

Modelo de costo del ciclo de vida de tornillos para prensas de aceite crudo de palma y recubrimientos como alternativa para extender su vida útil



José Carlos Montero Vega, Favián Enrique Guevara Trujillo,
Juan Camilo Barrera Hernández, Luisa Fernanda Fajardo Hernández



Boletín Técnico No. 32

Modelo de costo del ciclo de vida de tornillos para prensas de aceite crudo de palma y recubrimientos como alternativa para extender su vida útil

Autores

José Carlos Montero Vega
Favián Enrique Guevara Trujillo
Juan Camilo Barrera Hernández
Luisa Fernanda Fajardo Hernández

Área de Ingeniería
Programa de Procesamiento
Centro de Investigación en Palma de Aceite - Cenipalma
Bogotá, julio de 2013

Boletín Técnico No. 32

Modelo de costo del ciclo de vida de tornillos para prensas de aceite crudo de palma y recubrimientos como alternativa para extender su vida útil

Publicación del Centro de Investigación en Palma de Aceite - Cenipalma, cofinanciada por Fedepalma - Fondo de Fomento Palmero. Convenio SENA-Cenipalma N° 0337/11.

Autores

José Carlos Montero Vega
Favián Enrique Guevara Trujillo
Juan Camilo Barrera Hernández
Luisa Fernanda Fajardo Hernández

Revisión Técnica

Mauricio Mosquera M.

Coordinación editorial

Yolanda Moreno M.
Esteban Mantilla

Diagramación

Fredy Johan Espitia Ballesteros

Impresión

Javegraf

Cenipalma

Calle 20 A No. 43 A-50, piso 4.
PBX: (57-1) 2086300 Fax: (57-1) 3681152.
www.cenipalma.org
Bogotá, D. C., Colombia.

Julio de 2013

ISBN: 978-958-8360-44-7

“Se deja expresa constancia de que el presente contenido constituye las recomendaciones que profesionalmente resultan adecuadas e idóneas con base en el estado actual de la técnica, los estudios científicos, así como las investigaciones propias adelantadas, de tal manera que sin perder su rigor y experticia, no podrían entenderse como garantía absoluta ni asegurar un resultado concreto, dada las especificidades propias de cada caso”.

Presentación

En el año 2011, el Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA, en el marco de la Convocatoria 021, invitó al sector empresarial a presentar propuestas para desarrollar proyectos de innovación y desarrollo tecnológico que impacten la productividad y competitividad de las empresas y que impulsen los sectores de clase mundial.

Uno de los proyectos financiados en esta convocatoria fue ejecutado por Cenipalma mediante el Convenio 337/11, con el objeto de desarrollar tecnologías para el incremento de la competitividad de las plantas de beneficio de aceite de palma mediante la gestión integral de mantenimiento.

El diagnóstico inicial de las plantas de beneficio en Colombia demostró que para fortalecer su competitividad y llegar a ser consideradas de clase mundial, requieren implementar acciones en distintos procesos, con actividades constantes de mejora continua.

Uno de los procesos a implementar es el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM por sus siglas en inglés: *Reliability Centered Maintenance*), proceso con origen en la industria aeronáutica desarrollado en los años 70, con el objetivo de reducir el costo de mantenimiento enfocando los esfuerzos en la conservación de la funcionalidad de los sistemas, evitando acciones de mantenimiento que no son estrictamente necesarias.

El Área de Ingeniería del Programa de Procesamiento de Cenipalma, como un primer paso en este proceso de transformación del concepto de mantenimiento en las plantas de beneficio, se enfocó en el análisis del costo de ciclo de vida de equipos y componentes críticos, iniciando con el módulo de Aceite de Palma Crudo (APC), en el cual los tornillos de prensado por su nivel de desgaste y valor de reposición y rotación, representan un alto costo de mantenimiento.

El trabajo se desarrolló en tres etapas:

La primera corresponde a la caracterización del desgaste de los tornillos y la información sobre variables que afectan el proceso, y se exponen en el capítulo: Costo del ciclo de vida de equipos y componentes en la administración de activos.

La segunda etapa es el análisis de los costos que se describe en el capítulo: Modelo de costo del ciclo de vida de tornillos de prensado, caso de estudio tornillos P6.

Y la última etapa revisa las alternativas para extender la vida útil de los elementos, información que junto con el análisis de viabilidad es descrita en el capítulo: Alternativas para extender la vida útil de los tornillos: recubrimientos.

Esperamos que este modelo se convierta en una herramienta clave para la toma de decisiones en los departamentos de mantenimiento de las plantas de beneficio en Colombia, ayudando en sus planes de trabajo como una alternativa tecnológica para reducir los costos de procesamiento del fruto de la palma y así incrementar su productividad.

Contenido

	Pág.
Introducción	7
Costo del ciclo de vida de equipos y componentes en la administración de activos	9
Confiabilidad en la operación	11
Ciclo de vida	13
Costos del ciclo de vida	15
Costo de inversión	16
Costo de operación	16
Costo de mantenimiento	16
Costo de paradas	16
Costo de retiro	17
Análisis de criticidad de componentes y equipos	17
Criticidad en la administración de activos	17
Cuantificar el efecto	17
Cuantificar la velocidad	18
Cuantificar la frecuencia de fallas	18
Selección de componentes críticos	20
Modelo de costo del ciclo de vida de tornillos de prensado: caso de estudio tornillos P6	23
Selección de componentes críticos	25
Descripción de los tornillos para prensado	25
Descripción del proceso de fabricación para los tornillos de prensado seleccionados	25
Características físico-químicas	27
Características mecánicas	30
Fenómeno asociado a la operación del tornillo	32
Tipos de desgaste	32
Desgaste en los tornillos	35

Criterios de evaluación para determinar la vida útil del tornillo	35
Criterios de eficiencia de extracción y calidad del aceite.....	36
Criterios de dimensiones	38
Criterios operativos	41
Resultados del análisis del ciclo de vida	46
Costo del ciclo de vida	48
Alternativas para extender la vida útil de los tornillos: recubrimientos	51
Razones para extender la vida útil de un componente.....	53
Selección de recubrimientos para los tornillos	54
Recubrimiento por soldaduras	54
Selección del tipo de soldadura para recubrimiento.....	54
Esquema de recubrimiento	58
Proceso de recubrimiento por soldaduras.....	59
Recubrimiento pintura polimérica	60
Selección del polímero y proceso de recubrimiento.....	60
Resultados esperados con los recubrimientos	66
Modelo de viabilidad para la extensión de la vida útil del tornillo.....	66
Divulgación de resultados.....	71
Agradecimientos	72
Bibliografía	73

Introducción

Para alcanzar su objetivo productivo, las plantas de beneficio están conformadas por una serie de equipos y componentes que trabajan sistemáticamente de forma mecánica y/o eléctrica para procesar el fruto de palma. El trabajo mecánico al que se somete cada equipo genera cambios en las propiedades del material y produce un desgaste progresivo (Martínez, 2002), que con el tiempo causa bajos rendimientos y concentradores de tensiones que aumentan la tasa de falla, incrementando los tiempos muertos de producción y de costos de operación desequilibrados (ARATA, 2009). Desde este fenómeno mecánico, se contextualiza la importancia de manejar planes de mantenimiento enfocados en la conservación de la funcionalidad, confiabilidad y disponibilidad de los equipos, para mantener las condiciones de operación estables y confiables en el entorno de la producción de extracción de aceite.

En las plantas de beneficio se distinguen cuatro módulos productivos denominados: Aceite de Palma Crudo (APC), Recuperación de Aceite de Palma Crudo (RAPC), Recuperación del Almendra de Palma (RAP) y Aceite de Palmiste (APL). En cada uno se encuentran instalados equipos considerados de alta criticidad por su relevancia en el proceso, alto valor y frecuencia de reemplazo. La identificación de estos equipos en el proceso es de gran importancia, puesto que sirven de base para la priorización de mecanismos de mejora a través del mantenimiento, que busquen conservar el ambiente de producción en condiciones de alto rendimiento en la extracción. Desde esta premisa, el proyecto de productividad competitiva y sostenible del Programa de Procesamiento de Cenipalma, ha comenzado a desarrollar en las plantas de beneficio del sector el concepto de mantenimiento centrado en la confiabilidad (*Reliability Centered Maintenance* RCM, por sus siglas en inglés), mediante la introducción de la metodología del análisis del costo de ciclo de vida (*Life Cycle Cost* LCC, por sus siglas en inglés) en equipos y componentes críticos, con la finalidad de estimar, bajo condiciones estandarizadas, su rango efectivo de operación y el costo de su vida útil, para, de esta manera, constituirse como herramienta clave para la toma de decisiones en un plan de acción en el que intervenga el reacondicionamiento o la sustitución cíclica, como alternativa tecnológica para el incremento de la productividad y la reducción de los costos de procesamiento del fruto de palma.

La implementación de la metodología LCC se proyecta como una herramienta clave para la formulación de planes de mantenimiento acertados a la realidad del negocio, que aumenten el rendimiento y la productividad de la planta mediante el incremento de la disponibilidad de los equipos, al disminuir los tiempos muertos por fallas y

excesos de mantenimiento programados; además, se puede obtener información que maximice los equipos y componentes instalados basada en su costo/efectividad; y encontrar el equilibrio de los costos de procesamiento al incrementar la capacidad real de producción y optimización en el consumo de los recursos.

Con base en un diagnóstico inicial de las áreas de mantenimiento de las plantas de beneficio a nivel nacional, se empezó el estudio en el módulo APC cuyo equipo de mayor criticidad es la prensa de aceite crudo, que consolida el proceso de extracción y presenta un alto costo de mantenimiento al contener los tornillos de prensado, componentes de mayor desgaste, impacto, valor y rotación.

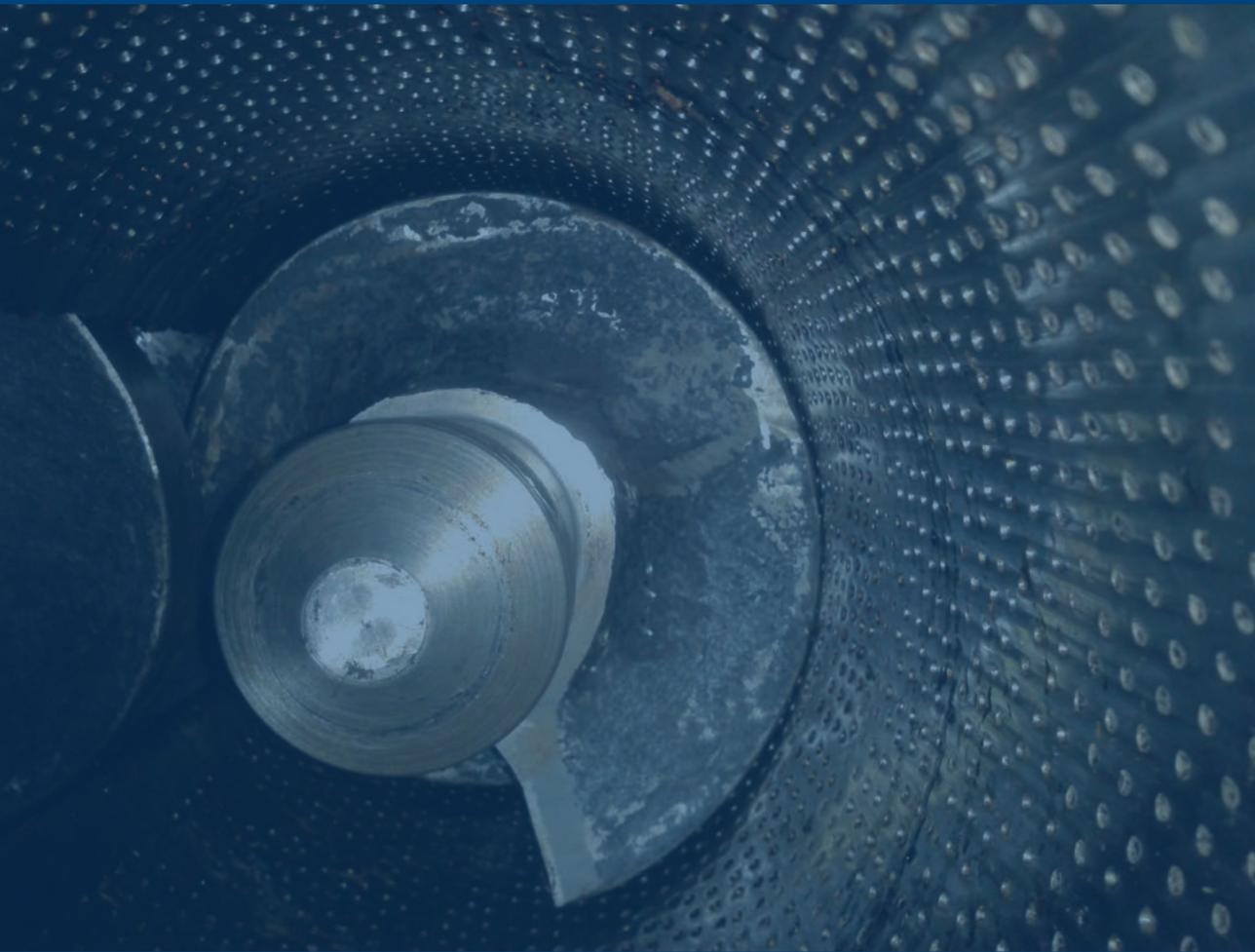
La investigación se realizó en tres etapas: la primera corresponde a la caracterización del desgaste de los tornillos fabricados con un material base (fundición SAE1030) y el levantamiento de las variables de operación susceptibles a alterar el proceso, que evidencian una tendencia de cambio al fenómeno presentado; complementándolo con la segunda parte donde se sugieren dos tipos de recubrimientos aplicados a la matriz base (tornillo), como alternativa para extender su vida útil de manera rentable y, finalmente, el análisis de viabilidad de escenarios de costos en el cual determina el tiempo requerido para que cada opción de recubrimiento genere la misma rentabilidad que la sustitución con uno nuevo.

Primera parte



Foto: Área de ingeniería, Programa de Procesamiento, Cenipalma.

Costo del ciclo de vida de equipos y componentes en la administración de activos



Costo del ciclo de vida de equipos y componentes en la administración de activos

Confiabilidad en la operación

Confiabilidad se define como la probabilidad de que un activo desempeñe su función, libre de fallos y bajo las condiciones operativas normales en determinado tiempo; pero desde el punto de vista de mantenimiento esta definición es una medida de seguridad y del riesgo asociado al funcionamiento del equipo, durante un tiempo dado (Cabrera, 2005).

Lo anterior se enmarca dentro de la confiabilidad integral y no meramente del funcionamiento intrínseco del equipo, es decir, involucra riesgos asociados a: el contexto operativo, errores de operación humanos, la confiabilidad de diseño y de la gestión de mantenimiento que se tiene en la organización. Esta distribución se evidencia en la Figura 1:

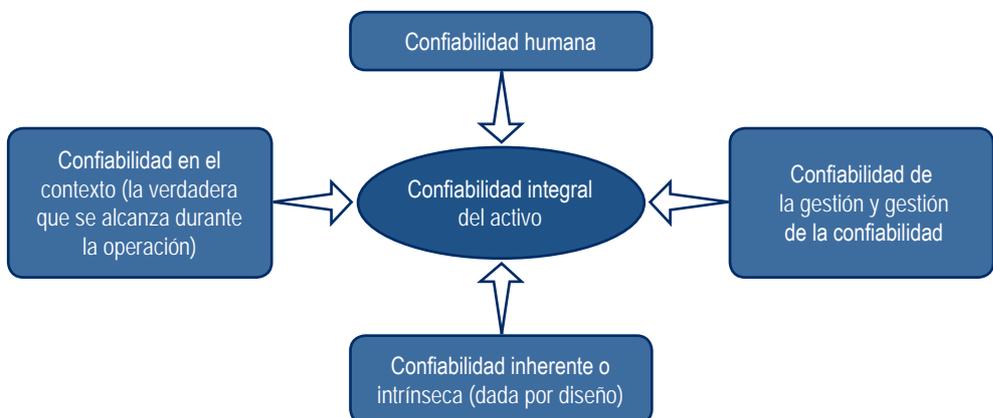


Figura 1. Confiabilidad integral.
Fuente: Modificado de (Cabrera, 2005).

Al observar la Figura 2 es necesario tener en cuenta que en primera instancia se evalúa el plan de acción que pueda tener la organización para mejorar la confiabilidad de contexto, en dado caso que no exista se debe cuantificar y crear una base histórica (método estadístico) que permita encontrar las razones que afectan la confiabilidad de operación (causas raíz) y acompañarlas de evidencias (análisis cualitativo) de la causa que está afectando el contexto del activo.

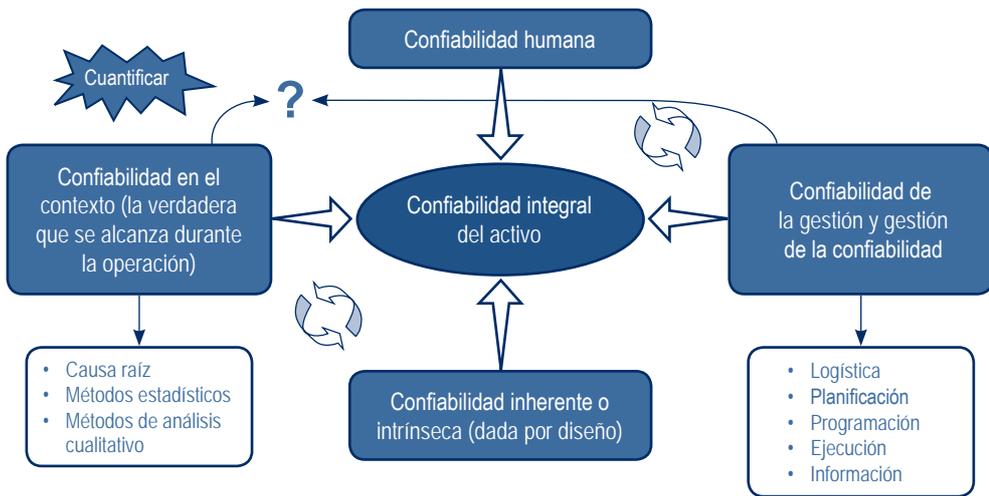


Figura 2. Confiabilidad en el contexto.

