



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento

**GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EMPLEANDO ULTRASONIDO PARA
CAÑÓN Y HUSILLO DE EMPUJE DE MÁQUINA EXTRUSORA DE POLÍMEROS, SEGÚN ISO
17359**

Ing. Jaime Rodolfo Chocoy Cachín
Asesorado por el Mtro. Ing. Rudy René Carías

Guatemala, junio de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EMPLEANDO ULTRASONIDO PARA
CAÑÓN Y HUSILLO DE EMPUJE DE MÁQUINA EXTRUSORA DE POLÍMEROS, SEGÚN ISO
17359**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA ESCUELA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JAIME RODOLFO CHOCOY CACHÍN
ASESORADO POR EL MTRO. ING. RUDY RENE CARIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUATEMALA, JUNIO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ratón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

JURADO EVALUADOR QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE DEFENSA

DECANO	Mtro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores
SECRETARIA	Mtra. Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EMPLEANDO ULTRASONIDO PARA
CAÑÓN Y HUSILLO DE EMPUJE DE MÁQUINA EXTRUSORA DE POLÍMEROS, SEGÚN ISO
17359**

Tema que me fuera aprobado por la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, con fecha 06 de marzo de 2019.

Ing. Jaime Rodolfo Chocoy Cachín

En mi calidad como Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento titulado: **"GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EMPLEANDO ULTRASONIDO PARA CAÑÓN Y HUSILLO DE EMPUJE DE MÁQUINA EXTRUSORA DE POLÍMEROS, SEGÚN ISO 17359"** presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial Jaime Rodolfo Chocoy Cachín quien se identifica con Carné 9515879, procedo a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"

Pedro Antonio Aguilar Polanco
Maestro. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, junio de 2019.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2019-011

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado "GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EMPLEANDO ULTRASONIDO PARA CAÑÓN Y HUSILLO DE EMPUJE DE MÁQUINA EXTRUSORA DE POLÍMEROS, SEGÚN ISO 17359" presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial Jaime Rodolfo Chocoy Cachín quien se identifica con Carné 9515879, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez Coti
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, junio de 2019.

Cc: archivo/LZLA.

Ref.APT-2019-011

Como Coordinadora de la Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado "GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EMPLEANDO ULTRASONIDO PARA CAÑÓN Y HUSILLO DE EMPUJE DE MÁQUINA EXTRUSORA DE POLÍMEROS, SEGÚN ISO 17359" presentado por el Ingeniero Mecánico Industrial Jaime Rodolfo Chocoy Cachín quien se identifica con Carné 9515879.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"


Maestra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores
Coordinador(a) de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, junio de 2019.

Cc archivo/L.Z.L.A.

Ref.APT-2019-011

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Mecánico Industrial **Jaime Rodolfo Chocoy Cachín** quien se identifica con carné No. **9515879** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado **"GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EMPLEANDO ULTRASONIDO PARA CAÑÓN Y HUSILLO DE EMPUJE DE MÁQUINA EXTRUSORA DE POLÍMEROS, SEGÚN ISO 17359"** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Maestro. Ing. Rudy René Carías
Asesor(a)

Rudy René Carías
Ingeniero Mecánico
Colegiado 11125

Guatemala, junio de 2019.

Cc: archivo/L.Z.L.A.

Guatemala 30 de enero de 2019

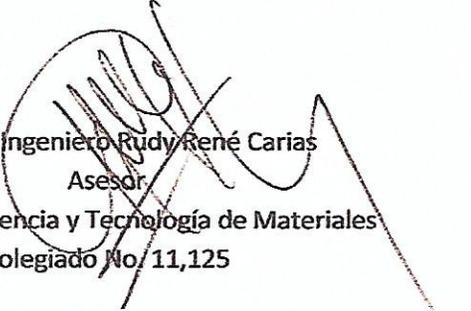
Ing. Edgar Álvarez Cotí
Director de Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Maestría de Ingeniería en Mantenimiento
Universidad de San Carlos de Guatemala

Distinguido Ingeniero Álvarez:

Por este medio hago de su conocimiento que como asesor doy la aprobación del trabajo de graduación titulado **GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO EMPLEANDO ULTRASONIDO PARA CAÑÓN Y HUSILLO DE EMPUJE DE MÁQUINA EXTRUSORA DE POLÍMEROS, SEGÚN ISO 17,359**, elaborado por el ingeniero **Jaime Rodolfo Chocoy Cachín** identificado con carné 95-15879; quien se encuentra en el programa de Maestría de Ingeniería en Mantenimiento.

