, para las piezas que son específicas de esa marca.													
Nº	Sistema	Código componente (ISO 14224)	Repuesto / Consumible	Tipo de repuesto	ID Falla FMECA (ref.)	NPR (SxOxD)	Clasificación VED	Justificación de criticidad	Especificación técnica / referencia	Cantidad mínima	Tarea(s) HT asociada(s)	Lead time estimado	Observaciones
SISTEMA HIDRÁULICO													
1	SISTEMA HIDRÁULICO	OPE-INY-01-SHI-SER	Rodamientos de bomba/servomotor (kit)	Contingencia	1A1	224	Vital	Parada abrupta total de la máquina; detectado por medición de corriente y presión trimestral, pero la falla es súbita al llegar al límite de fatiga.	Según especificación del fabricante de la bomba (verificar placa/despiece Welltec)	1	HT-OPE-INY-01-SHI-SER-1A1	A definir con proveedor - posible importación	Repuesto de seguro; no tiene sustituto genérico inmediato
2	SISTEMA HIDRÁULICO	OPE-INY-01-SHI-SER	Acople mecánico servomotor-bomba	Contingencia	1A3	224	Vital	Falla súbita por cizalladura; detiene toda la generación de presión hidráulica sin previo aviso claro.	Acople flexible (tipo a confirmar: garra/elastomérico/discos para esta aplicación servomotor-bomba; verificar diseño instalado contra placa/despiece del fabricante, diámetro según el servomotor	1	HT-OPE-INY-01-SHI-SER-1A3	Corto (proveedor local de rodamientos/acoples)	
3	SISTEMA HIDRÁULICO	OPE-INY-01-SHI-FAH	Elemento filtrante de aceite hidráulico	Programado	2A1	84	Esencial	Colmatación protege la bomba (paro automático), pero deja la máquina sin producir hasta el cambio.	Elemento de filtro de retorno, ISO 46, ver referencia OEM en carcasa del filtro	2	HT-OPE-INY-01-SHI-FAH-2A1	Corto (distribuidor local de filtración hidráulica)	

Nota. La figura corresponde a un extracto del inventario de repuestos y consumibles, elaborado en Excel.

Figura 19

Verificación de especificaciones pendientes del inventario de repuestos

VERIFICACIÓN DE ESPECIFICACIONES PENDIENTES - INVENTARIO DE REPUESTOS - INYECTORA WELLTEC 190 SE II OPE-INY-01							
METALCORT, Bucaramanga | Del Inventario de repuestos | Repuestos con especificación incompleta, verificables sin técnico							
Estos son los repuestos del Inventario que hoy quedaron con marca, modelo o medida pendiente de confirmar, y que se pueden completar leyendo una placa, una etiqueta ya pegada en el equipo, o con una medición simple (cinta métrica, calibrador, galga de roscas), sin necesidad de contratar un técnico externo. Se puede aprovechar alguna revisión programada para validar estos datos.							
Nº (ref. Inventario)	Sistema	Repuesto / Consumible	Qué le falta hoy	Cómo verificarlo fácil	Responsable sugerido	Estado	Especificación
34	Sistema de refrigeración	Mangueras de agua de enfriamiento (molde y barril)	Diámetro y presión de trabajo	Presión impresa en la manguera; diámetro con cinta métrica	Operario	Pendiente	
35	Sistema de refrigeración	Juntas / empaquetaduras de válvulas y colectores de agua	Diámetro de válvula o colector	Medir directamente con calibrador	Operario	Pendiente	
37	Sistema de refrigeración	Manguera y acoples del anillo de agua (zona de alimentación)	Diámetro del anillo de refrigeración	Medir con cinta métrica alrededor del barril	Operario	Pendiente	
SISTEMA DE SEGURIDAD							
38	Sistema de seguridad	Botón de parada de emergencia	Referencia exacta del panel	Diámetro de corte estándar 22 mm; foto de la etiqueta del botón	Operario	Pendiente	

Nota. La figura corresponde a un extracto de la herramienta de verificación de especificaciones pendientes de los repuestos, elaborada en Excel.

El análisis del historial de fallas y de la disponibilidad semanal de la inyectora Welltec 190 SE II permitió evidenciar que las intervenciones correctivas pueden generar pérdidas significativas de tiempo productivo, alcanzando una reducción de la disponibilidad semanal estimada hasta el 78,17 % durante la falla registrada en el sistema de inyección. A partir del diagnóstico técnico y del análisis FMECA, se identificaron los modos de falla de los sistemas críticos y se establecieron actividades de mantenimiento preventivo orientadas a controlar sus causas, detectar oportunamente condiciones de deterioro y reducir la ocurrencia de paradas no programadas.

Como resultado, se estructuró un plan de mantenimiento conformado por 63 tareas proactivas, organizadas por frecuencia y responsable, junto con un inventario de 42 repuestos y consumibles clasificados según su criticidad. La ejecución programada de estas actividades y la disponibilidad anticipada de repuestos permitirán reducir la dependencia del mantenimiento correctivo y los tiempos de intervención, contribuyendo al mejoramiento de la disponibilidad operativa de la inyectora y a la continuidad del proceso productivo.