Fuente: Modificado de (Cabrera, 2005).

Al contextualizar la definición de confiabilidad integral del activo en el gremio palmero colombiano se evidencia una falencia en la “confiabilidad de la gestión y la gestión de la confiabilidad” principalmente porque no se ha cuantificado el desempeño de las metodologías de administración de activos (mantenimiento) en las plantas de beneficio y, por tanto, no se cuenta con planes de acción fuera de las intervenciones correctivas.

En este trabajo además de cuantificar el desempeño de uno de los componentes principales en las plantas de beneficio, también se realiza un análisis de causa-raíz de la falla del tornillo y de posibles soluciones que aumenten su vida útil sin disminuir la confiabilidad intrínseca del componente.

La optimización de activos entonces se convierte en un foco importante de rentabilidad para la planta de beneficio en dos formas: la disminución de los costos asociados al mantenimiento del activo y el aumento en producción (ventas) por el aumento en la disponibilidad que se logra; lo anterior se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Optimización de activos (Amendola, 2008).

Ciclo de vida

Comúnmente en la administración de activos se conoce el ciclo de vida como todas las etapas que se producen a partir de la concepción del activo hasta su descarte y disposición final (Sánchez, 2010).

El ciclo de vida del activo incluye, entre otras, las siguientes etapas durante la vida útil del activo (Sotuyo Blanco, 2013):

- Idea inicial y estudios preliminares.
- Evaluación del contexto total del proyecto, incluyendo estudios de factibilidad técnica, viabilidad económica e impacto ambiental.
- Planeación de todas las etapas que abarcará el proyecto.
- Anteproyecto, incluyendo la ingeniería básica necesaria.
- Proyecto de detalle y diseño de los procesos.
- Ejecución del proyecto de acuerdo con las etapas planificadas.

- Compra de los elementos necesarios y/o eventual manufactura de los mismos e instalación de todos los elementos de acuerdo con el proyecto.
- Puesta en marcha, prueba de las instalaciones y aceptación de las mismas.
- Operación de las instalaciones, uso o consumo de los bienes o servicios.
- Evaluación de alternativas de aprovechamiento, incluyendo los posibles reciclajes o la eventual eliminación de los elementos de la instalación.
- Descarte, reciclaje o venta de la instalación.

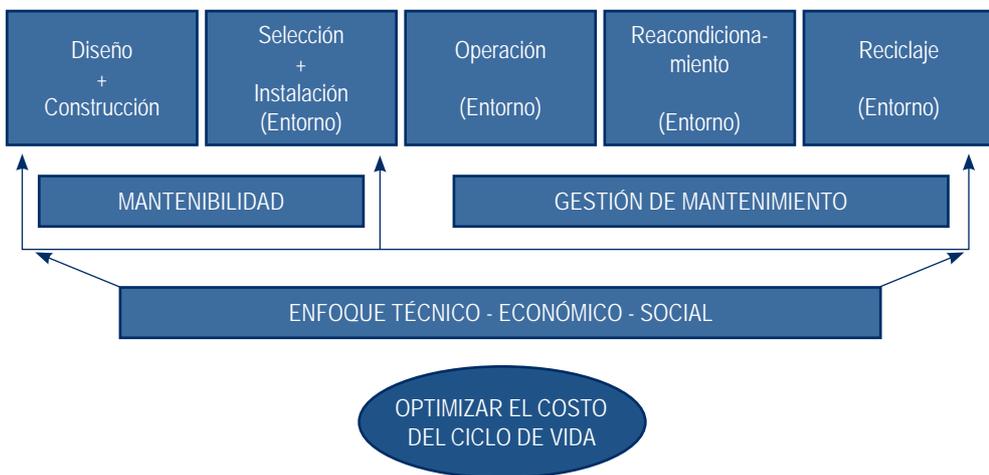


Figura 4. Etapas de un ciclo de vida (Sánchez, 2010).

En la mayoría de casos, la organización no puede intervenir directamente sobre la primera etapa de diseño y construcción del activo, limitando su alcance en mejorar la mantenibilidad del equipo únicamente con la selección e instalación del mismo.

En las tres etapas posteriores de operación, reacondicionamiento y reciclaje la organización debe lograr la optimización del ciclo de vida del activo, aumentar su vida útil de manera rentable; para esto se emplea la administración de activos como la herramienta metodológica que indica y evalúa la forma de realizar esta mantenibilidad posterior del activo.

Por lo tanto, la administración de activos se considera como el proceso global de gestión por el cual se da mayor valor a la organización mediante el uso y mantenimiento de los activos a lo largo del ciclo de vida de manera consciente (Sotuyo Blanco, 2013).

Costos del ciclo de vida

El costo del ciclo de vida de los activos representa el costo total durante toda su vida útil, incluyendo la compra, instalación, operación, mantenimiento y adecuado retiro y disposición del mismo. Teniendo en cuenta esta metodología se pueden realizar comparaciones de alternativas para obtener la solución más rentable dentro de los límites de los parámetros disponibles (Fernandez, 2003).

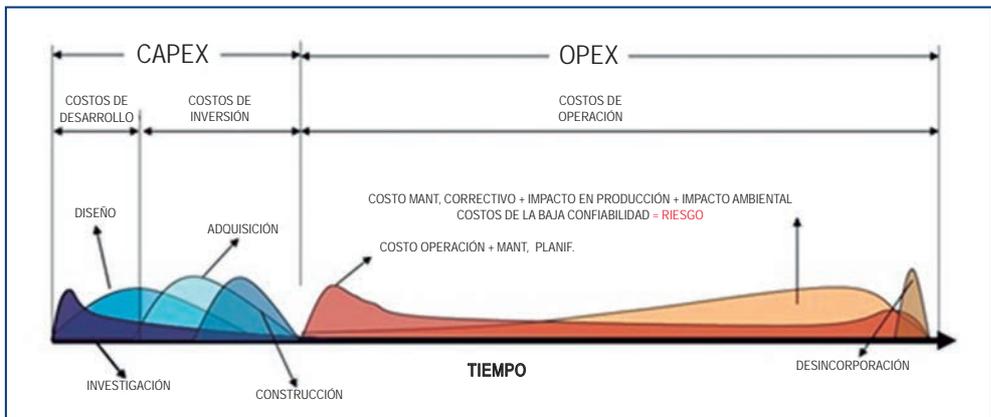


Figura 5. Modificado de (Fernandez, 2003).

La siguiente ecuación representa el costo de vida de un activo (LCC, por sus siglas en inglés) correspondiente a los costos incurridos durante su vida útil, es decir el costo de inversión, el de operación y mantenimiento, el costo por pérdidas de producción asociadas a las paradas del activo y, finalmente, el costo de retiro y disposición. El valor del dinero en el tiempo para los costos de operación, mantenimiento y parada se refleja en la tasa de ajuste (N).

$$CCV = Ci + N (Co + Cm + Cp) + Cr$$

Donde:

CCV: Costo de ciclo de vida

Ci: Costo de inversión

Co: Costo operación

Cm: Costo de mantenimiento

Cp: Costo de paradas

Cr: Costo de retiro y disposición

N: Factor del valor actual

Costo de inversión

El costo de inversión corresponde a la etapa desde el diseño hasta la instalación y puesta en marcha involucrando costos como ingeniería básica, ingeniería de diseño, viabilidad económica y estudios ambientales, si es el caso. El costo de inversión representa cerca de 35% de los costos involucrados en el análisis del ciclo de vida, por tal motivo es necesario realizar el cálculo preciso (Fernandez, 2003)

Costo de operación

La operación del activo representa las entradas necesarias para su adecuado funcionamiento, se pueden conformar como se muestra a continuación (Fabelo & Sanchez, 2009):

$$C_o = C_l + C_e + C_{mp} + C_t + C_{en}$$

Donde:

Cl: Costo laboral (mano de obra operativa)

Ce: Costo de energía

Cmp: Costo de la materia prima

Ct: Costo de transporte

Cen: Costo del entrenamiento al personal operativo

Costo de mantenimiento

Cada uno de los mantenimientos realizados sobre el activo tiene costos en cuanto a mano de obra y materiales necesarios, como aquellos relacionados con mantenimiento correctivo, predictivo y preventivo (Fabelo & Sanchez, 2009).

Costo de paradas

A pesar de que se cuantificaron los costos reales del mantenimiento del activo, existe un costo asociado a las paradas por tiempos muertos en producción, es decir, un costo de oportunidad perdido por la venta del producto (Fabelo & Sanchez, 2009):

$$C_p = NP * TPP * CPP$$

Donde:

NP: Frecuencia de paradas (1/h)

TPP: Tiempo promedio de paradas (h)

CPP: Costo por pérdidas de producción por paradas de mantenimiento (\$)

Costo de retiro

Reemplazar los activos al final de su vida útil acarrea un costo de retiro y adecuada disposición o desecho del mismo, además involucra, en algunos casos, el costo de recuperación medioambiental del ecosistema (Fernandez, 2003).

Análisis de criticidad de componentes y equipos

El método de análisis de criticidad de componentes y equipos permite cuantificar qué tan problemática es una falla en cada uno de los activos en la producción y así establecer una estrategia de mantenimiento centrada en tácticas particulares de acuerdo con el nivel de criticidad de cada equipo. A continuación se hace una breve descripción de esta metodología.

Criticidad en la administración de activos

La criticidad dentro de las metodologías de gestión de activos se considera un termómetro de la magnitud del problema que ocasiona una falla en el activo, se trata de una medida única que cuantifica tres aspectos importantes en cualquier industria: el efecto por sí mismo, el de la velocidad de reparación y el de la frecuencia.

El efecto se encuentra cuantificado para cuatro aspectos:

- Efecto sobre el medio ambiente y la seguridad
- Efecto sobre la producción
- Efecto sobre los costos operativos
- Disponibilidad de equipos de reserva

El efecto de la velocidad de reparación hace referencia a la diferencia entre el tiempo máximo de falla permisible para el activo y tiempo real de duración de la falla, es decir, mide la respuesta del equipo de mantenimiento para poner el activo en funcionamiento de nuevo.

El efecto de frecuencia se determina teniendo en cuenta el contexto operacional del activo (nivel de carga y el régimen de trabajo), el histórico de mantenimiento que se lleva del equipo, el tiempo medio entre fallas y el factor de frecuencia de fallas.

Cuantificar el efecto

Para cuantificar el efecto es necesario hacer una evaluación sobre las variables: producción (PROD), impacto medioambiental y de seguridad (MAS) y costos operativos (COP), como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1. Cuantificar el efecto de la falla en la criticidad (REPSOL YPF, 2005)¹.

EFECTO	ALTO		BAJO		NULO	
	Definición	Valor (%)	Definición	Valor (%)	Definición	Valor (%)
PROD	La falla provoca una pérdida importante dentro de un proceso	45	La falla provoca alguna pérdida dentro del proceso	23	La falla no provoca pérdidas productivas dentro del proceso	0
MAS	La falla provoca un efecto grave de seguridad y/o al medio ambiente	45	La falla provoca un efecto leve de seguridad y/o al medio ambiente	23	La falla no provoca efecto de seguridad y/o al medio ambiente	0
COP	La falla genera un costo operativo mayor o = a USD\$ 5.000	10	La falla genera un costo operativo menor a USD\$ 5.000	5	La falla no genera costos operativos	0

La suma de cada impacto necesariamente no suman 100%.

Cuantificar la velocidad

El indicador por excelencia de la velocidad de reparación es el tiempo medio para reparar (MTTR)² y este valor es particular de cada organización; pero para evaluar la criticidad, el indicador usado es la disponibilidad del activo en reserva.

Cada organización debe asignar un porcentaje al criterio de disponibilidad del activo en reserva de 1% a 100% según su cultura operativa, es decir, es una decisión particular de cada grupo de trabajo de mantenimiento de la planta respecto a los siguientes puntos: almacenamiento, disposición en almacenamiento, logística, preinstalación, instalación, pruebas de puesta a punto, desmontaje y disposición final.

Cuantificar la frecuencia de fallas

Teniendo en cuenta que la metodología de mantenimiento es particular de cada organización, la información para conseguir la frecuencia de falla deberá obtenerse de las siguientes fuentes, en orden prioritario:

- El índice de tiempo medio entre paradas (MTBF)³ del activo en la Tabla 2:

1 Valores en porcentaje (%).

2 Tiempo medio para reparar (*Mean time to repair*).

3 Tiempo medio entre falla (*Mean time between repair*).

Tabla 2. Valor de la frecuencia de fallas según MTBF (REPSOL YPF, 2005)⁴.

	ALTA		MEDIA		BAJA
FRECUENCIA DE FALLA	Ocurren > 4 fallas por año. MTBF < 3 meses	Ocurre e/ 1 y 4 fallas por año. MTBF e/ 3 y 12 meses	Ocurre e/ 0,2 y 1 fallas por año. MTBF e/ 1 y 5 años	e/ 0,1 y 0,2 fallas por año. MTBF e/ 5 y 10 años	Menos de 0,1 fallas por año. MTBF > 10 años
Valor de f_{ff}	1	0,9	0,8	0,6	0,4

- En caso de no contar con el índice de MTBF se debe tener en cuenta sí el equipo es nuevo o usado y se podrá aplicar una frecuencia según las Tablas 3 y 4 teniendo en cuenta que ALTA Corresponde a 1 y MEDIA a 0,8:

Tabla 3. Valor de la frecuencia de fallas para equipos nuevos (REPSOL YPF, 2005).

NIVEL DE CARGA RÉGIMEN	SOBRECARGADO Equipo opera por encima de su capacidad nominal	NORMAL Equipo opera a su capacidad nominal	SUBCARGADO Equipo opera por debajo de su capacidad nominal
CONTINUO Equipo en servicio 24 h al día Con arrq/paro > 24 h	ALTA	MEDIA	BAJA
PARCIAL Eq. en servicio más de 12 h al día Con 1 o 2 arrq/paro al día	MEDIA	MEDIA	BAJA
OCASIONAL Eq. en serv. menos de 12 h al día Entre 1 y 4 arrq/paro al día	MEDIA	BAJA	BAJA
INTERMITENTE Equipo en servicio con más de 4 arrq/paro al día	ALTA	ALTA	ALTA

⁴ F_{ff} hace referencia a la frecuencia de fallas.

Tabla 4. Valor de la frecuencia de fallas para equipos usados (REPSOL YPF, 2005).

NIVEL DE CARGA RÉGIMEN	SOBRECARGADO Equipo opera por encima de su capacidad nominal	NORMAL Equipo opera a su capacidad nominal	SUBCARGADO Equipo opera por debajo de su capacidad nominal
CONTINUO Equipo en servicio 24 h al día Con arrq/paro > 24 h	ALTA	ALTA	MEDIA
PARCIAL Eq. en servicio más de 12 h al día Con 1 o 2 arrq/paro al día	ALTA	ALTA	MEDIA
OCASIONAL Eq. en serv. menos de 12 h al día Entre 1 y 4 arrq/paro al día	ALTA	MEDIA	MEDIA
INTERMITENTE Equipo en servicio con más de 4 arrq/paro al día	ALTA	ALTA	ALTA

Selección de componentes críticos

Teniendo en cuenta los conceptos anteriores se define la criticidad como la evaluación de estos con la siguiente fórmula:

$$Criticidad = ((PRO + COP) * \frac{1}{DisRe} + MAS) * F$$

Donde:

PRO: Efecto en la producción (%)

COP: Efectos sobre los costos operativos (%)

DisRe: Disponibilidad del activo en reserva (%)

MAS: Efecto medioambiental y la seguridad (%)

F: Factor de frecuencia de fallas (Adimensional)

Existen tres clasificaciones de criticidad para activos, como se muestra en la tabla 5:

Tabla 5. Bandas de criticidad. (REPSOL YPF, 2005).

TIPO DE CRITICIDAD	VALOR DE CRITICIDAD
Tipo A	$CR > 40$
Tipo B	$40 > CR > 20$
Tipo C	$CR < 20$

Teniendo en cuenta el valor de criticidad, el rango va desde la banda Tipo A, que es la de mayor criticidad, hasta la banda Tipo C de menor criticidad, por lo cual la estrategia de gestión de activos se debe planear con intervenciones particulares a cada banda dando prioridad a los activos Tipo A.