Agradeciendo su atención y apoyo a la presente, quedo a la orden ante cualquier duda que pueda surgir.

Sin otro particular, me suscribo, atentamente,


Maestro Ingeniero Rudy René Carías
Asesor
Maestro en Ciencia y Tecnología de Materiales
Colegiado No. 11,125

*Rudy René Carías
Ingeniero Mecánico
Colegiado 11125*

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por sus infinitas bendiciones y brindarme el don de la vida.
Mis padres	Rodolfo Chocoy y Elvira Cachín Yoc. Por su amor incondicional en cada momento de mi vida.
Mi esposa	Lorena González. Por ser el complemento en este feliz camino de la vida.
Mis hermanos	William, Carolina, Wendy y Elder. Por su apoyo incondicional
Mis sobrinos	Andrea, William, David, Danna, Sofia y Dylan. Por ser una fuente de inspiración en mi crecimiento personal y profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme las herramientas para ser factor de cambios positivos en nuestra sociedad guatemalteca.
Facultad de Ingeniería	Por abrirme las puertas de las fuentes inagotables del conocimiento.
Mis padres	Porque gracias a sus enseñanzas, esfuerzos e inagotables muestras de amor he logrado alcanzar un peldaño más en mi vida.
Mis amigos de la infancia	Ricardo Villatoro, Luis Solis, Héctor Yoque, Roy Salazar, William, porque sigamos compartiendo muchos éxitos.
Mis amigos de la Facultad	Walter, Roberto, Carlos, Rafael, Lenin, Estuardo, Eduardo, Baldomero, Walter, Manolo, César, Julio, Douglas. Por su compañerismo en este arduo recorrido.
Pueblo de Guatemala	Porque gracias al fruto de su trabajo nos permite tener una educación superior.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN.....	IX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XV
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Mantenimiento	1
1.1.1. Mantenimiento correctivo.....	1
1.1.2. Mantenimiento preventivo.....	2
1.1.3. Mantenimiento predictivo	4
1.1.4. Ultrasonido.....	4
1.1.5. Requisitos para el proceso de medición	7
1.2. Costos del mantenimiento	12
1.3. Proceso de extrusión	13
1.3.1. Zonas geométricas del tornillo extrusor	14
1.3.2. Zonas funcionales del tornillo extrusor	16
1.3.3. Variables de control del proceso.....	18
1.3.4. Variables de control del equipo.....	18
1.4. Polímeros	18
1.5. Normas internacionales relativas al mantenimiento	19

2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	21
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	25
3.1.	Mantenimiento básico de equipos de extrusión	25
3.2.	Recomendaciones del fabricante relativas al mantenimiento...26	
3.3.	Monitoreo de condiciones variables de investigación.....	27
3.4.	Análisis gráfico	37
3.5.	Modelo de gestión de mantenimiento predictivo para máquina extrusora.....	39
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	41
	CONCLUSIONES.....	47
	RECOMENDACIONES	49
	BIBLIOGRAFÍA.....	51
	ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Pirámide de MCM.....	3
2.	Gráfica de los ultrasonidos	5
3.	Esquema de ultrasonido pulso-eco.....	7
4.	Equipo Dakota de ultrasonido.....	10
5.	Block de 5 pasos	11
6.	Esquema de medición de tornillo y cañón	12
7.	Tornillo de Arquímedes.....	14
8.	Descripción típica del husillo de empuje.....	15
9.	Esquema de holgura del tornillo y pared interna del cañón	16
10.	Extrusora típica con indicación de sus componentes	17
11.	Diagrama del flujo monitoreo de condiciones variable diámetro	22
12.	Esquema de medición del husillo	36
13.	Gráfica de producción.....	38
14.	Diámetro interno del cañón.....	39
15.	Medida externa del husillo	39
16.	Caja y bigotes de producción	41
17.	Valores antes de la 1ra medición.....	43
18.	Valores antes de la 2da medición.....	43
19.	Valores antes de la 3ra medición.....	44
20.	Valores posteriores a la 3ra medición.....	44
21.	Tendencia de producción	45