Adicionalmente, el desarrollo de la taxonomía del equipo, la matriz FMECA, las rutas de mantenimiento, las hojas de trabajo estandarizadas, el inventario de repuestos y los formatos de registro y seguimiento constituye un avance en la gestión de activos de la empresa, que anteriormente se caracterizaba por un enfoque predominantemente correctivo y una documentación limitada de las intervenciones. La integración de estas herramientas permite establecer una gestión del mantenimiento organizada, trazable y basada en información técnica, facilitando la planificación de actividades, el seguimiento de los indicadores de desempeño y la toma de decisiones sobre los recursos necesarios para conservar la funcionalidad del equipo.

De esta manera, se da cumplimiento al tercer objetivo específico, al desarrollar un plan de mantenimiento y un inventario de repuestos que, junto con las herramientas de gestión implementadas, proporcionan las bases técnicas para prevenir fallas, reducir las paradas no programadas y contribuir al incremento de la disponibilidad operativa de la inyectora Welltec 190 SE II. Su efectividad podrá verificarse mediante el seguimiento de los indicadores de mantenimiento y disponibilidad durante la ejecución del plan.

6. Conclusiones

Este trabajo dio respuesta a la pregunta de investigación planteada: el diseño de un plan de mantenimiento fundamentado en el análisis de fallas potenciales sí permite estructurar una alternativa técnica y viable frente al mantenimiento correctivo de emergencia que hasta ahora ha caracterizado la operación de la inyectora Welltec 190 SE II en Metalcort, y establece las bases para aumentar su disponibilidad operativa de forma sostenida.

El diagnóstico basado en la norma ISO 14224 permitió construir una taxonomía jerárquica completa de la inyectora, con 6 sistemas y 40 componentes codificados, y un historial de fallas que permitió evidenciar el impacto en las paradas no planificadas por averías en la disponibilidad de la inyectora llegando a caer por debajo del 80%, y también las limitaciones de una lectura puramente histórica de la confiabilidad con solo 9 eventos correctivos registrados en 7,2 años.

El análisis FMECA, aplicado a los 40 componentes codificados, identificó 69 modos de falla y demostró que el riesgo de la inyectora no está distribuido de forma homogénea: el 36 % de los modos supera el umbral crítico de NPR y el 20 % más severo concentra el 34 % del riesgo total. Este hallazgo es, en sí mismo, el principal aporte del proyecto: confirma que la baja frecuencia histórica de fallas no equivale a bajo riesgo, y que un enfoque de mantenimiento basado únicamente en el historial correctivo habría subestimado sistemáticamente la exposición real de la empresa. La matriz de decisión RCM, construida sobre SAE JA1011, SAE JA1012 y Moubray (2004), tradujo estos 69 modos de falla en 63 tareas proactivas técnicamente factibles y económicamente justificadas (31 a condición, 24 de restauración programada, 1 de sustitución programada y 7 de búsqueda de fallas), descartando 6 por redundancia.

El plan de mantenimiento, las rutas organizadas por frecuencia y responsable, y el inventario de 42 repuestos clasificados por criticidad VED (23 vitales, 15 esenciales y 4 deseables) traducen el análisis técnico en una herramienta operativa lista para ejecutarse en planta, con trazabilidad completa entre cada modo de falla, la tarea que lo mitiga, la hoja de trabajo que la desarrolla y el repuesto que la soporta. Con esto se da cumplimiento al tercer objetivo específico y, en conjunto con los dos anteriores, al objetivo general del trabajo.

Las seis hojas de trabajo desarrolladas una por sistema y la divulgación y capacitación ya realizada al personal de Metalcort confirman que el plan no queda como un ejercicio académico aislado, sino como un instrumento apropiado por la organización, coherente con el propósito declarado en la justificación del proyecto.

Desde la perspectiva metodológica, el proyecto demuestra que es posible construir un proceso RCM riguroso y trazable a las normas de referencia (SAE JA1011, SAE JA1012, ISO 14224, UNE-EN 13306 y UNE-EN 13460) incluso en el contexto de una pequeña y mediana empresa con un solo activo crítico y sin un sistema de gestión de mantenimiento previamente estructurado, aportando así un caso de aplicación práctico a la ingeniería de mantenimiento en el sector plástico de la región.

De este modo, el desarrollo del presente proyecto permitió establecer una estrategia integral de mantenimiento para la inyectora Welltec 190 SE II, fundamentada en el diagnóstico técnico del equipo, el análisis de modos de falla y la estructuración de actividades preventivas orientadas a reducir las intervenciones correctivas no programadas. La identificación de las pérdidas de disponibilidad semanal, junto con la definición de 63 tareas proactivas y un inventario de 42 repuestos y consumibles, proporciona las herramientas necesarias para prevenir fallas, disminuir los tiempos de parada y contribuir al mejoramiento de la disponibilidad

operativa del proceso productivo. Asimismo, la elaboración e integración de la taxonomía del equipo, las matrices FMECA y RCM, las rutas de mantenimiento, las hojas de trabajo y los formatos de registro y seguimiento representan un avance en la gestión de activos de Metalcort, al establecer una estructura documental y técnica que anteriormente no se encontraba consolidada. De esta manera, el proyecto permite pasar de una gestión predominantemente correctiva a un enfoque de mantenimiento planificado, basado en el análisis de fallas y la toma de decisiones sustentada en información técnica, estableciendo las bases para mejorar la confiabilidad, la disponibilidad y la continuidad del proceso productivo, así como para extender progresivamente esta metodología a otros activos de la empresa.