Segunda parte

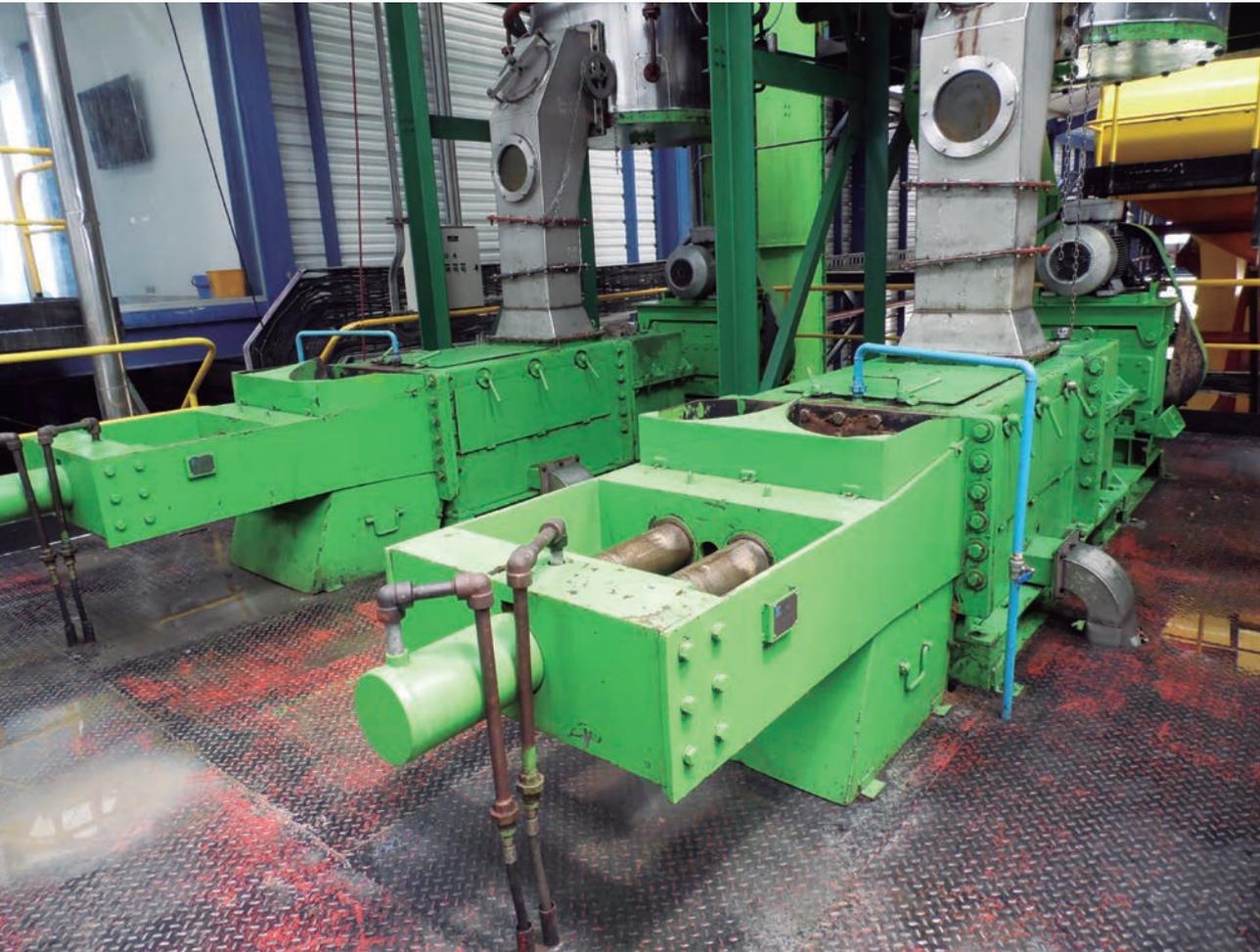


Foto: Área de ingeniería, Programa de Procesamiento, Cenipalma.

**Modelo de costo del ciclo de vida
de tornillos de prensado:
caso de estudio tornillos P6**



Modelo de costo del ciclo de vida de tornillos de prensado: caso de estudio tornillos P6

Selección de componentes críticos

Durante 2009 y 2010 Cenipalma realizó dos proyectos de diagnóstico de mantenimiento en las plantas de beneficio de las zonas Central y Oriental, respectivamente, donde se analizaron aspectos de valor del componente, costo de rotación y un análisis de criticidad basada en la metodología descrita en las páginas 17 a la 20.

Se determinó que los equipos críticos, desde el punto de vista de la administración de activos, corresponden a las prensas como componentes con mayor criticidad, pues tienen alta frecuencia de fallas y costos altos por pérdidas de producción debido a paradas y reducción de la capacidad de prensado, además, es el “cuello de botella” por diseño en las plantas de beneficio.

Los esterilizadores se ubicaron como el segundo equipo más crítico debido a su alto costo de inversión, nivel de seguridad en su operación e impacto que las fallas pueden tener a pesar de su baja frecuencia.

Este mismo análisis se realizó para todos los activos en la planta de beneficio y se obtuvo que el clarificador, la centrífuga, el rompedor y el *expeller* son los activos de tercer hasta sexto nivel de criticidad, respectivamente.

Además, el módulo APC (Aceite de Palma Crudo) se identificó como el módulo operativo principal, donde el activo de mayor criticidad es la prensa y los componentes de mayor rotación son los tornillos sinfín de prensado.

Descripción de los tornillos para prensado

En la primera etapa del proyecto fueron evaluados tornillos sin modificar en cuatro prensas P6 tipo bitornillo, con una capacidad de prensado de 6 t/h.

Descripción del proceso de fabricación para los tornillos de prensado seleccionados

En la Figura 6 se muestran las etapas principales que se llevan a cabo en el proceso de fabricación. Los tornillos de las prensas son elaborados con acero AISI-SAE 1030 y obtenidos directamente de fundición cuyo molde se fabrica con sílice 60/100, agua,

silicato como aglomerante que cataliza con CO_2 en cajones metálicos, empleando un macho que atraviesa la longitud del tornillo y le da la geometría hueca característica donde se encaja el eje al ensamblarlo en la prensa.

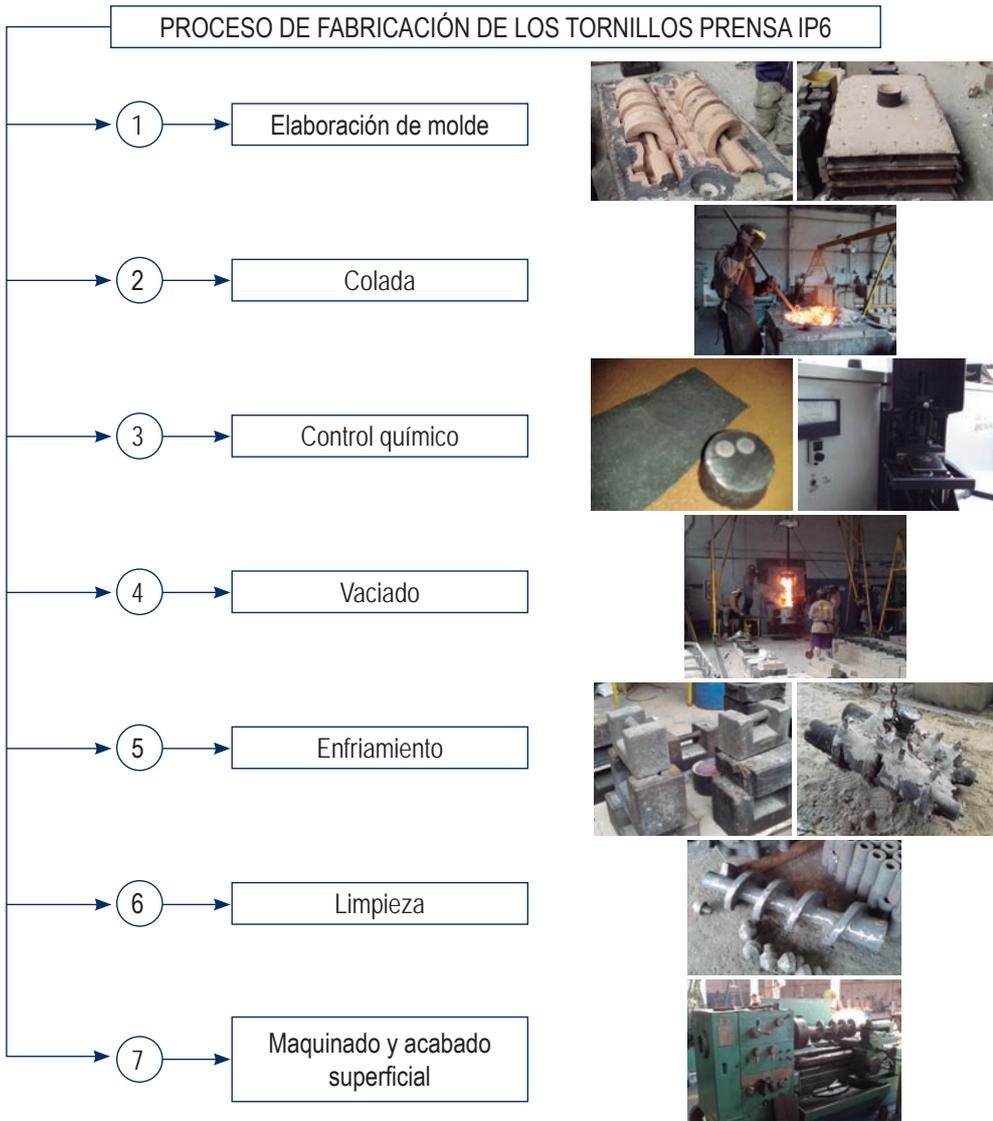


Figura 6. Proceso de fundición.

La materia prima es chatarra de hierro que se funde en un horno de inducción de donde se hacen muestreos para garantizar la composición química del material, en el caso de que se deba ajustar el contenido de algún elemento, se adicionan productos como grafito o ferromanganeso hasta obtener la composición descrita en la norma AISI-SAE 1030. La Tabla 6 muestra la composición química del material de fundición empleada en los tornillos de prensado y el valor referencia de la norma AISI - SAE.

Tabla 6. Composición de la fundición.

Composición	% Carbono (C)	% Manganeso (Mn)	% Fósforo (P)	% Azufre (S)
Acero de ensayo	0,314	0,853	0,029	0,000
Norma AISI-SAE	0,27 - 0,34	0,60 - 0,90	0,040 Máx.	0,050 Máx.

Una vez obtenida la composición requerida, el siguiente paso es el vaciado, que corresponde a la etapa más crítica del proceso.

Después del vaciado se deja enfriar hasta los 800°C, temperatura a la cual la pieza se desmolda para que siga su enfriamiento al aire libre. Por último, con la pieza a temperatura ambiente se procede a maquirarla para darle las dimensiones finales de diseño.

Características físico-químicas

Teniendo en cuenta que el material base usado para la fabricación de los tornillos de prensa es acero fundido AISI SAE 1030, se realizó una caracterización de los materiales por medio de pruebas de dureza, microdurezas, metalografías y ensayos de tensión que evidenciaron la estructura y propiedades reales que rigen su comportamiento y desempeño en la operación.

Dimensiones

El diseño de los tornillos de prensado, los detalles del chabetero y la cabeza se encuentran definidos en la Figura 7:

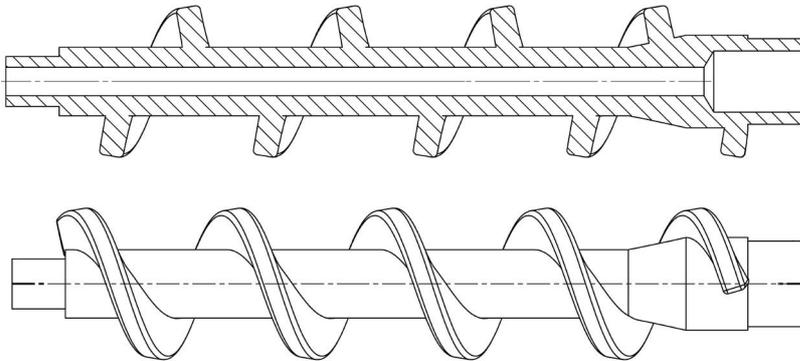


Figura 7. Vista frontal tornillo P6.

Metalografía

Al inspeccionar la probeta con pulido a espejo sin ataque químico se observaron inclusiones tipo ASTM D2 de la serie fina según la Norma ASTM E45 *Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel* (Figura 8). Estas inclusiones corresponden a óxidos globulares e inciden en la ductilidad, tenacidad y límite elástico del material puesto que constituyen discontinuidades duras y frágiles dentro de la matriz.

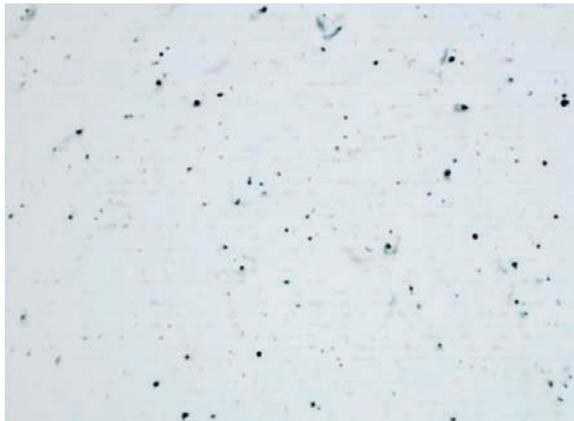


Figura 8. Inclusiones tipo ASTM D2 de la serie fina presentes en el acero fundido. Zoom: 100 X. Norma ASTM E45 *Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel*.

Al realizar el ataque químico para observar la microestructura, se confirmó la heterogeneidad de fases a lo largo de la matriz observando una gran concentración

de perlita en la periferia de las muestras (Figura 9) y hacia el centro, ferrita con morfología acicular o Widmastatten¹ (Figura 10). Este tipo de ferrita es propio de altas temperaturas de colada, proporciona fragilidad al acero y se puede reducir con tratamiento de normalizado.

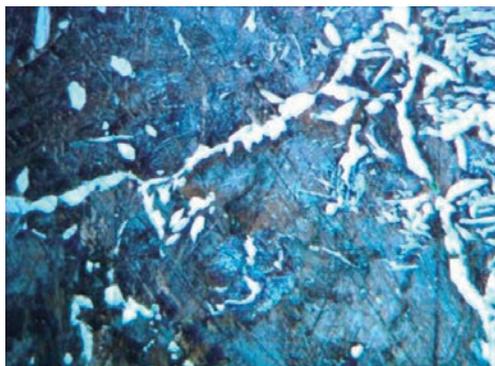


Figura 9. Microestructura perlítica en la periferia y estructura acicular de la ferrita Widmastatten hacia el centro de la muestra. Zoom 100X.

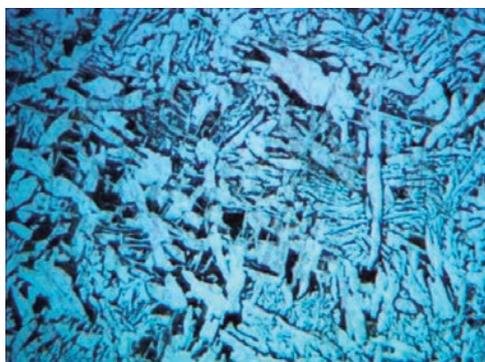


Figura 10. Microestructura en la zona del centro de la probeta. Ferrita Widmanstatten. Zoom 100X.

Al cuantificar la perlita y ferrita en la microestructura obtenida de las pruebas de metalografía se encontraron suficientes evidencias para concluir que el material base corresponde a un AISI SAE 1030, el cual contiene inclusiones globulares de óxidos que transfieren fragilidad al material, además se observa una gran heterogeneidad en la muestra en cuanto a la distribución de la perlita, en la periferia, y en el centro, ferrita.

¹ Ferrita Acicular o Widmastatten corresponde a una microestructura en forma de agujas y orientada de forma aleatoria.

Cabe destacar que en el corte transversal que se realizó durante la preparación superficial, se evidenció una defectología de rechupe en la zona central de la muestra, por lo que se espera que si este fenómeno existe a lo largo de todas las probetas, afecte negativamente en los ensayos de tensión.

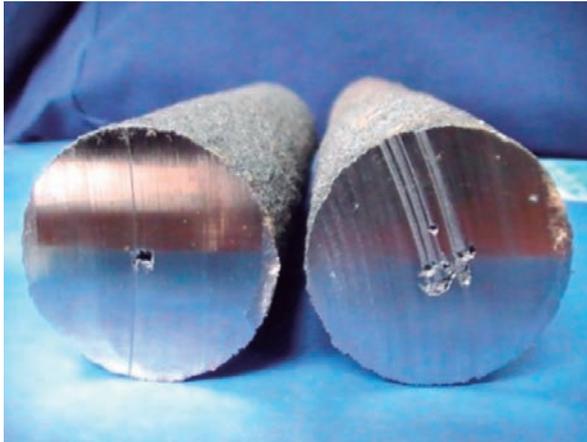


Figura 11. Rechupes en el centro de las probetas.

Los rechupes mostrados en la Figura 11 son originados por la contracción volumétrica que sufre el acero durante la transformación líquido-sólido, siendo más susceptibles las áreas de mayor espesor; esto puede corregirse mediante el empleo de mazarotas que suministran metal líquido a la pieza durante la contracción o incrementando el rango de solidificación en las regiones críticas por medio de enfriadores externos (Gaerling, 1979).

Características mecánicas

Ensayo de tensión

Se ensayaron tres probetas fabricadas bajo la norma ASTM E8, dando como resultado una falla súbita por fractura frágil en todos los casos, como se observa en la Figura 12, en la que se evidencian, además, las cavidades por los rechupes. Este tipo de falla, como se mencionó anteriormente, fue originada por la microestructura de ferrita Widmanstätten que disminuye la tenacidad y la resistencia del material. Los datos de esfuerzo último reportados en la Tabla 7, respaldan esta hipótesis.