TABLAS

I.	Especificaciones del equipo de ultrasonido.....	9
II.	Tabla datos históricos de producción	28
III.	Diámetro interno en mm del cañón medido por ultrasonido	37
IV.	Medida externa en mm del husillo por ultrasonido	37

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
PHVA	Ciclo de la calidad: planear, hacer, verificar y actuar
END	Ensayos no destructivos
Kg/hr	Kilogramos/hr
MPd	Mantenimiento predictivo
MHz	Mega Hertz
HDPE	Polietileno de alta densidad
LDPE	Polietileno de baja densidad
LLDPE	Polietileno de baja densidad lineal
PP	Polipropileno

GLOSARIO

Filete	Parte alta del husillo que da la apariencia de ser una rosca del tornillo y que permite el empuje del material, a través del cañón y el husillo.
Husillo	Tornillo sin fin ubicado en el interior del cañón de una máquina extrusora.
Multímetro	Equipo de medición de variables eléctricas que permite tomar lecturas de corriente, voltaje y resistencia.
VOSO	Inspección preliminar: ver, oír, sentir, oler.
Holgura	Espacio libre entre la pared interna del cañón y la parte alta del filete de un tornillo de empuje, generalmente no debe ser mayor de 0.1% del diámetro nominal interno del cañón
Ultrasonido	Técnica de ensayo no destructivo, utilizado en el mantenimiento predictivo
Blower	Turbina de inyección de aire para control de temperatura en las secciones del cañón de una máquina extrusora

RESUMEN

Este trabajo de investigación busca definir un modelo de gestión de mantenimiento predictivo, para el cañón y husillo de empuje de una máquina extrusora de polímeros, toda vez que estos dispositivos constituyen una parte crítica del rendimiento del activo.

Por la forma física y materiales con los cuales están contruidos estos dispositivos, se definió utilizar la técnica de mantenimiento predictivo ultrasonido, que pertenece a la categoría de END, siguiendo los lineamientos de la norma ISO 17359 relativa al monitoreo de condiciones de equipos críticos.

Luego de la evaluación cuantitativa de las variables rendimiento de producción y dimensiones físicas del cañón y husillo de empuje, se pudo definir que existe una incidencia directa del desgaste de estos dispositivos con la disminución del rendimiento del equipo. Resultados que se muestran en forma gráfica para interpretarlos de forma adecuada y eficaz. Aunque es preciso realizar otros estudios de investigación descriptivo longitudinal para obtener una relación representativa de las variables.

Estos resultados podrán ser una guía para futuros trabajos de investigación y para los responsables de la gestión de mantenimiento y producción de los activos de un proceso de extrusión de polímeros. Sin embargo, se puede observar que la implementación del monitoreo de condiciones, a través de las diversas técnicas de END, en este caso específico el ultrasonido, puede ser de gran utilidad en una gestión líder en la rama del mantenimiento.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTAS ORIENTADORAS

Problema

No se cuenta con una revisión técnica que permita determinar las condiciones actuales del cañón y husillo de empuje de una máquina extrusora de polímeros, se tiene que esperar a que el rango de producción por período disminuya considerablemente para programar la inversión de cambio y la instalación misma.

Descripción del problema

En una planta de procesamiento o plastificación de polímeros existe implementado un plan de mantenimiento preventivo para las máquinas extrusoras, sin embargo, para la sección más importante donde se encuentra el cañón y el tornillo extrusor se limita únicamente a limpieza general y verificación que no se presenten golpes o fisuras visibles utilizando la técnica VOSO.

Es decir, no se tiene una certeza en tiempo de cuándo es necesario realizar el cambio de los elementos en cuestión, lo que implica una disminución en la productividad. Además, la forma física del cañón y el husillo dificultan realizar inspecciones adecuadas a sus dimensiones, aun cuando los dos dispositivos están directamente relacionados con el rango de producción de la máquina.

Como consecuencia del problema descrito se formulan las siguientes preguntas:

- Pregunta central

¿Qué modelo de gestión de mantenimiento preventivo es el adecuado para optimizar el rendimiento de un cañón y tornillo de una máquina extrusora, basado en la norma ISO 17359?