7. Recomendaciones

A partir de los resultados y limitaciones identificadas durante el desarrollo del proyecto, se plantean las siguientes recomendaciones para Metalcort y para futuros trabajos relacionados:

- Implementar un sistema informático de gestión de mantenimiento (CMMS), aunque sea de baja complejidad, para registrar la ejecución de las 63 tareas del plan y las órdenes de trabajo generadas; esto permitiría, en pocos años, contar con un historial de fallas más robusto que el disponible actualmente (n = 9 eventos) y poder calcular la disponibilidad, el MTBF y el MTTR con una confiabilidad estadística.
- Gestionar con IMOCOM y con proveedores locales alternativas de suministro (stock de consignación, acuerdos de lead time preferencial o repuestos genéricos equivalentes) para los repuestos vitales de mayor lead time, en particular el kit de la válvula proporcional/direccional (NPR 384) y los componentes de importación del sistema de control electrónico, dado que son estos, y no la frecuencia de falla, los que concentran el riesgo real para la continuidad del negocio.
- Evaluar la incorporación de tecnologías de monitoreo de condición (sensores de vibración permanentes, análisis periódico de aceite) en los componentes con tareas T1 de mayor criticidad, para fortalecer la capacidad predictiva del plan más allá de la inspección visual y manual.
- Revisar y actualizar la matriz FMECA y la matriz de decisión RCM cada vez que se presenten cambios significativos en el proceso (nuevos moldes, cambios de material, modificaciones a la máquina) o cuando el historial de fallas acumule información suficiente para ajustar los valores de severidad, ocurrencia y detección con base en datos reales de planta.

- Extender la metodología aplicada en este trabajo: taxonomía ISO 14224, FMECA y matriz de decisión RCM a otros equipos críticos de Metalcort, aprovechando el formato de hojas de trabajo y el criterio de clasificación VED ya validados en este proyecto.
- Realizar, en un trabajo futuro, un análisis costo-beneficio del plan de mantenimiento implementado comparando los costos de mantenimiento preventivo frente a los costos históricos de mantenimiento correctivo y paradas no planificadas, que permita cuantificar económicamente el retorno de la inversión en confiabilidad.

Referencias Bibliográficas

Asociación Española de Normalización. (2009). UNE-EN 13460:2009 — Mantenimiento. Documentos para el mantenimiento.

Asociación Española de Normalización. (2010). UNE-EN 13306:2011 — Mantenimiento. Terminología del mantenimiento.

Birolini, A. (2017). Reliability Engineering: Theory and Practice (8.ª ed.). Springer.

Brydson, J. A. (1999). Plastics Materials (7.ª ed.). Butterworth-Heineman.

Gómez, L. (2021). Propuesta para la implementación de la metodología de Mantenimiento Productivo Total en el proceso de inyección de preformas [Trabajo de grado, Universidad de América]. Repositorio Institucional Universidad de América. https://repository.uamerica.edu.co/bitstreams/bf994508-9659-4100-ad0ad1f317c5be23/download

Groover, M. P. (2014). Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas (5.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana.

Jiménez, C. (2019). Optimización del plan de mantenimiento preventivo para moldes de inyección de preforma en Iberplast S.A.S. [Trabajo de grado, Universidad de América]. Repositorio Institucional Universidad de América. https://repository.uamerica.edu.co/bitstreams/d11a0a93-92a3-4c68-b8c1-1408f7af1dda/download

Mendoza, R. (2020). Mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) para mejorar la disponibilidad en máquinas inyectoras de una empresa de plástico [Tesis de grado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN.

https://repositorio.upn.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/a8148211-420a-4dc6-ac13-29b03fd09839/content

Ministerio del Trabajo de Colombia. (2019). Resolución 0312 de 2019, por la cual se definen los estándares mínimos del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo SG-SST.

Moubray, J. (1997). Reliability-centered maintenance (2.ª ed.). Industrial Press.

Moubray, J. (2004). Mantenimiento centrado en confiabilidad (2.ª ed.). Aladon LLC.

Organización Internacional de Normalización. (2016). Industrias de petróleo, petroquímica y gas natural. Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento para equipos (ISO 14224:2016).

SAE International. (1999). JA1011 — Evaluation criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) processes.

SAE International. (2002). JA1012 — A guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) standard.

Stamatis, D. H. (2003). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution (2.ª ed.). ASQ Quality Press.

Welltec Machinery. (2018). Manual de operación y mantenimiento: Inyectoras de la serie SE II. Cosmos Machinery Enterprises Limited.