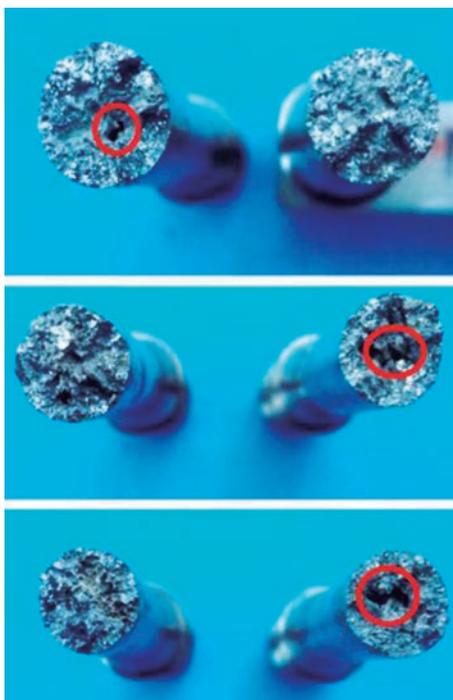


Figura 12. Área de fractura en la prueba de tensión.

Tabla 7. Resultados del ensayo de tensión.

Muestra	Diámetro inicial (mm)	Carga máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)
1	12,36	38203	318
2	12,41	30625	253
3	12,27	35328	299

Según norma AISI SAE 1030, el esfuerzo máximo debe ser 470 y 520 para acero SEA 1030 cold rolled y hot rolled respectivamente.

Dureza y microdureza

Se realizaron dos ensayos para caracterizar la dureza del material con ayuda del microdurómetro y el durómetro. Las Tablas 8 y 9 muestran los valores obtenidos, que aunque están dentro de lo esperado por el tipo de acero (SAE 1030), presentan variabilidad que se puede atribuir a una microestructura heterogénea por efecto del proceso de solidificación sin un posterior tratamiento térmico, confiriendo un estado de anisotropía a la fundición, es decir, que sus propiedades no son las mismas en cualquier dirección en la que se midan.

Tabla 8. Mediciones de microdurezas reportadas.

Micro-dureza	Identaciones										Estadísticos	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Promedio	DV.S
HK	216	221	234	294	217	177	264	224	252	253	235,2	32,15
HRB	93	94	99	F.E	93,2	84,3	F.E	94,6	100	100	94,7	4,85

Tabla 9. Mediciones de durezas superficiales.

Dureza	Identaciones					Estadísticos	
	1	2	3	4	5	Promedio	DV.S
HRB	88	89	90	89	88	88,8	0,84

Según norma AISI SAE la dureza del acero SEA 1030 es 80 HRB.

Fenómeno asociado a la operación del tornillo

Tipos de desgaste

El desgaste es producto de la fricción y se presenta por el continuo contacto entre materiales que realizan un esfuerzo para ejecutar algún tipo de trabajo. Se aprecia notoriamente cuando existen daños superficiales en el material, influyendo en la eficiencia del trabajo que ejecuta la pieza, siendo necesario hacer intervenciones sobre el componente para garantizar que continúe realizando el trabajo deseado en las condiciones necesarias de la operación.

El estudio del desgaste define cuatro mecanismos básicos para clasificar sus tipos: adhesión, abrasión, fatiga y acciones triboquímicas. En la Tabla 10 se aprecian los tipos de desgaste según la acción tribológica, basados en la norma alemana DIN 50 320.

Tabla 10. Mecanismos de desgaste (Deutsches Institut für Normung).

Estructura del sistema	Acciones Tribológicas	Tipos de desgaste	Mecanismos efectivos (Individuales o combinados)			
			Adhesión	Abrasión	Fatiga de Superficies	Triboquímicas
Medio interfacial sólido (Sólido separado por película de fluido)	Deslizamiento Rodamiento 	Desgaste por fatiga de contacto			X	
	Deslizamiento 	Desgaste por deslizamiento	X	X		X
	Rodamiento 	Desgaste por rodamiento	X	X	X	X
	Impacto 	Desgaste por impacto	X	X	X	X
	Oscilación 	Desgaste por frotamiento	X	X	X	X
Sólidos-sólidos y partículas	Deslizamiento 	Abrasión por deslizamiento		X		
	Deslizamiento Rodamiento 	Abrasión por deslizamiento por tres o más cuerpos		X		
	Rodamiento 	Abrasión por deslizamiento (abrasión sobre tres o más cuerpos)		X		
Sólido-fluidos con partículas	Flujo 	Erosión por partículas		X	X	X
	Flujo 	Erosión por fluido		X	X	X
Sólido-gas con partículas	Impacto 	Desgaste por impacto de partículas		X	X	X
	Flujo Oscilante 	Cavitación del material, erosión por cavitación			X	X
	Impacto 	Erosión por goteo			X	X

Debido a que la resistencia al desgaste no es una propiedad intrínseca del material, como lo es el esfuerzo y la dureza, es difícil medir este parámetro; sin embargo, se puede clasificar como se muestra en la Tabla 10. A continuación, se explican brevemente las clases de desgaste que puede presentar un material (*Deutsches Institut für Normung*).

- *Desgaste por fatiga de contacto*: se presenta especialmente cuando las piezas en contacto son sometidas a esfuerzos elevados, suelen formarse grietas debido a las acciones repetitivas sobre la superficie provocando deformaciones por las tensiones de contacto y fuerzas de fricción.
- *Desgaste abrasivo*: se caracteriza por la remoción o desplazamiento de material por acción de frotamiento entre superficies con protuberancias duras o por material particulado entre las superficies en acción.
- *Desgaste por cavitación*: se produce por el colapso de pequeñas burbujas creadas en flujos de líquidos que son transportados por tuberías, estas burbujas surgen por variaciones de presión en el transporte del fluido y desgastan la superficie en contacto con el líquido.
- *Desgaste adhesivo*: sucede por la formación de fuertes uniones entre dos superficies que se encuentren en contacto, en el momento en que ocurren deslizamientos se produce un desprendimiento de material de la superficie más suave.
- *Desgaste corrosivo*: se caracteriza por la presencia de óxido, que pueden ser tan crítico como para llegar al punto de dejar inútil la pieza. La corrosión en la pieza se puede aumentar por efecto del mecanismo de desgaste por impacto, generando una deformación plástica en la superficie del material.
- *Desgaste erosivo*: causado debido a la continua exposición de la superficie a impactos de partículas sólidas o líquidas, se produce una pérdida de materiales por los impactos repetitivos de las partículas pequeñas, tanto sólidas como líquidas, los aspectos más críticos son la forma, velocidad y dureza de la partícula erosiva.
- *Desgaste por rozamiento*: se presenta por la permanencia continua de movimientos oscilatorios de pequeña amplitud entre superficies de contacto. Este desgaste es la suma de otros tipos puesto que en diferentes condiciones ambientales puede llegar a ser más nocivo para el material, en condiciones húmedas el *fretting*² es iniciado por adhesión, seguido por corrosión y sus principales efectos son por abrasión.

2 Fenómeno de daño superficial que ocurre cuando existen desplazamientos relativos oscilatorios de muy pequeña amplitud.

- *Desgaste por deslizamiento:* es uno de los tipos que ocurre con más frecuencia en la industria, consiste en el movimiento relativo entre superficies de contacto aplicando una carga. Este deslizamiento produce una deformación plástica en la superficie y un gradiente de deformación bajo la superficie gastada.

Desgaste en los tornillos

El fenómeno que ocurre en la operación de los tornillos es complejo debido a que implica varios mecanismos de desgaste actuando de manera simultánea.

El tornillo de prensado se ve sometido a desgaste por deslizamiento causado por el mesocarpo; desgaste por rozamiento debido a las nueces enteras y rotas, y a las impurezas; desgaste corrosivo por ácidos grasos que generan cavidades las cuales se expanden y profundizan para exponer una nueva capa de superficie (CHIEW, 2004); desgaste por abrasión debido a la mezcla de nueces y mesocarpo y, en algunos casos, desgaste por fatiga de contacto cuando se introducen objetos diferentes a los racimos esterilizados como piezas metálicas y rocas.

Además de estos mecanismos de desgaste es importante mencionar que en cada filete es diferente la intensidad con que se presentan, puesto que la operación de la prensa depende del nivel de presión que se ejerza con la unidad hidráulica. Siendo mayor en los filetes más cercanos a la unidad hidráulica puesto que son los que reciben directamente la presión ejercida a la fruta que se está prensando, mientras los filetes que están cerca al digestor realizan el transporte del fruto. Además el desgaste es más agudo en las caras externas del filete; es decir, las paralelas debido a la fricción del fruto al pasar de filete a filete por esta superficie.

Criterios de evaluación para determinar la vida útil del tornillo

Una vez identificadas las características físico-químicas del componente, se determinó el efecto del desgaste en la vida útil del tornillo. Para ello se definieron los parámetros bajo los cuales se evalúa su desempeño, se consideran diferentes tipos de variables para valorar el rendimiento del prensado, cuantificar la pérdida de material en los tornillos y monitorear las condiciones de operación de la prensa.

Inicialmente se implementó una metodología para realizar el seguimiento a las variables por medio de formatos previamente diseñados para capturar la información necesaria, con el fin de estructurar la línea base del estudio, considerando el continuo monitoreo de las cuatro prensas P6, donde se ubicaron los cuatro juegos de tornillos empleados en la prueba. En cuanto a la captura de datos, se definió la frecuencia de

recolección de la información dependiendo de la criticidad y la complejidad para la toma de medida de la variable.

Las variables a monitorear corresponden a las que evidencian los efectos del desgaste del tornillo en la disminución de la eficiencia real de producción del módulo APC y la calidad del aceite extraído, las dimensiones y peso del tornillo, así como las variables de operación del activo como la corriente y voltaje del motor, algunas temperaturas, disminución en su rendimiento y disponibilidad del componente.

Criterios de eficiencia de extracción y calidad del aceite

Para determinar la incidencia de la vida útil de los tornillos de prensado en la eficiencia de extracción y la calidad del aceite se monitorearon dos criterios durante la operación de la prensa: la acidez del aceite y la pérdida de aceite en fibra como variables de control para determinar el tiempo acumulado de operación en el cual el componente empieza a tener impacto.

Los datos proporcionados en pérdidas de fibra corresponden al porcentaje de aceite en sólidos secos no aceitosos (SSNA) y la relación entre estos y la fibra.

Para evaluar la calidad del aceite se usan las mismas variables usadas para determinar el valor comercial del aceite crudo, se toma diariamente el valor correspondiente a la cantidad de ácidos grasos libres (AGL) y la fracción de humedad en aceite.

Del analisis de estas variables se observó que la impregnación del aceite en fibra se mantiene constante, Figuras 13, 14 y 15.

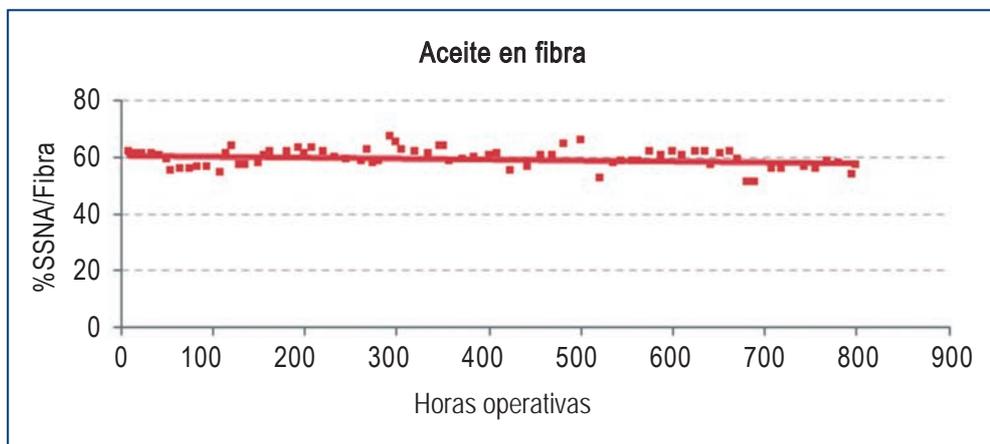


Figura 13. Comportamiento del aceite en fibra.

Las pérdidas de aceite en fibra permanecen constantes puesto que en la operación se ajusta la presión de prensado para reducir las al mínimo, por ende, se compensa el efecto de desgaste con la variación en la presión de prensado.

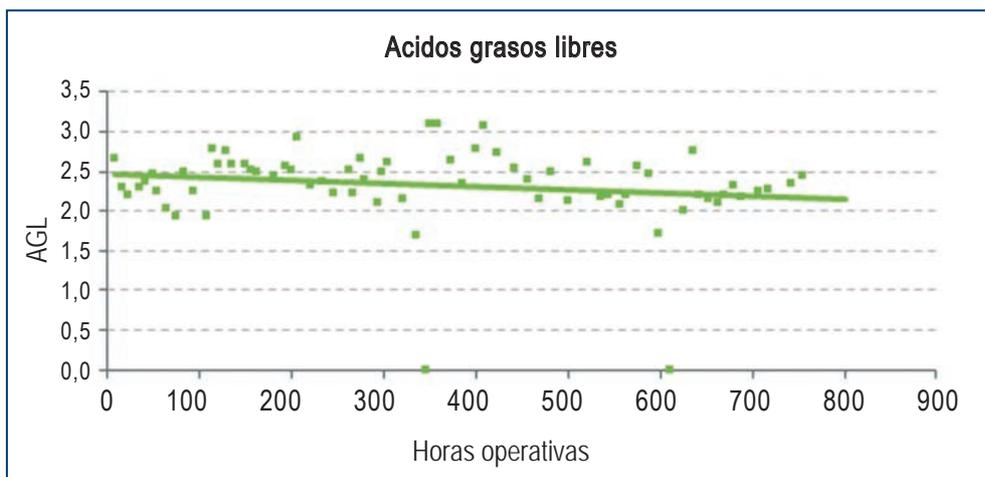


Figura 14. Comportamiento AGL.

Aunque durante el periodo de estudio se presentó una disminución en el criterio de acidez en el aceite (Figura 14), este se asocia a mejoras en el proceso operativo y la calidad de la fruta a procesar, no por efecto del desgaste de los tornillos asociado al desprendimiento e inclusión del material metálico en el aceite extraído; las cantidades de metales son despreciables respecto al volumen de aceite extraído.

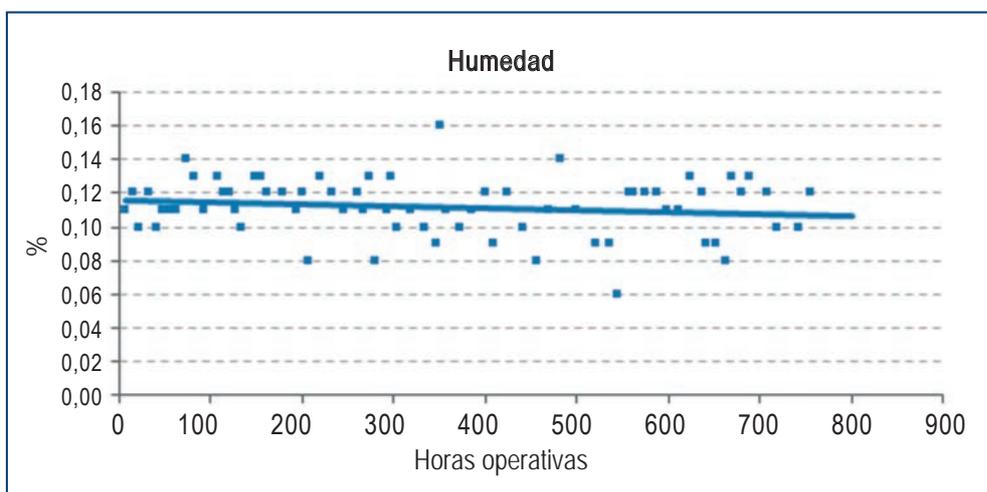


Figura 15. Comportamiento de la humedad.

La humedad en el aceite muestra una tendencia con alta variabilidad (Figura 15) y no constituyó un criterio concluyente para indicar el fin de la vida útil de los tornillos de prensado.

Criterios de dimensiones

Las variables de dimensiones son la parte más crítica del proyecto, a partir de ellas se caracteriza la curva de desgaste de los tornillos. Por esta razón, la toma de información se realiza siguiendo una serie de pasos para garantizar confiabilidad en la información; se suma que la frecuencia en la toma de mediciones es mayor debido a la disponibilidad en operación de las prensas y el trabajo necesario para desmontaje y montaje de los tornillos.

Antes de montar los ocho tornillos en las prensas, se registraron su peso y dimensiones de espesor de filete (e), altura de filete (H) y diámetro (D) en las diferentes secciones como se describe en la Figura 16, para conocer el estado en que empiezan a operar. Una vez se ensamblaron en las prensas, cada 90 horas operativas, aproximadamente, se desmontaban los tornillos para medir su geometría, se inspeccionaban registrando la pérdida de peso y sus variaciones volumétricas, producto de la reducción de las dimensiones iniciales.

El espesor de filete (e) y el diámetro (D) se midieron directamente con calibrador, mientras que la pérdida de altura de los filetes se determinaba midiendo la luz que se generaba entre la galga mostrada en la Figura 16 y la cresta del filete de cada sección.

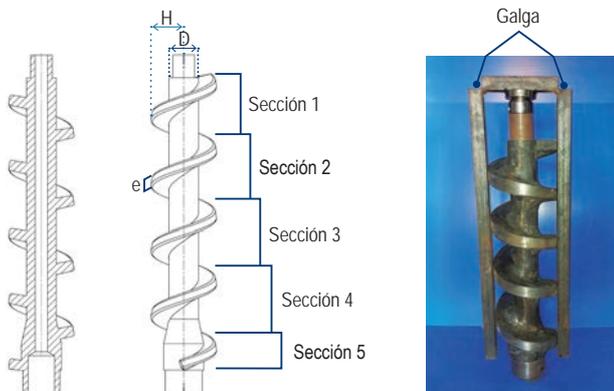


Figura 16. Esquema de los tornillos evaluados y dimensiones medidas para análisis de desgaste.