- Preguntas de investigación

1. ¿Qué procedimientos de mantenimiento preventivo básico existen para los equipos de extrusión de polímeros?
2. ¿Qué programa de mantenimiento indica el fabricante que se debe de llevar con este equipo de extrusión?
3. ¿Cómo se puede obtener una relación técnica entre las condiciones dimensionales del cañón, el husillo y el rango de producción por unidad de tiempo de una máquina extrusora?
4. ¿En función de la normativa su pueden realizar mejoras al sistema de mantenimiento actual con la técnica de ultrasonido?

OBJETIVOS

General

Diseñar el modelo de gestión del mantenimiento predictivo, a través de las técnicas de ultrasonido, para el cañón y husillo de empuje de una máquina extrusora, según ISO 17359.

Específicos

1. Establecer el tipo de procedimientos de mantenimiento preventivo básico que se desarrollan en los equipos de extrusión.
2. Determinar las recomendaciones del fabricante al respecto de los procedimientos de mantenimiento adecuados, para la sección del cañón y husillo de una máquina extrusora.
3. Desarrollar una relación técnica entre las condiciones dimensionales del cañón, el husillo de empuje y el rango de producción de una máquina extrusora.
4. Determinar qué mejoras se pueden obtener en la gestión del mantenimiento, siguiendo los lineamientos de la normativa de monitoreo de condiciones, a través de ultrasonido industrial.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación tiene un enfoque mixto cualitativo cuantitativo toda vez que se realizó un trabajo de recopilación de datos numéricos para tener una interpretación del comportamiento del rendimiento de producción de este equipo. Además, se recopiló información de datos tomando en campo, a través de un ensayo no destructivo, para complementar y fundamentar la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento predictivo.

Durante el proceso fue necesario obtener información documental y de campo, tales como: datos históricos de producción, manuales del fabricante relativos al mantenimiento y operación del equipo, norma ISO 17359, teoría de ultrasonidos, entre otros.

El diseño de la investigación del presente caso de estudio, se definió como descriptivo, toda vez que se recolectó información relacionada con la producción diaria, y los datos obtenidos a través de las mediciones con ultrasonido, que se definen como variables cuantitativas de la investigación.

El presente trabajo se desarrolló, a través de la metodología descriptiva transversal, por lo que fue importante obtener información histórica de rangos de producción, procedimientos actuales de mantenimiento preventivo realizados, lineamientos de normas relativas al proceso de medición por ultrasonido, lineamientos de normas relativas al monitoreo de condiciones.

Para el presente caso particular, se define como de tipo descriptivo, puesto que a través del análisis de la información histórica y en comparación

con los datos obtenidos de la aplicación de las técnicas preventivas, se obtuvieron mediciones de especificaciones físicas de los equipos, y finalmente las comparaciones para obtener la relación entre productividad y vida útil de los equipos, lo que será útil en la gestión del mantenimiento, de toda cuenta que permitirá definir períodos adecuados de la aplicación de las técnicas predictivas al activo bajo estudio, para que posteriormente pueda tener alcance a todas las máquinas de procesos iguales.

El alcance abarcó una máquina extrusora de producción nominal de 200 kh/hr, específicamente para el cañón y tornillo de empuje, que posteriormente se utilice como base en la cobertura de la gestión del mantenimiento de las demás máquinas extrusoras de la planta de producción.

Se describieron las variables numéricas, así posteriormente la información será de utilidad en la toma de decisiones de la gestión de mantenimiento y en la propuesta de solución para esta investigación. Se tomaron diversas muestras de variables como las siguientes:

- Diámetro
- Rangos de producción

Para el caso de las mediciones de diámetro y espesores del cañón y tornillo de empuje se realizaron 3 mediciones, derivado de la complejidad de la aplicación de la técnica de ultrasonido y el tiempo que implica detener la producción de la maquinaria, mientras que la variable de producción se obtuvieron mediciones diarias.

El ultrasonido se realizó con el método de pulso eco, para determinar las dimensiones del diámetro interno del barril o cañón y del tornillo de empuje,

basado en el procedimiento normado en ASTM E 797 e IRAM-ISO 9712, realizado por un profesional calificado con nivel II.