En las Figuras 17, 18 y 19 se muestra la tasa de desgaste global en mm/horas de operación del tornillo y las dimensiones en las diferentes secciones de los ocho tornillos al finalizar el ensayo.

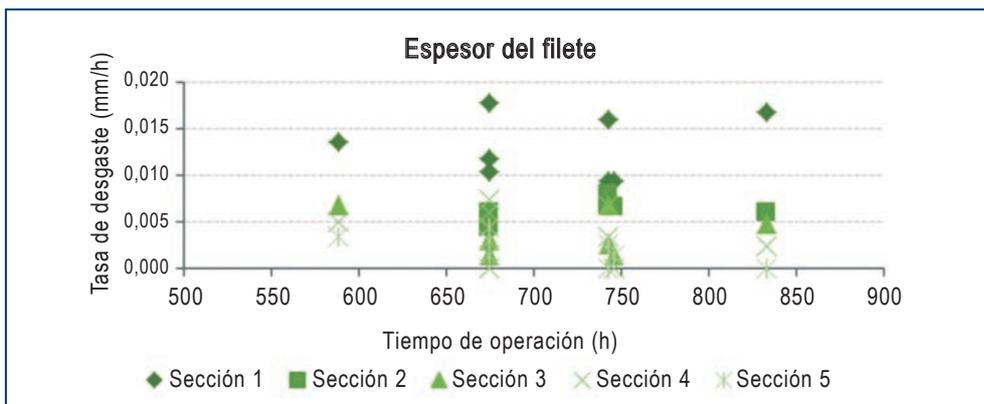


Figura 17. Tasa de desgaste del espesor del filete.

De esta manera, en general, se observa la sección 1 como la de mayor tasa de pérdida de dimensiones por hora de operación, que conlleva un desgaste acelerado al ser la zona más cercana al punto de mayor presión durante la extracción. De forma directa, el registro de datos indica que a medida que las secciones siguientes se alejan del punto de mayor presión con la pared de extracción, sus dimensiones se conservan como consecuencia de un menor desgaste, siendo la sección 5 la de menor pérdida de volumen.

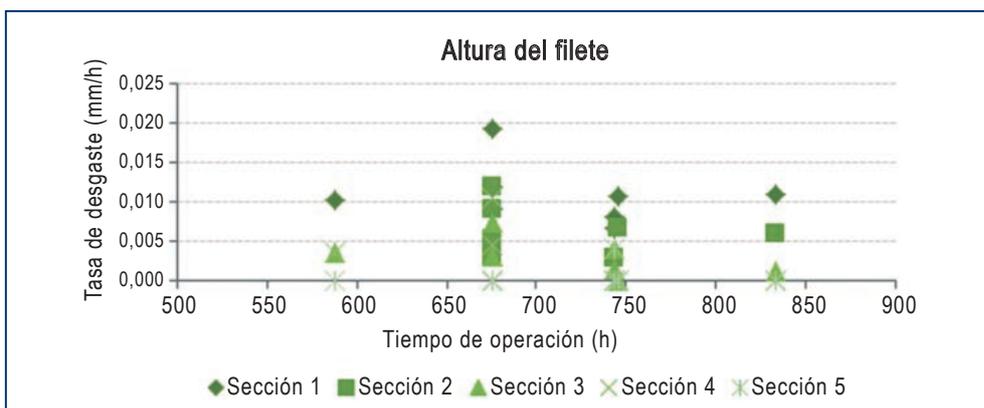


Figura 18. Tasa de desgaste de la altura del filete.

En cuanto al diámetro del eje del tornillo, su tasa de reducción fue inferior a las presentadas por la altura y espesor del filete; alcanzando un valor máximo de 0,009 mm/h, con respecto a 0,018 y 0,019 mm/h presentados en el espesor y altura del filete; esto se debe al mayor esfuerzo recibido en el primer filete por ser la superficie de ataque que mayor presión recibe de la unidad hidráulica.

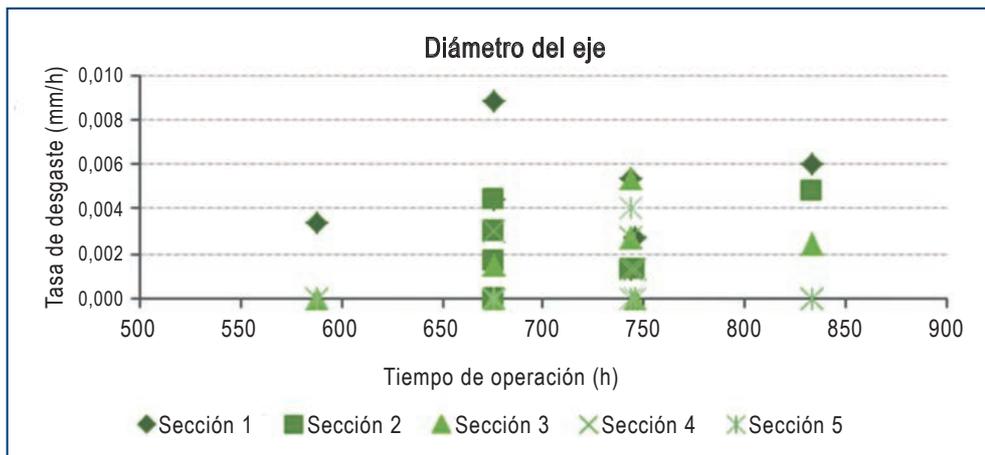


Figura 19. Tasa de desgaste del diámetro del eje.

La Figura 20 muestra el desgaste acumulado en los filetes, que se evidencia en la reducción de dimensiones:



Figura 20. Apariencia del tornillo al final de la primera vida útil.

Además de las pérdidas de dimensiones en las diferentes secciones, se registraron las pérdidas de peso de cada uno de los tornillos, determinando la curva de desgaste presentada en la Figura 21.

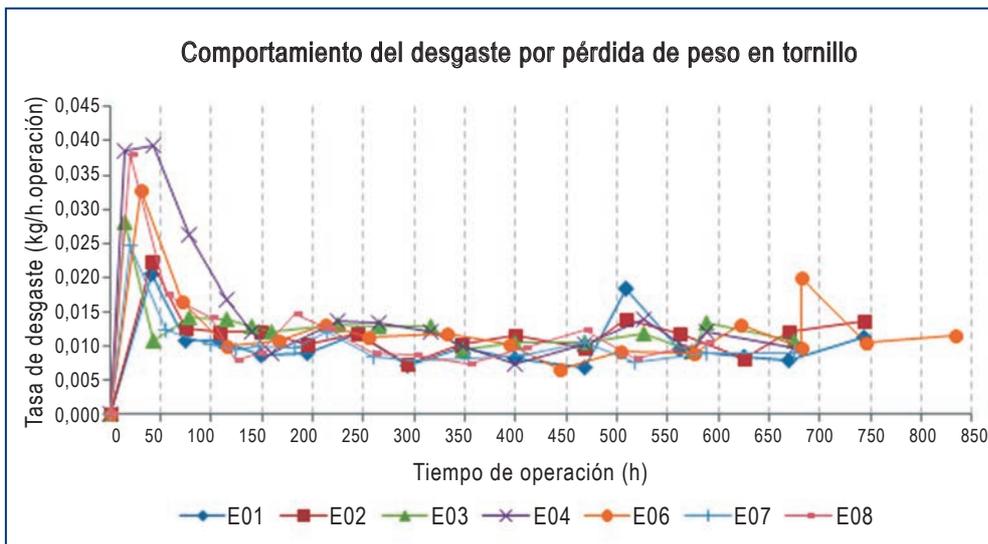


Figura 21. Comportamiento de la tasa de desgaste de cada tornillo.

El proceso de desgaste es acelerado (0,04 kg/h) durante las 50 primeras horas operativas de los tornillos, este evento es normal teniendo en cuenta que, durante este periodo de tiempo, las superficies de naturaleza rugosa y débil se pulen con el material prensado, provocando un desprendimiento de material en mayor proporción. Durante las siguientes cien horas se presenta un decaimiento de la tasa de desgaste para continuar constante entre 0,01 y 0,015 kg/h hasta las 800 horas operativas. Existen dos picos de tasa de desgaste anormales en la Figura 21 para los tornillos 1 y 6 a las 505 horas y las 670 horas, respectivamente, que se dieron por la inserción de piezas metálicas en el fruto prensado que desgarraron el material de los tornillos durante la prueba.

Crterios operativos

Las variables de operaciones son parámetros que se censan todos los días del periodo productivo de la planta con el fin de monitorear el desempeño y el efecto del desgaste de los tornillos en las prensas, Figura 22.

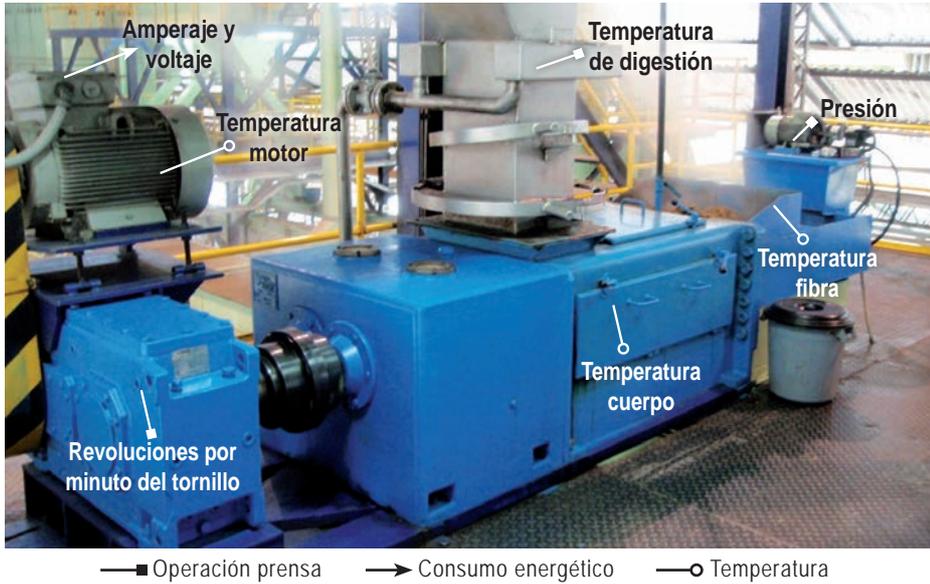


Figura 22. Representación esquemática de una prensa y puntos de medición de las variables de operación.

Para la medida de la temperatura con termómetro infrarrojo se designan puntos claves donde se va a realizar la medición, garantizando siempre un mismo punto de muestreo.

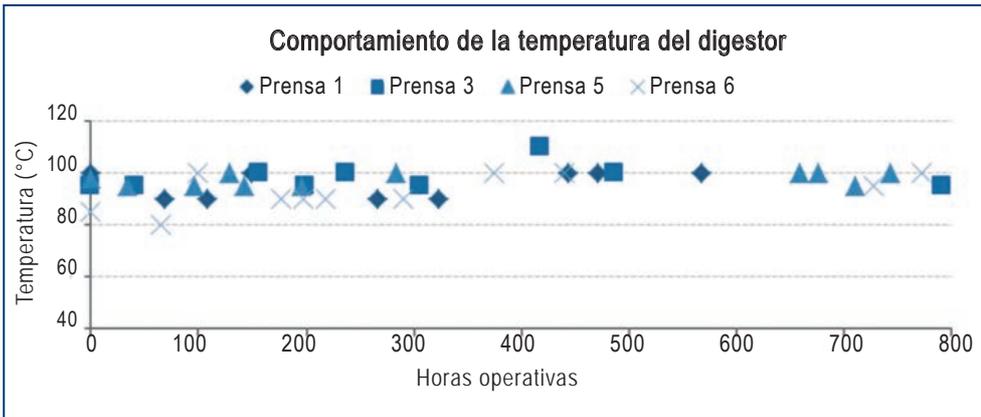


Figura 23. Comportamiento de la temperatura del digestor.

Las temperaturas del digestor (Figura 23), la del cuerpo de la prensa (Figura 24), la del motor (Figura 25) y la de la fibra (Figura 26) permanecieron constantes durante el tiempo de estudio, es decir que no existe correlación entre las temperaturas del proceso, sus elementos y el desgaste de los tornillos.

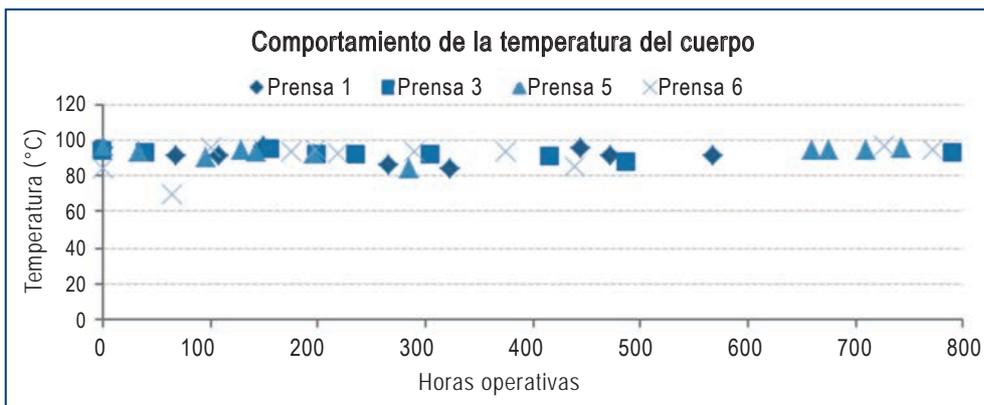


Figura 24. Comportamiento de la temperatura del cuerpo

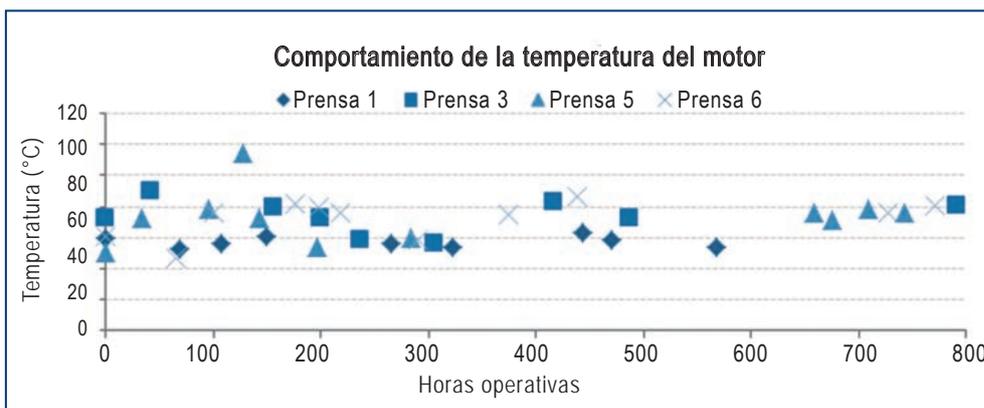


Figura 25. Comportamiento de la temperatura del motor.

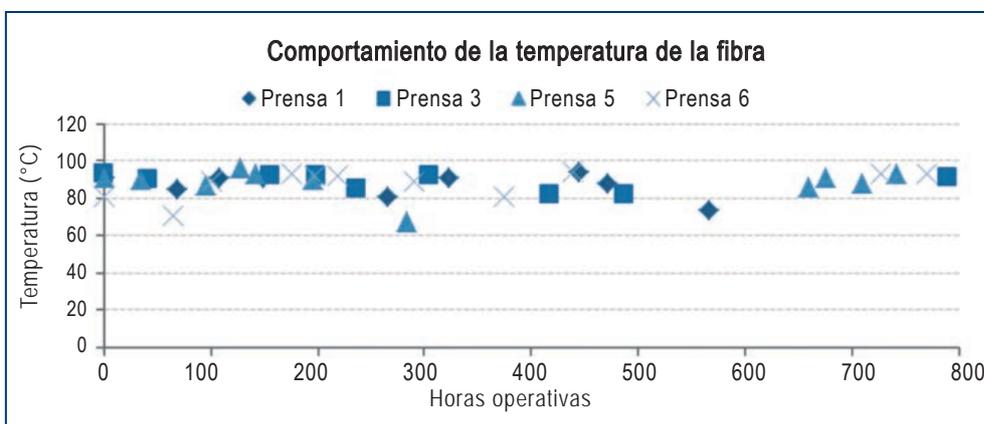


Figura 26. Comportamiento de la temperatura de la fibra.

Las variables de operación tomadas directamente de los medidores instalados en ella, en el barómetro de la unidad hidráulica de la prensa, el termómetro del digestor y el tacómetro del reductor de la prensa.

La variable de presión de prensado fue descartada al no observarse una tendencia definida, esto se debe a la manipulación que se realiza dependiendo de las variables operativas del momento, como se observa en la Figura 27:

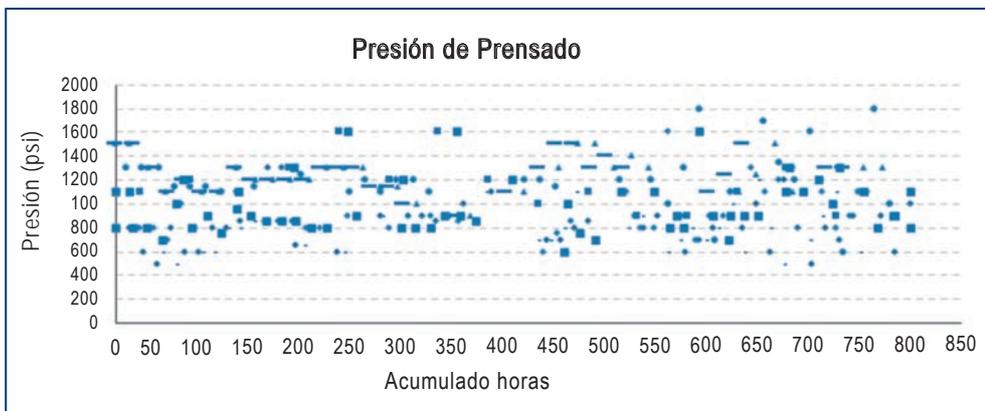


Figura 27. Comportamiento de la presión de prensado.

La velocidad de giro de los tornillos de prensado tuvo un comportamiento constante durante el estudio (Figura 28), indicando baja incidencia del desgaste en la transmisión del movimiento.

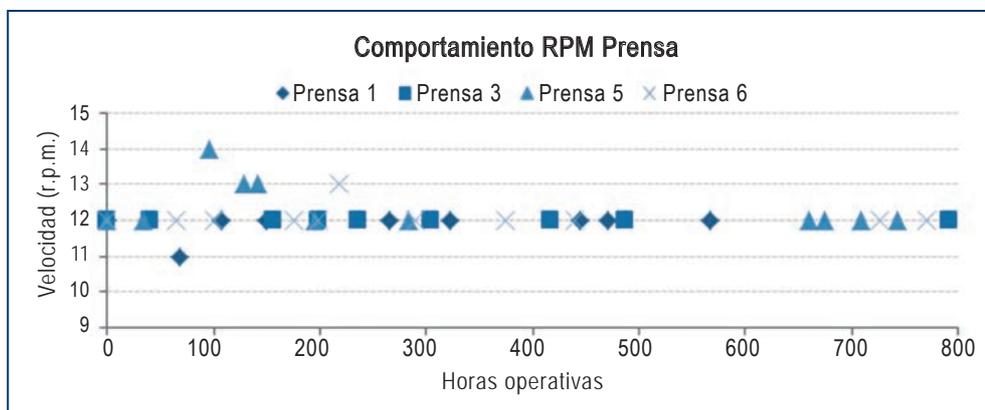


Figura 28. Comportamiento de la velocidad de giro.

Dos variables operativas importantes son el amperaje y el voltaje del motor, la demanda en estas refleja la potencia mecánica para realizar el mismo proceso en diferentes condiciones; estas dos variables se tomaron del contactor del motor con una pinza voltiamperimetrica. Las Figuras 29 y 30 concluyen que a mayor desgaste en el tornillo disminuirá la capacidad de prensado. Mostrando un descenso en el amperaje medido y por conservación de potencia eléctrica el voltaje tiende a aumentar, pero la información no es concluyente debido a la variabilidad.

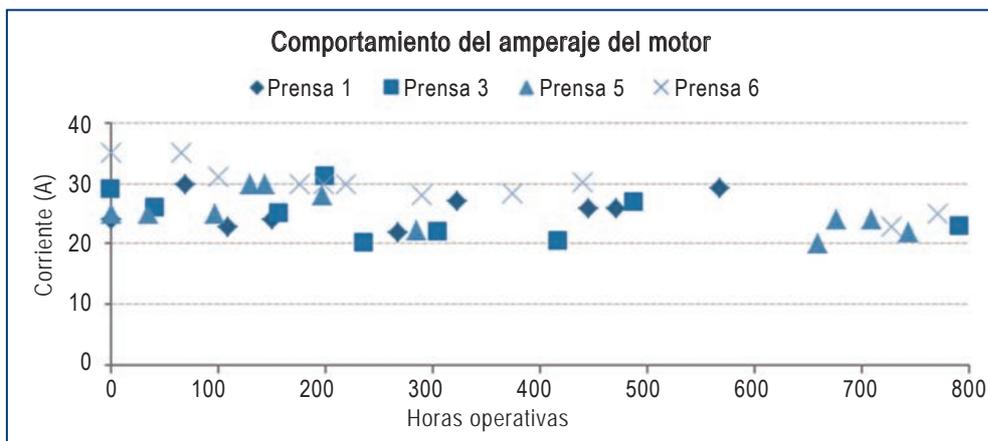


Figura 29. Comportamiento del amperaje del motor.

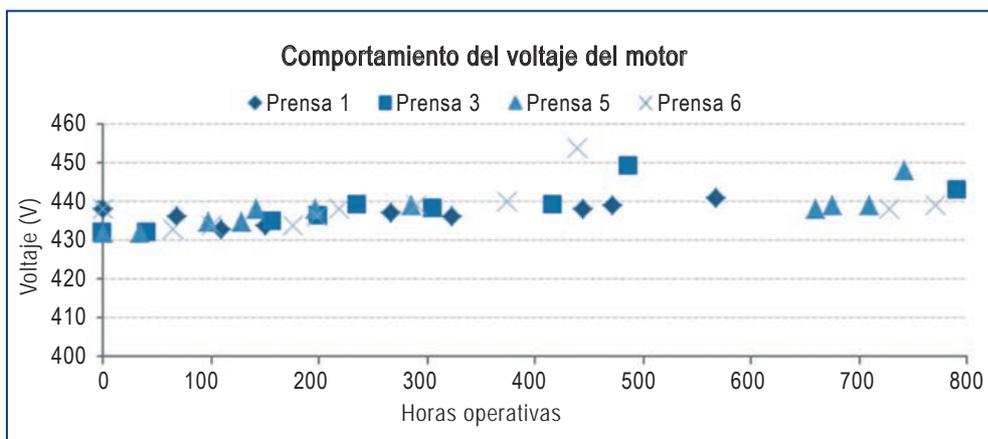


Figura 30. Comportamiento del voltaje del motor.

Resultados del análisis del ciclo de vida

Se concluye que la altura es la dimensión crítica en la funcionalidad del tornillo, al alcanzar pérdidas mayores a 6% en su valor inicial, se incrementa la probabilidad de que el tornillo salga de operación por efecto de un aumento en la tolerancia entre la cresta de los filetes y las canastas que los contienen, es importante resaltar que siempre se garantizó las medidas estándar de las canastas.

Sin embargo, para el caso del espesor, puede llegar a perder hasta 30% sin que la funcionalidad afecte el desempeño de la prensa. Los porcentajes descritos anteriormente se dan bajo un rango de operación de 750 horas de prensado efectivas, tiempo a partir del cual las prensas bajan su capacidad de operación. La reducción en el rendimiento de prensado a 50% en capacidad nominal, que se observa en la Figura 32 (750 horas operativas), ocurre a una tasa de desgaste constante de 10 g/h como se muestra en la Figura 31 y se debe a una pérdida en la altura del filete de 6%.

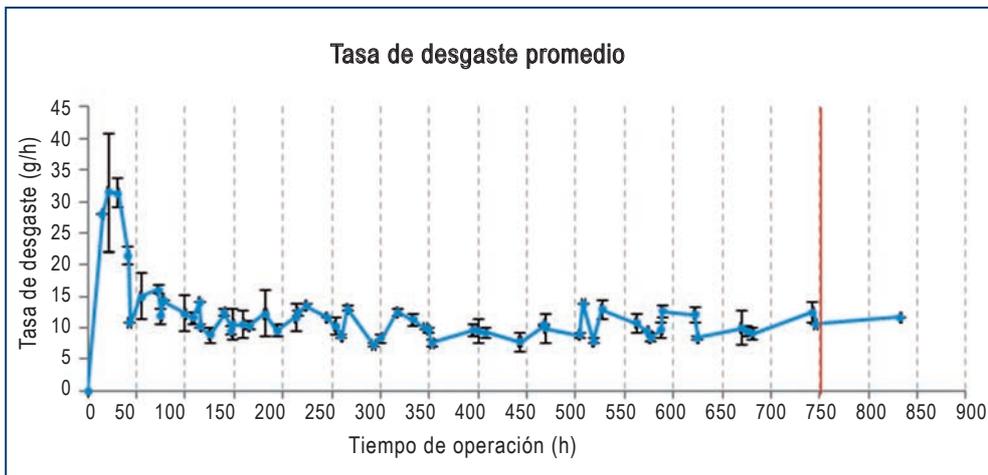


Figura 31. Tasa de desgaste promedio.



Figura 32. Reducción en el rendimiento de prensado.

Para el caso de estudio de prensas P6 de tipo bitornillo se determinó que de los criterios evaluados la única variable que mostró evidencia del efecto del desgaste en el activo fue la capacidad de prensado, siendo menor a mayor desgaste del tornillo alcanzando una reducción en el rendimiento del módulo APC de 50% a las 750 horas, con pérdida de 6% en la altura del filete y tasa constante de desgaste de 10 g/h.

Con los datos experimentales de la prueba se determina que la vida última útil para el tornillo de prensado para prensas P6, está dada por la reducción en el rendimiento del módulo de APC provocando una reducción en la eficiencia real de producción.

Para el caso de estudio, el tiempo determinado de reemplazo del componente se registró en 750 horas de operación, este variará a mayor o menor cantidad de horas, dependiendo del tipo de material utilizado, características de fundición y dimensiones con las cuales esté construido el componente.

Reconocido el desgaste y la disminución de capacidad de prensado como el factor determinante de la vida útil de componente, los esfuerzos para la reingeniería del componente se darán en buscar materiales, procesos industriales o recubrimientos con mayor resistencia al fenómeno de desgaste.

Una vez determinado el número de horas de vida útil efectivas del componente, se concluye que su servicio en la planta puede ser llevado bajo un esquema de mantenimiento de sustitución cíclica bajo cumplimiento de horas operativas, garantizando una disminución del riesgo en la afectación de la eficiencia real de producción del módulo APC.

Costo del ciclo de vida

Para la evaluación del costo de ciclo de vida de los tornillos se empleó la metodología descrita en la página 15, que describe los diferentes costos que existen durante las etapas entre la concepción y la disposición final del activo.

El costo de inversión corresponde al valor del tornillo, mientras los costos de transporte y montaje suman el costo operativo. Los costos de materia prima y entrenamiento del personal no se tienen en cuenta porque no son necesarios para la adecuada operación del componente.

El costo de mantenimiento es cero puesto que el tornillo como componente no recibió ningún tipo de intervención durante el periodo de estudio y si se realizaba alguna intervención era sobre el activo, es decir la prensa.

Durante el estudio del caso base las únicas paradas que tuvieron los componentes correspondieron a las hechas para medir las variables de dimensión y, por lo tanto, no se tienen en cuenta para determinar el costo de las pérdidas de producción asociado a las paradas.

El costo de retiro del componente corresponde únicamente al desmontaje del tornillo de la prensa, para esta operación no se debe realizar alguna intervención de adecuación del activo o disposición especial del tornillo.

No se tuvo en cuenta la incidencia del valor del dinero en el tiempo, en primera instancia porque el periodo del estudio es corto y la depreciación es casi nula; y en segunda, si existe depreciación se debe hacer sobre la prensa y no sobre el tornillo puesto que es un consumible en la organización; por estas razones el factor de valor actual es uno.

Tabla 11. Cálculo del costo del ciclo de vida del tornillo.

COSTO DE CICLO DE VIDA CASO DE ESTUDIO	
Costo del ciclo de vida	\$ 2.834.060
Costo de inversión	\$ 2.034.060
Compra	\$ 2.034.060
Costo de Operación	\$ 500.000
Costo mano de obra	\$ 300.000
Costo materia prima	\$ -
Costo de transporte	\$ 200.000
Costo entrenamiento personal	\$ -
Costo de Mantenimiento	\$ -
Costo correctivo	\$ -
Costo preventivo	\$ -
Costo predictivo	\$ -
Costo de Paradas	\$ -
MTB	\$ -
Duración de parada	\$ -
Costo por pérdida de parada	ND
Costo de Retiro	\$ 300.000
Desmontaje	\$ 300.000
Adecuación	\$ -
Factor de valor actual	1
Vida útil (h)	750
Costo por hora de operación	\$ 3.779

Esta Tabla muestra el costo del ciclo de vida de los tornillos cuyo valor es de \$2.834.060, con una vida útil de 750 horas operativas. Este valor corresponde a \$3.779 por hora de operación del componente, es decir que, en esta primera etapa, usando los tornillos tal como se entregan de fundición para la prensa P6 bitornillo tiene un costo operativo asociado únicamente a los tornillos de \$7.558, equivalente también a \$1.259 pesos por t RFF procesada.

Tercera parte

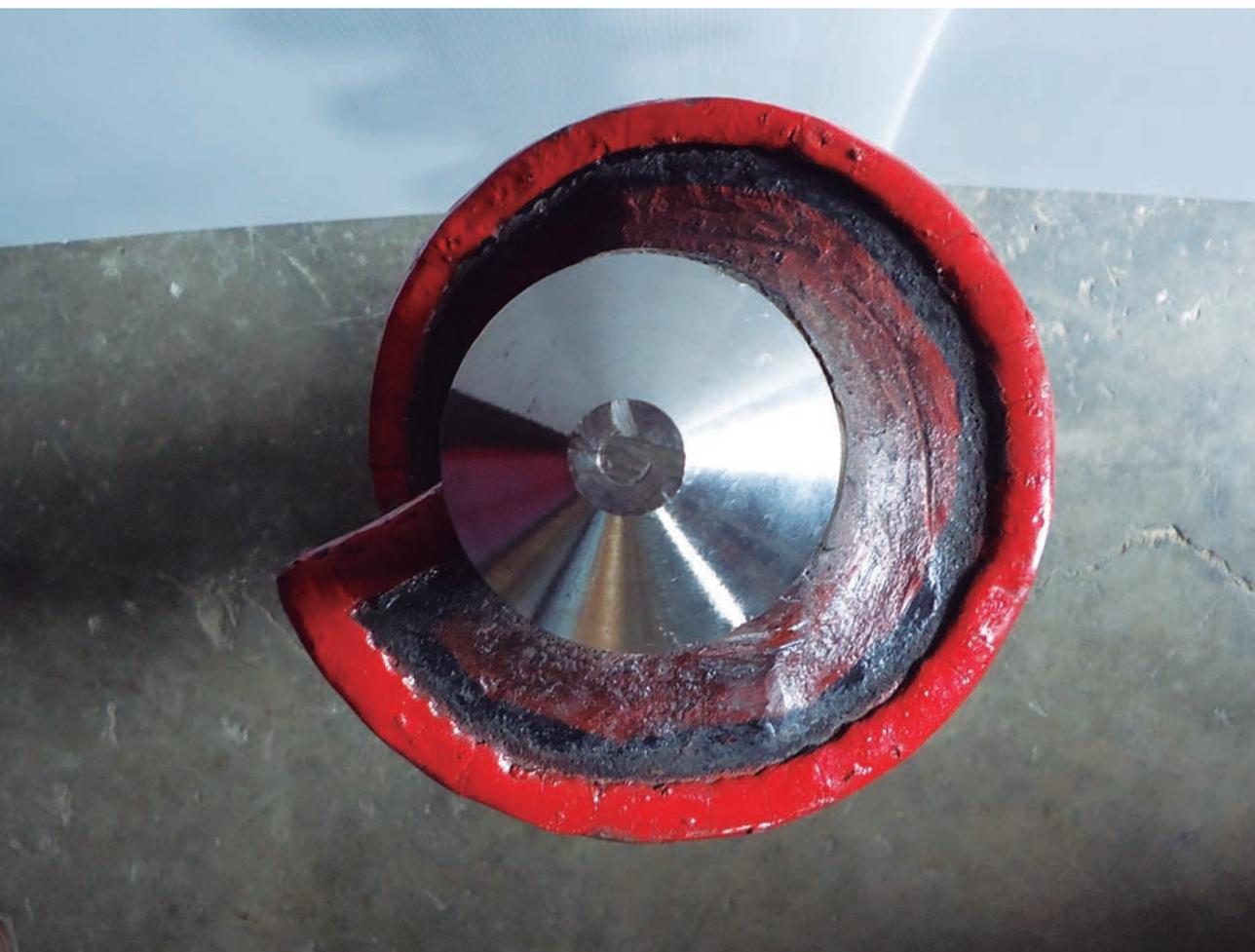


Foto: Área de ingeniería, Programa de Procesamiento, Cenipalma.

**Alternativas para extender
la vida útil de los tornillos:
recubrimientos**



Alternativas para extender la vida útil de los tornillos: recubrimientos

Razones para extender la vida útil de un componente

El deterioro de los componentes de todo equipo mecánico que opera en un proceso industrial es inevitable, dado que las piezas operan en ambientes hostiles donde se presentan esfuerzos y temperaturas extremas. El desgaste es generado por el movimiento y cuando es excesivo causa grandes pérdidas anuales que se ven reflejadas en:

- Paradas de producción no planificadas
- Reemplazos repetitivos de piezas costosas
- Costos elevados por mantenimiento no planificado
- Pérdidas de eficiencia de producción
- Pérdidas de ventas por pobres rendimientos de productos

Extender la vida útil de un componente se puede catalogar como un tipo de mantenimiento preventivo. Entre las ventajas de este procedimiento se destaca la disminución de tiempos muertos a causa de paradas no planificadas, así como de costos asociados a mano de obra, materiales y servicios externos; por otro lado, se garantiza un rendimiento continuo durante tiempos más prolongados representado en menor cantidad de equipos y menos pérdidas por reducción de la capacidad de procesamiento; en consecuencia, una reducción en la inversión de capital para el reemplazo de elementos de mayor rotación.



Figura 33. Placa de acero recubierta con soldadura.

Selección de recubrimientos para los tornillos

Al momento de seleccionar el material para recubrir un elemento, es necesario priorizar el área de mayor impacto frente al desgaste, de modo que se pueda contemplar la posibilidad de recubrir sólo el área de mayor exposición al fenómeno evitando así incurrir en gastos recubriendo la totalidad de la pieza.