A través de la revisión documental, se definió de forma histórica el comportamiento del rango de producción diario del equipo bajo análisis. Por medio de la estadística descriptiva, se obtuvieron gráficos representativos, que permiten observar una tendencia del comportamiento de la producción.

Posteriormente, se presentan los resultados en tablas y gráficas, para facilitar la comprensión de los resultados obtenidos, a través de las herramientas de la estadística descriptiva. Finalmente, se presente una discusión de resultados y como consecuencia se planteen alternativas de solución a la problemática que dio origen a este trabajo de investigación.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo muestra una innovación en el desarrollo de la gestión de mantenimiento en la industria de extrusión de polímeros. Generalmente se enfocan todos los esfuerzos a realizar mantenimiento correctivo con un mayor esfuerzo: el mantenimiento preventivo. Sin embargo, innovar en la implementación de sistemas de mantenimiento predictivo representa un salto cualitativo en la gestión de los activos de una industria. Para este caso específico, en el proceso de extrusión de polímeros, para la fabricación de material de empaque para la agroindustria y la industria alimenticia se utilizan máquinas extrusoras de simple tornillo. Se trata de activos que se gestionan a través del mantenimiento preventivo y correctivo; sin embargo, esto tiene un costo elevado, además de representar paradas programadas que eventualmente limitan los resultados de la eficiencia en la producción.

Es también importante mencionar que la competencia globalizada exige tener una gestión de los equipos con altos indicadores de eficiencia, el cual se refleja en menores costos de mantenimiento por cada kilo de producto final, o bien en obtener el mayor rendimiento de la maquinaria, porque en caso contrario se pueden transformar en un problema para la industria bajo análisis, a través de la pérdida de clientes principalmente.

Evolucionar hacia la gestión de activos, a través de las filosofías del mantenimiento predictivo, mediante la aplicación de sus diversas técnicas, representa una oportunidad de solución y de anticipación a la competencia globalizada, puesto que se considera que a través de esta metodología se pueden tener resultados satisfactorios para el negocio en general, resultados

que se verán reflejados, por ejemplo, en mejores índices de productividad, menores costos de mantenimiento por kilo producido, menores tiempos de paradas programadas, entre otros.

Con el presente trabajo, se espera aportar a esta industria guatemalteca herramientas que faciliten la toma de decisiones oportunamente en la gestión de los equipos, que a la postre se reflejarán en beneficios económicos para los accionistas y consecuentemente para sus colaboradores. La investigación se desarrolla de forma completa en los capítulos siguientes:

El capítulo 1 es la sección donde se hace referencia a las especificaciones del proceso de extrusión, la fundamental del cañón y del tornillo impulsor, así como la importancia del monitoreo de condiciones para el proceso y la estimación de la vida útil de los dispositivos, según la norma ISO 17359. Además, se hace referencia a las técnicas de mantenimiento predictivo, tal como el ultrasonido.

En el capítulo 2, se tendrá el desarrollo de la investigación, es decir la sección donde se tiene una visión general del proceso efectuado para obtener la información histórica de productividad, los datos obtenidos de los mantenimientos realizados, y del esquema o procedimiento de la implementación del monitoreo de condiciones, a través del ultrasonido de los dispositivos bajo análisis.

El capítulo 3 está conformado por la presentación y el análisis de los resultados obtenidos, realizando gráficos que permiten visualizar el estado actual de los dispositivos, compararlos con los datos nominales del fabricante para obtener tendencias de la vida útil.

En el capítulo 4, se realizará la discusión de resultados, donde se definirá y explicará la propuesta de gestión del mantenimiento predictivo para una máquina extrusora de polímeros de cañón simple, con base en las técnicas de mantenimiento predictivo: ultrasonido.

1. MARCO TEÓRICO

Uno de los procesos de transformación de polímeros más importantes es el de extrusión de película tubular. La versatilidad del producto obtenido permite que cumplan muchas funciones, tales como: empaque flexible de alimentos o contenedores de basura, por ejemplo, además de las “propiedades físicas” que se obtienen en el producto final (Gómez y Gutiérrez, 2007, p. 20). Sin embargo, para obtener los resultados deseados es necesario conocer y controlar las variables de proceso y elegir los polímeros adecuados, en función de las especificaciones físicas del producto diseñado.