Basados en los resultados obtenidos en la primera fase del estudio del ciclo de vida de los tornillos, se concluyó que el mayor desgaste se presenta en los tres primeros filetes de cada tornillo puesto que son los que mayor presión reciben en la operación de la prensa.

Una vez determinada el área a recubrir, se seleccionaron dos tipos de materiales para extender la vida útil del tornillo: soldaduras aleadas de bajo desgaste y pintura polimérica de poliuretano de bajo desgaste por ciclo; ambos recubrimientos tienen características con buena respuesta a la abrasión, desgaste por impacto y ataque de ácidos orgánicos.

Para las pruebas con las metodologías de recubrimientos se seleccionaron los dos materiales teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, así como la dureza y resistencia al desgaste; por último, también se consideraron los costos asociados al recubrimiento de las piezas, de forma que si los recubrimientos fueran un éxito al terminar las pruebas, el impacto económico se vería reflejado notablemente en los costos asociados al mantenimiento y reemplazo de tornillos de prensado.

Recubrimiento por soldaduras

Para una buena aplicación de un recubrimiento duro se deben tener en cuenta algunas consideraciones básicas como el metal base, características físicas de la pieza, forma y composición de la aleación para el recubrimiento y el proceso de soldadura (Ver Figura 33 para un ejemplo de aplicación del recubrimiento por soldadura automatizado); y otros aspectos como la habilidad del soldador y el costo de operación.

Selección del tipo de soldadura para recubrimiento

Las aleaciones metálicas disponibles pueden clasificarse de forma idónea como de base férrica y no férrica.

Aleaciones ferrosas de recargue

Normalmente son adecuadas para combatir todos los factores de desgaste mecánico en los que la corrosión y el calor tienen una presencia mínima. Las propiedades microestructurales de la aleación férrica se optimizan típicamente para factores de desgaste mecánico específicos mediante combinaciones como las descritas en la Figura 34.

Tipos de aleación	Resistencia óptima a los factores de desgaste	
Carburos de tungsteno	Abrasión (ranurado)	Erosión
Boro-carburos complejos	Abrasión (esmerilado)	Erosión
Carburos o boruros	Abrasión (rayado)	Erosión
Martensita	Fricción	Impacto
Austenita	Fuerte impacto	Cavitación

Figura 34. Aleaciones férricas de recargue (SAGER, 2012).

Aleaciones no férricas de recargue

Normalmente son también adecuadas para combatir todos los factores de desgaste mecánico, pero particularmente en combinación con los factores primarios de corrosión y calor. Por otra parte, en condiciones de fuerte desgaste en las que se requiere un alto contenido de óxido de cerio, la selección de una aleación no ferrosa podría suponer una menor dilución de éste durante el aporte (SAGER, 2012). Muchas de las propiedades químicas de las aleaciones no ferrosas proporcionan una resistencia natural a los efectos químicos/térmicos pudiéndose optimizar aún más para la resistencia al desgaste mediante combinaciones como las descritas en la Figura 35.

Tipos de aleación	Resistencia óptima a los factores de desgaste	
Carburos de tungsteno	Abrasión	Erosión
Cobalto / Cr / W	Cavitación	Impacto Fricción
Níquel / Cr / Mo / Si / B	Impacto	Fricción
Cobre / Al / Ni	Fricción	Cavitación

Figura 35. Aleaciones no férricas de recargue (SAGER, 2012).

Relación entre la fase dura y las partículas de desgaste

Se requiere una relación de dureza mínima de 1:2 para que una partícula abrasiva raye una superficie, con relaciones superiores se provocan graves desgastes dependiendo de la relación. El modo más fácil de aumentar la resistencia al desgaste es elevar la dureza de la superficie para que sea superior a la de la partícula y así el índice de desgaste puede reducirse dramáticamente (SAGER, 2012). En la Figura 36 se muestra la relación general para los materiales de ingeniería entre la macrodureza y la resistencia al desgaste abrasivo.

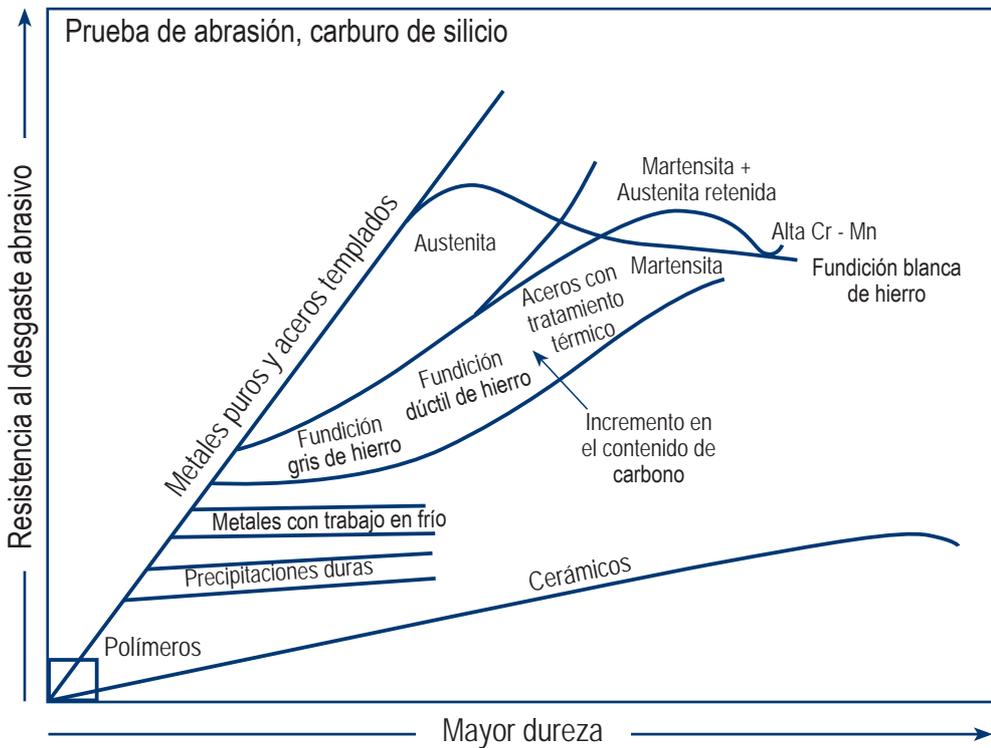


Figura 36. Zona ideal para el material de recubrimiento. Modificado de (Gahr, 1998).

Tamaño, volumen y geometría de la fase dura

Una vez que se ha decidido el tipo de fase dura, la siguiente decisión se refiere al tamaño de partícula necesaria. Esto depende en gran medida del tamaño de la partícula que provoca el desgaste. La distancia entre las partículas duras en el material de desgaste no debe ser superior al tamaño medio del material erosionador ya que, de lo contrario, la matriz se desgastará, dejando únicamente islas de fases duras (SAGER, 2012).

Al aumentar la cantidad de la fase dura en el material se aumentan las posibilidades de que las partículas abrasivas impacten con ellas y, por tanto, se incrementa también la resistencia al desgaste. Es decir, si se aumenta el porcentaje del recubrimiento aumentará la resistencia al desgaste, pero no es lineal (SAGER, 2012).

Para el caso de estudio de los tornillos P6 se realizó un recubrimiento continuo y no por puntos específicos en los tres filetes, se recubrió el espesor del filete y 20 mm en cada lado sobre el lomo del filete para evitar el desconchado del recubrimiento, como se muestra la Figura 37:

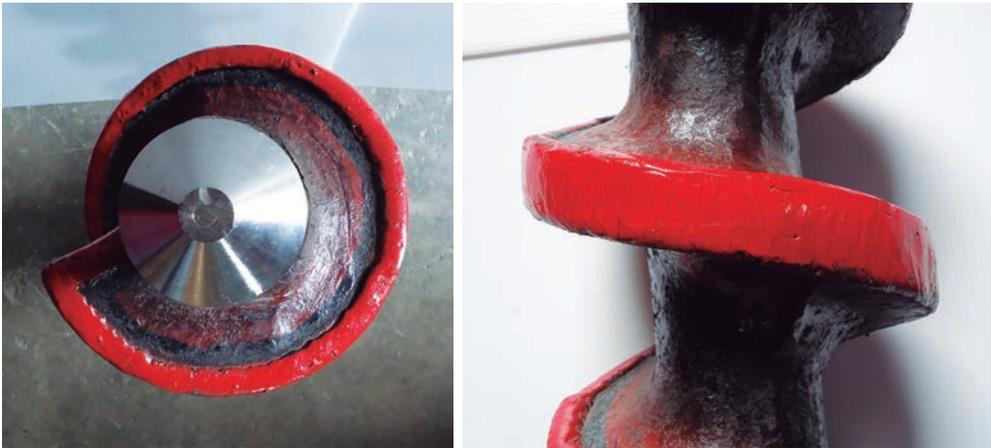


Figura 37. Lomo del filete (izquierda) y espesor del filete (derecha).

Influencia de la vía y los parámetros de aporte en la microestructura

Cuando se han decidido la composición, la cantidad de la fase dura, el tamaño y la forma, la siguiente variable es el método de aplicación, ya que afectará a la microestructura definitiva y, por tanto, al rendimiento antidesgaste. El rendimiento varía según se aplique una misma aleación con base níquel y con 60% de carburo de tungsteno mediante Arco Plasma Transferido, soldadura con hilo tubular, soldadura oxiacetilénica, Lanza SF o en la fabricación de placas antidesgaste.

La mayoría de los materiales de ingeniería de superficies están formulados en una serie de formas físicas como hilos tubulares, hilos macizos, electrodos, varillas, polvos, placas antidesgaste, etc.

Por otra parte, se muestra a continuación una relación de cada tecnología de aporte (únicamente con adhesión metalúrgica) a fin de facilitar la selección de la solución óptima para una aplicación de desgaste determinada, comparándose en la Tabla 12 de acuerdo con sus características de comportamiento:

- Eficacia de aporte (%)
- Velocidad de aporte (kg/h)
- Dilución (%)
- Espesor mínimo (mm)
- Ventajas clave
- Desventajas

Tabla 12. Comparación de tecnologías para recubrimiento por soldaduras.

TECNOLOGÍA	USO	EFICIENCIA DE DEPOSICIÓN %	TASA DE DEPOSICIÓN kg/h	DILUCIÓN %	VENTAJES	DESVENTAJAS
Alambre auto-fundente	Semiautomática Automática	90-95	2 a 12	10 a 30	Alta deposición y gran rango de aleación	Precio por kilogramo alto
Electrodo Recubierto	Semiautomática Automática	80-90	2 a 10	15 a 30	No son necesarios gases y se puede aplicar en sitio	Desescorización

Teniendo en cuenta las características antes mencionadas para cada uno de las tecnologías de recubrimientos, se escogieron específicamente los recubrimientos OA 4652 y OA 4601 como los materiales idóneos para esta aplicación.¹

Esquema de recubrimiento

Los dos primeros filetes son los de mayor desgaste, el tercero lo sufre en menor proporción, por lo tanto, el esquema de recubrimientos fue diferente: los dos primeros filetes recibieron recubrimiento con soldaduras OA 4652 y el tercero con soldadura OA 4601, como se muestra en la Figura 38:

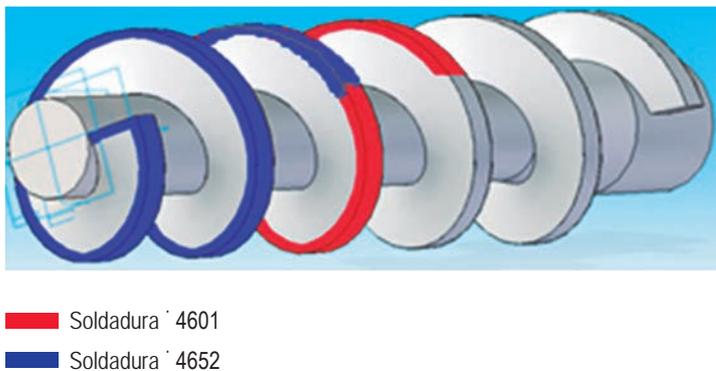


Figura 38. Esquema de recubrimiento para el tornillo con soldaduras.

¹ wEutectic 2007.

Proceso de recubrimiento por soldaduras

El proceso de recubrimiento por soldaduras incluye etapas de preparación de la pieza, aplicación del recubrimiento y etapa post-aplicación de alivios de tensión, a continuación se presenta este flujo de proceso, la Figura 39 que muestra el acabado final.

1. Acción: limpieza superficial del tornillo para retiro de escorias y partes frágiles. Así como el suavizado de geométricas puntiagudas.

Método: *sandblasting*

2. Acción: limpieza térmica de la superficie del tornillo mediante electrodos, con el fin de retirar escorias grandes de soldadura y metales desgastados.

Método: aplicación manual con arco eléctrico.

3. Acción: precalentamiento del tornillo entre 200°C y 300°C debido a que fue fundido y su composición contiene 30% de carbono.

Método: calentamiento de pieza directamente.

4. Acción: relleno de agujeros y defectos superficiales.

Método: aporte de material mediante arco eléctrico.

5. Acción: aplicación de recubrimiento

Método: aporte de material mediante arco eléctrico.

6. Acción: enfriamiento

Método: lento al ambiente.



Figura 39. Acabado de los tornillos con recubrimientos por soldaduras.

Recubrimiento pintura polimérica

Selección del polímero y proceso de recubrimiento

La segunda alternativa de recubrimiento fue una tecnología que ha sido probada exitosamente en la industria termoeléctrica: los recubrimientos poliméricos con resistencia a la abrasión. A continuación se presentan las características por las cuales se escogió el recubrimiento de pintura de poliuretano y el proceso de aplicación sobre los componentes.

Selección del tipo de polímero para el recubrimiento

El recubrimiento polimérico escogido fue de poliuretano, pintura de poliuretano con buen desempeño frente a la abrasión en altas temperatura, que se usa especialmente en las industrias de las termoeléctricas para manipulación de minerales, lodos y para los sistemas de tuberías en las calderas, que son sometidas a procesos de desgaste por abrasión a altas temperaturas, Figura 40.

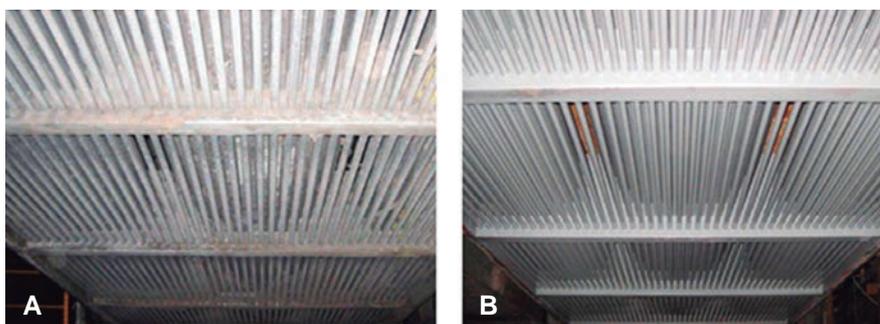


Figura 40. A. Desulfurizador sin recubrimiento. B. Recubrimiento de poliuretano. (Chemline, 2012).

El principal fenómeno causante del desgaste en el tornillo es la abrasión que sufre con la torta a prensar, por lo tanto, el recubrimiento polimérico debe tener buena resistencia a la abrasión como se observa en la Tabla 13 y la Figura 41.

Tabla 13. Desempeño en diferentes medios (Chemline, 2012).

Compuesto	Poliuretano	Ester de vinilo	Epóxico	Caucho	Fenólica
Acetona	A	N	N	N	A
Cloruro de amoníaco	A	A	A	A	L
Hidróxido de amoníaco	A	A	A	A	L
Benceno	A	A	N	N	A
Lico negro (papel)	A	A	A	A	L
Agua de bromo	A	N	N	N	L
Tetracloruro de carbono	A	A	N	N	L
Agua clorada	A	A	N	A	N
Cloro benceno	A	A	A	N	N
Ácido crómico	A	N	N	A	L
Diclorobenceno	A	N	N	X	N
Dimetilformamida	A	N	N	N	A
Etanol	A	A	A	L	A
Formaldehido	A	A	A	N	A

Continúa

Alcohol fulfural	A	L	N	N	A
Gasolina	A	A	A	N	A
Aceite hidráulico	A	A	L	L	A
Ácido clórico, 0 - 37%	A	A	A	A	L
Ácido clórico, 40%	A	N	N	X	N
Ácido fluorhídrico	A	L	L	L	L
Combustible de avión	A	A	A	L	A
Queroseno	A	A	A	L	A
Látex	A	L	L	N	A
Metanol	A	L	N	N	A
Cloruro de metileno	A	N	N	N	A
MEK	A	L	N	N	A
MBK	A	L	N	N	A
Niquelado	A	A	A	X	A
Lodos	A	L	L	L	L
Cloruro de sodio	A	A	A	A	A
Bicromato de sodio	A	L	N	A	N
Hidróxido de sodio	A	N	L	A	N
Licor de sulfito (papel)	A	A	A	A	A
Ácido sulfúrico	A	N	N	A	A
Sebo	A	N	N	N	A
Tolueno	A	A	A	N	A
Tricloroetileno	A	N	N	N	X
Lico blanco (papel)	A	A	A	L	A

A: Aceptable, L: Limitado, N: No recomendado, X: Sin información

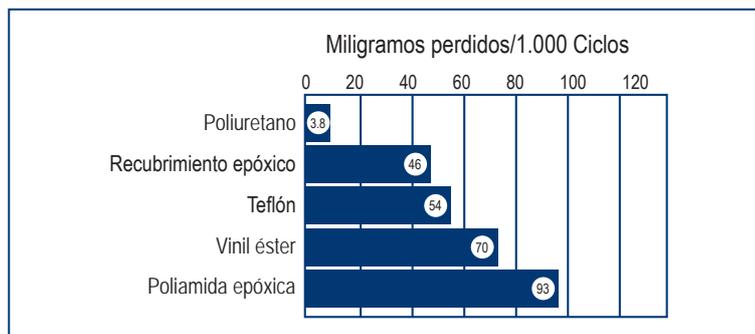


Figura 41. Comparación de diferentes recubrimientos modificado de (Chemline, 2012).

Algunas ventajas de este tipo de recubrimiento son:

- Puede ser aplicado sobre acero corroído o picado (previamente preparado)
- Muy alta resistencia a la abrasión
- Cura a temperatura ambiente
- Muy bajo VOC 99 g/l (0,80 lb por galón)
- Excelente adhesión
- Buena flexibilidad y dureza
- Puede ser reparado en campo
- Se limpia con vapor
- Cumple con todas las regulaciones FDA
- Resiste hidroblast
- Resiste el calor seco hasta 204°C (400°F)
- El recubrimiento cumple con las normas de la FDA y todas las recomendaciones aplicables a los alimentos

Proceso de aplicación del recubrimiento de poliuretano

El proceso de aplicación de la pintura polimérica es similar al de otras pinturas; sin embargo, durante su aplicación se debe controlar tanto la temperatura como la humedad del ambiente (Figura 42), a continuación se describe brevemente el proceso de aplicación del recubrimiento (Chemline, 2012):



Figura 42. Aplicación pintura polimérica. (IMANTT, 2013).

- Limpieza con desengrasante industrial. SSPC-SP1 para retirar la mugre y la grasa.
- Limpieza a chorro de arena abrasivo. SSPC-SP 10 (NACE #2, SA 2,5) para obtener un perfil requerido de 4-5 mils (100-125 micrones).
- Hacer medición de perfil de anclaje o rugosidad, mediante prueba de cinta replica Testex-Press o (X Aspero) ASTM D4417.
- Limpieza al vacío con la boquilla para eliminar polvo, arena y abrasivo incrustado.
- Medición de humedad relativa, debe ser menor a 65% y la temperatura del sustrato debe ser por lo menos 5°F (3°C) por encima del punto de rocío y en ascenso. Temperatura de aplicación 10°C a 40°C.
- Aplicación de la primera capa de Chemline 2400/32. A un espesor de 9-10 mils (225-250 micrones) de película húmeda; película seca 8-9 mils. Máximo de película 12 mils (300 micrones). Mínimo de película 8 mils (200 micrones).
- Aplicación de la segunda capa de Chemline 2400/32. En condiciones ambientales de 70°F (22°C) se puede aplicar la segunda capa en un periodo de 8 a 12 horas. En condiciones aceleradas de 90 a 100°F (32-43°C), en un periodo de 2-5

horas. A un espesor de película húmeda 9-10 mils (225-300 micrones); para una película seca de 8-9 mils.

- Procedimiento de secado (Figura 43) y curado en horno de acuerdo con la Tabla 14:

Tabla 14. Curva de secado y curado del recubrimiento polimérico.

t(min)	T(°C)
30	39
90	66
150	94
210	94
270	94
330	94
390	94
450	94
510	94
570	66



Figura 43. Secado y curado de la pintura polimérica.

Después del anterior proceso, los tornillos adquieren una capa de recubrimiento polimérico con un espesor cercano a 0,5 mm, en las Figuras 44 y 45 se observa el resultado final de la aplicación:

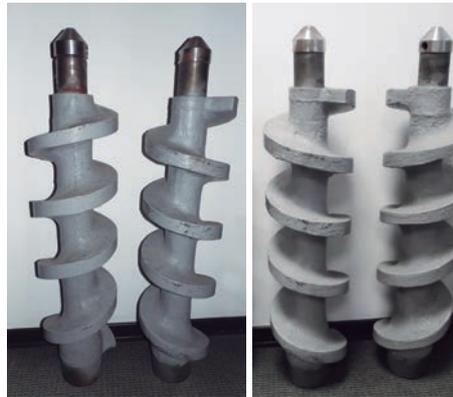


Figura 44. Tornillos recubiertos con pintura polimérica.



Figura 45. Detalles del tornillo recubierto con pintura polimérica.

Resultados esperados con los recubrimientos

Se plantearon dos tipos de recubrimientos como forma de extender la vida útil de los tornillos pero no se determinó en campo la duración real de cada tratamiento; teniendo en cuenta lo anterior, a continuación se presenta un modelo con el que se determinó la vida útil mínima requerida basado en un modelo costo- efectividad de componente recubierto.

Modelo de viabilidad para la extensión de la vida útil del tornillo

El método de evaluación “análisis de reemplazo” se usó para comparar las diferentes alternativas de recubrimiento frente al caso de estudio evaluado en la sección 2.5 cuyo flujo de caja se muestra en la Figura 46. Los casos retadores corresponderán a las alternativas de recubrimiento, los cuales se evaluaron aplicándolos sobre el tornillo nuevo antes de instalarse por primera vez y sobre los tornillos después de su primera vida útil.

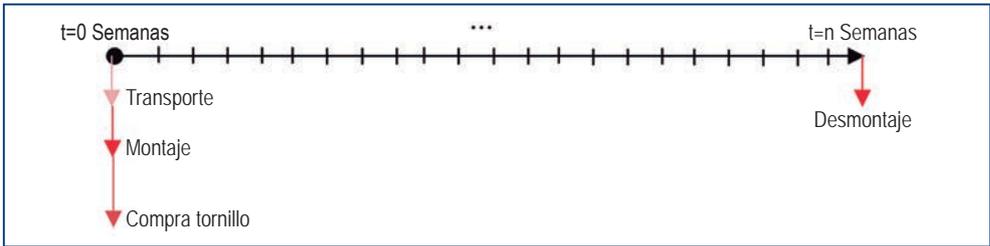


Figura 46. Flujo de caja tornillos sin recubrimiento.

Para el caso en el cual el recubrimiento se realiza antes del primer montaje del tornillo se tiene un costo de inversión dado por el valor del tornillo fundido, la aplicación del recubrimiento y el costo de transporte, además del de montaje en el periodo inicial y el de desmontaje al final de la vida útil (Figura 47).

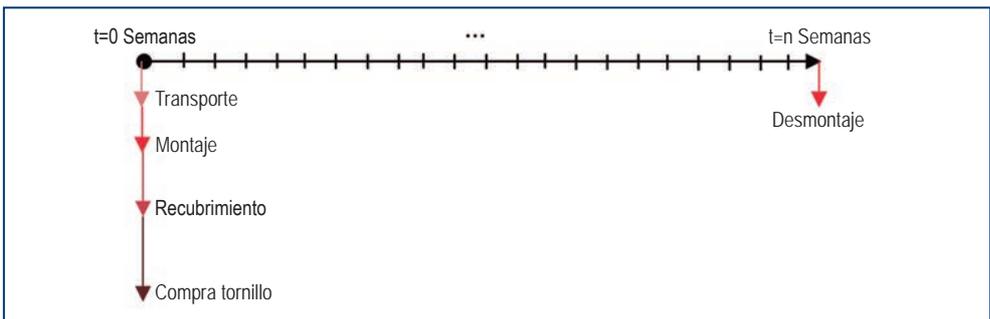


Figura 47. Flujo de caja para el recubrimiento sobre el tornillo nuevo.

Al contrario, si el recubrimiento se realiza sobre el tornillo desgastado, el costo total está compuesto por tres aspectos: la inversión inicial corresponde a la compra del tornillo nuevo, el costo de transporte y el del montaje inicial; el segundo al desmontaje, recubrimiento y montaje de tornillo y, finalmente, el tercero corresponde al desmontaje final tras la vida útil del tornillo recubierto, como se observa en la Figura 48.

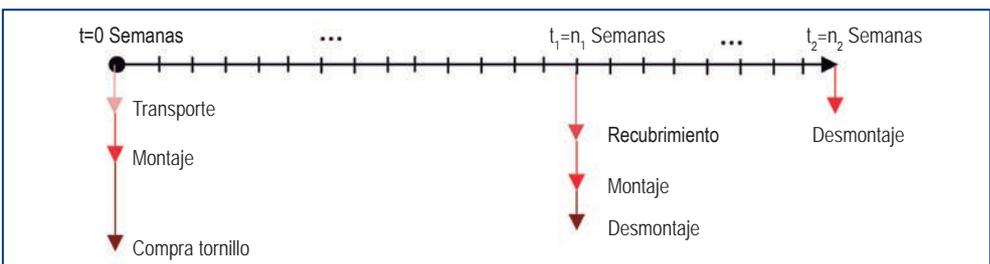


Figura 48. Flujo de caja para el recubrimiento sobre el tornillo usado.

Es necesario determinar, de acuerdo con la operación de la planta, cuántas horas operativas se realizan en promedio en una semana, para el caso de estudio se supuso una planta trabajando con dos turnos diarios de ocho horas operativas en cada uno, durante cinco días de la semana, con costo de oportunidad de 10% efectivo anual según experiencia de otros proyectos de investigación en plantas de beneficio.

Después de definir la unidad de tiempo para la evaluación del flujo caja como la semana calendario, con una tasa de descuento correspondiente al costo de oportunidad, se identifican los costos asociados a cada tornillo, de cada tipo de recubrimiento, montajes/desmontajes y el transporte. La Tabla 15 presenta los costos que se usaron para el análisis de reemplazo con cada una de las alternativas de recubrimiento:

Tabla 15. Costos de referencia para el análisis de reemplazo del caso de estudio.

COSTO	VALOR
Compra tornillo	\$ 2.034.060
Transporte	\$ 200.000
Montaje	\$ 300.000
Desmontaje	\$ 300.000
Recubrimiento soldadura	\$ 915.240
Recubrimiento polímero	\$ 1.766.000

De acuerdo con los flujos de caja representados en las Figuras 46, 47 y 48 existen costos en momentos diferentes de la vida útil del recubrimiento, por lo tanto, es indispensable registrar todos estos al periodo $t=0$ y así determinar el costo actual del capital.

En el caso de estudio, con el costo actual del capital (flujo de caja de la Figura 46) y la vida útil de 9,4 semanas (750 horas operativas con dos turnos de ocho horas diarias, y trabajando cinco días a la semana) se determina el pago semanal equivalente para esa alternativa con una tasa de descuento de 0,18% ES² que se obtuvo de cambiar el periodo de cobro del interés de efectivo anual a efectivo semanal con la formula de cambio de tasa (correspondiente a 10% EA).

Las alternativas de recubrimiento tanto con el componente nuevo o usado deben tener al menos un pago semanal equivalente igual al caso de estudio para ser financieramente atractivas, por lo tanto, teniendo el valor actual del capital para cada alternativa

2 Efectivo semanal

se deben calcular las semanas que debería durar la vida útil de componente con el tratamiento, pagando la misma cuota semanal que en el caso de estudio y la misma tasa de descuento.

Los resultados de este modelo se presentan en la Tabla 16 para el caso de estudio y cada alternativa de recubrimiento sobre el tornillo nuevo y usado:

Tabla 16. Resultado Análisis de reemplazo para cada alternativa.

Tratamiento	Alternativa				
	Sin recubrimiento	Recubrimiento con soldaduras		Recubrimiento con polímero	
Estado del tornillo	Nuevo	Nuevo	Usado	Nuevo	Usado
Valor presente del capital	\$ (2.828.949)	\$ (3.742.688)	\$ (4.315.885)	\$ (4.591.887)	\$ (6.094.455)
Compra (t=0)	\$ (2.034.060)	\$ (2.949.300)	\$ (2.933.707)	\$ (3.800.060)	\$ (4.715.300)
Transporte (t=0)	\$ (200.000)	\$ (200.000)	\$ (200.000)	\$ (200.000)	\$ (200.000)
Montaje (t=0)	\$ 300.000)	\$ (300.000)	\$ (300.000)	\$ (300.000)	\$ (300.000)
Desmontaje final traído a presente (t=0)	\$ 294.889)	\$ (293.388)	\$ (882.178)	\$ (291.827)	\$ (879.155)
Desmontaje final (t=vida útil)	\$ (300.000)	\$ (300.000)	\$ (600.000)	\$ (300.000)	\$ (600.000)
Vida útil (semanas)	9,40	12,16	14,00	15,07	19,67
Vida útil (horas operativas)	750	973	1120	1206	1573
Valor equivalente semanal de tornillo	\$ (304.634)	\$ (304.634)	\$ (304.634)	\$ (304.634)	\$ (304.634)

La tabla anterior muestra que a medida que la alternativa aumenta su costo se espera que la vida útil del componente también aumente, además, es más rentable realizar los recubrimientos sobre el componente nuevo que incurrir en gastos de montaje y desmontaje para hacerlo al final de la primera vida útil del tornillo e inclusive incurrir en un riesgo operativo asociando a una mayor probabilidad de falla de la matriz y no del recubrimiento por reutilizar el tornillo.

Tabla 17. Vida adicional debido al recubrimiento.

Alternativa	Estado del tornillo	Vida útil total	Vida útil adicional por el recubrimiento
Soldaduras	Nuevo	973	223
	Usado	1120	370
Polímeros	Nuevo	1206	456
	Usado	1573	823

En la Tabla 17 se muestra la vida útil adicionada al componente debido al recubrimiento para que sea comparable con el caso de estudio. Se nota un incremento de más del doble para el caso del recubrimiento polimérico sobre el tornillo usado respecto al caso de estudio, mientras que para el recubrimiento por soldaduras sobre el tornillo usado es necesario alcanzar 50% adicional a la vida útil del caso de estudio.

Es importante mencionar que los tiempos operativos calculados en el modelo de reemplazo son dados para que cualquier alternativa sea indiferente, es decir que si con el tratamiento (recubrimiento) hecho se obtiene mayor tiempo operativo al calculado, éste resulta ser más rentable que el caso de estudio base.

El modelo debe ser corrido según las características y costos particulares de cada planta, es decir que los tiempos determinados anteriormente aplican para los recubrimientos seleccionados y para tornillos de prensas P6 bitornillo base del estudio.

Divulgación de resultados

Los resultados obtenidos del proyecto se dieron a conocer de manera parcial en El Palmicultor número 488 y total en este Boletín Técnico; en las reuniones de los comités asesores de plantas de beneficio de las zonas palmeras del país y se realizó un plan de transferencia de resultados a los Centros SENA de Villavicencio, Yopal, Gaira, Barrancabermeja y Aguachica.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de los gerentes de empresas palmicultoras, directores de planta y personal técnico que participaron en el desarrollo del estudio en conjunto con Cenipalma, entre ellos la planta de beneficio Entrepalmas S.A., con un reconocimiento especial al ingeniero Jairo Iván Hoyos por su disposición y apoyo en la concepción, desarrollo y finalización de este proyecto. A los ingenieros Edgar Yañez y Lina Martínez por su respaldo constante en la construcción del proyecto de mantenimiento en plantas de beneficio. Al aporte de las empresas SAGER e Imantt Solutions en la selección y aplicación de los recubrimientos. Igualmente, a Fedepalma-Fondo de Fomento Palmero por facilitar esta investigación y el apoyo económico recibido por parte del Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA (mediante el Convenio 0337/11).

Bibliografía

- Amendola, J. L. (junio de 2008). Aplicación de un modelo. (A. E. Calidad, Ed.) *Calidad*, 22-25.
- ARATA, A. (2009). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales: Aplicación de la plataforma R-MES*. Santiago: RIL Editores.
- ASTM Standars. (s.f.). *E45 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel*.
- ASTM Standars. (s.f.). *E8 Standard Test Methods for Tension Test of Metallic Materials*.
- Cabrera, S. (2005). La confiabilidad integral del activo. *Seminario Internacional de Mantenimiento -TECSUP*. Arequipa - Perú.
- Carreras, & Montana, F. (2011). Actualidad industrial de las técnicas de recubrimientos de capas duras finas. *Grupo TTC*.
- Carreras, I., & Montala, f. (s.f.). *Actualidad industrial de las técnicas de recubrimientos de capas duras finas*. Grupo ttc.
- Chemline. (2012). Application Procedures for Chemline 2400/32.
- CHIEW, L. (2004). Corrosión de acero dulce por destilados de ácidos grasos de palma. *Palmas*, 25(Especial), 406 - 417.
- Deutsches Institut für Normung. (s.f.). *Types of wear and wear mechanisms in accordance with DIN 50 320*.
- Fabelo, S., & Sanchez, D. (Enero - Abril de 2009). Propuesta para el cálculo del costo del No Mantenimiento. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 12(1), 45-98.
- Fernandez, I. (2003). El Coste de ciclo de vida en las bombas. *Anales de Mecánica y Electricidad*, 16-24.
- Gahr, K.-H. (1998). Wear by hard particles. *Tribology International*, 587–596.
- Gerling, H. (1979). *Modelado y conformación*. España: Editorial Reverté.
- GI, S. (s.f.). *STOCK: Gestión Integral*. Recuperado en Mayo de 2013, de <http://stockgi.com/servicios/gestion-de-activos/>
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. México: Prentice Hall. Imantt Solutions. (2013). Informe de recubrimiento por pintura polimérica.
- Madrid, M. (2012). *Tecnología de la adhesión*. España: Departamento Técnico de Loctite.
- Madrid, M. (s.f.). *Tecnología de la adhesión*. España: Departamento Técnico de Loctite.
- Martínez Pérez, F. (2002). *La tribología, ciencia y técnica del mantenimiento*. México: Limusa.

Centro de Investigación en Palma de Aceite
Calle 20A N° 43A - 50 Piso 4 Bogotá D.C.
PBX: 208 6300 Fax: 244 4711
www.cenipalma.org