1.1. Mantenimiento

De forma habitual se define al mantenimiento como el conjunto de técnicas y actividades desarrolladas sobre activos, con la finalidad de prolongar su vida útil y su disponibilidad, para completar los procesos que fueron diseñados y, como lo indicó García en el 2010, “con el máximo rendimiento”. Sin embargo, la gestión moderna del mantenimiento ha adoptado conceptos como el ciclo de calidad total, con la finalidad de optimizar los recursos, reducir costos y aumentar la productividad, a través de la mejora continua de las prácticas del mantenimiento desarrollado.

1.1.1. Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo se define como la primera fase de la gestión del mantenimiento, el cual está enfocado en corregir todas las fallas que se

presentan en los activos en el menor tiempo posible. Es decir, como indicaron Rodríguez, Miguel y Sánchez en el 2001, “restaurar su estado operacional”.

Habitualmente la gestión del mantenimiento considera oportuno reducir al mínimo la aplicación del mantenimiento correctivo, por lo relativo a los costos elevados asociados que implica y por la intervención del equipo de mantenimiento en la resolución de las fallas que se presentan de manera abrupta, además de considerar el costo de oportunidad que un activo deje de desarrollar la actividad para la cual fue diseñado (generalmente es dejar de producir algún producto para la comercialización). En favor de esta técnica se puede decir que se tiene un “máximo aprovechamiento de la vida útil de los equipos” (Cárcel, 2014, p.125) y gestionada de manera adecuada puede ser una técnica valiosa dentro de un plan general de mantenimiento.

1.1.2. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es el que se desarrolla, a partir de un programa de mantenimiento previamente establecido, orientado a alcanzar los siguientes resultados:

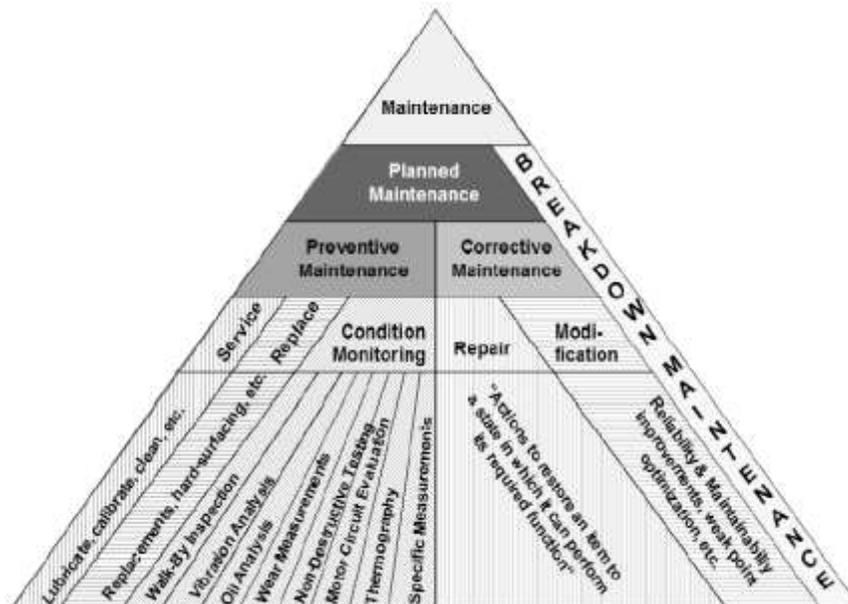
- Reducir tiempos muertos de los equipos
- Minimizar las fallas emergentes
- Determinar las causas de las fallas recurrentes para eliminarlas
- Aumentar la vida útil de los activos

El mantenimiento preventivo tiene la particularidad, como lo indicó Aladesaye en el 2008, que “se realiza en activos periódicamente o por horarios”, cubriendo actividades como: servicios, reemplazos y monitoreo de condiciones.

Con los procesos de globalización, la competencia en toda la industria se ha incrementado y consecuentemente, como lo indicó Tavares en el 2006, todas las corporaciones industriales se han convertido en una cadena conformada por cada departamento que la integra y “el mantenimiento es uno de los de mayor importancia” en el alcance de los objetivos de la empresa.

De tal forma que, la gestión del mantenimiento de clase mundial ha adoptado muchas herramientas para alcanzar los objetivos que demanda el mundo moderno, tales como: tecnología para END y monitoreo de condiciones, software para la gestión propia del mantenimiento, análisis de causa raíz, ciclo PHVA, entre otras. A continuación, se muestra un esquema gráfico de los elementos que conforman una gestión de mantenimiento de clase mundial, la cual puede ser útil como guía para la coordinación efectiva de la gestión de activos (ver figura 1).

Figura 1. Pirámide de MCM



Fuente: PUERTAS (2016)

1.1.3. Mantenimiento predictivo

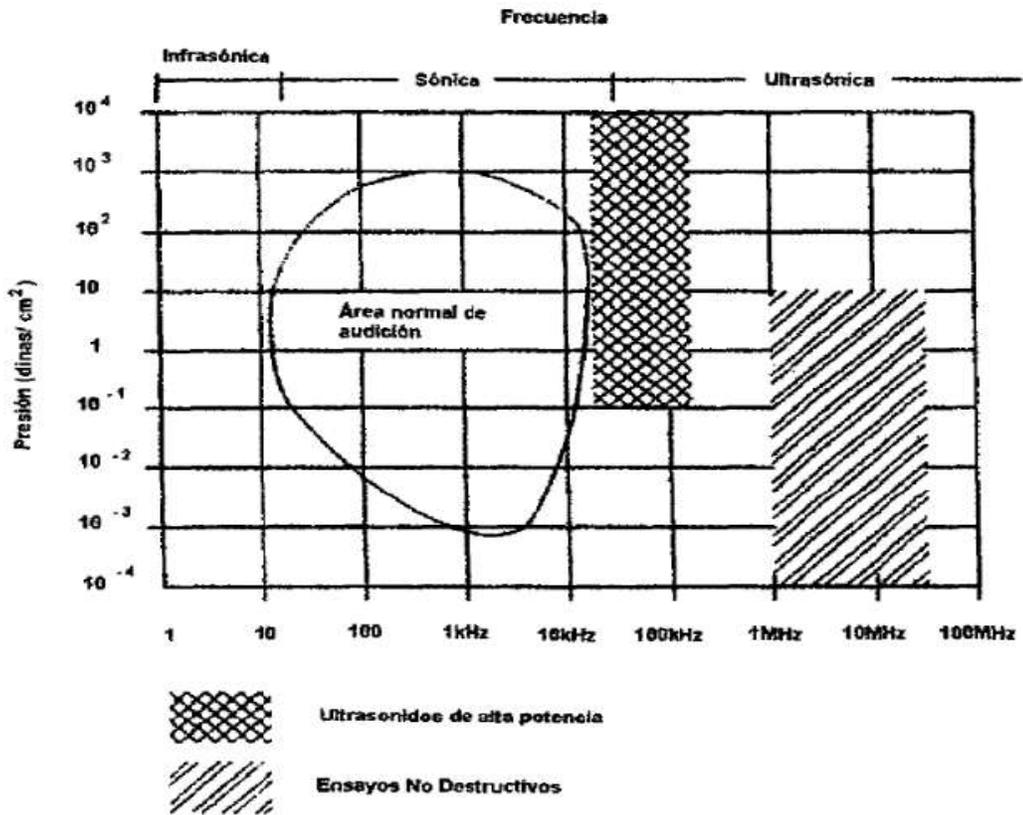
El mantenimiento predictivo permite conocer de forma profunda las condiciones de los equipos, “observando el comportamiento y su funcionamiento” (Zaldívar, 2006, p.27), a través de actividades rutinarias planificadas como: ensayos no destructivos, termografía, verificación de dimensiones, análisis de aceite, entre otras. Para el presente caso de estudio se desarrolla la técnica de ultrasonido.

Es importante destacar que la implementación del mantenimiento predictivo de forma sistemática permite tener ahorros considerables en piezas de recambio, costos por almacenaje, mejoras en los índices de productividad, incremento de la confiabilidad de los activos, intervenciones oportunas del equipo de mantenimiento, entre otros beneficios.

1.1.4. Ultrasonido

Antes de definir ultrasonido se debe saber que la zona audible, es decir, la zona donde los humanos perciben de forma natural los sonidos, se encuentra dentro del rango de frecuencia entre los 16-20000 Hz/seg, mientras que para la aplicación de la técnica de ultrasonido se utilizan frecuencias, a partir de 1 Mhz/seg.

Figura 2. Gráfica de los ultrasonidos



Fuente: Asociación Española de Ensayos No Destructivos (2006)

Tal como se muestra en la figura 2, se indica el área normal de audición encerrada en un círculo para los humanos, mientras que la sección con rayado a doble línea inclinada muestra la zona donde se realizan los ensayos no destructivos, a través de ultrasonido.

El ultrasonido tiene una amplia gama de aplicaciones en el mantenimiento predictivo, tales como:

- Detección de fugas de aire comprimido
- Detección de elementos rotativos dañados

- Fugas de fluidos
- Detección de efectos corona en transformadores
- Medición de espesor de pared de tuberías
- Inspección de soldaduras
- Evaluación de discontinuidades en materiales

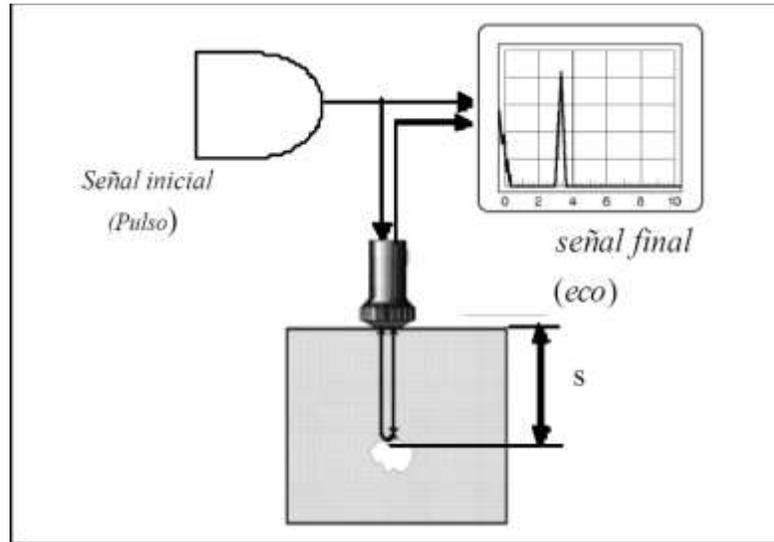
Para la presente investigación se utilizará el ultrasonido por contacto, del tipo pulso-eco, para definir “las condiciones físicas” del cañón y del husillo de empuje de una máquina extrusora. (Cárdenas, 2007, p.27).

1.1.4.1. Método pulso-eco

Este método es generalmente utilizado para detectar discontinuidades o fallas en las piezas bajo análisis, o bien para la medición de espesores de diversos materiales, razón por la cual se utiliza el método pulso-eco en este caso de estudio. A través del equipo de ultrasonido mediante el palpador piezoeléctrico se genera un haz ultrasónico, que se puede desplazar por el interior o en la superficie del material.

Al encontrar un reflector se produce un eco, donde los reflectores básicamente son “cambios en las propiedades físicas” (Santos, Cancino, Yenque, Ramírez y Polomo, 2005, p. 25), superficiales o internas del material. El palpador recibe el retorno del haz ultrasónico y lo transforma a través del equipo en una indicación digital.

Figura 3. Esquema de ultrasonido pulso-eco



Fuente. Santos (2005)

1.1.5. Requisitos para el proceso de medición

Para obtener los resultados precisos es necesario establecer condiciones adecuadas para el proceso de ultrasonido. Estas condiciones son las siguientes:

- Objetivo de la medición
- Alcance
- Normas de aplicación
- Personal
- Tiempo de ensayo
- Condiciones superficiales
- Equipo
- Control de linealidad

- Medio acoplante
- Calibración
- Forma de barrido y medición

Para el presente caso de estudio, el objetivo del proceso de las mediciones por ultrasonido se enfoca en determinar los espesores del cañón y las dimensiones del husillo o tornillo de empuje, a fin de obtener la existencia o no de un desgaste propio del uso. El alcance se define únicamente para el cañón y el husillo de empuje, siendo estas las partes de mayor desgaste dentro de la máquina extrusora.

Por la naturaleza de la aplicación y de la estructura de las piezas bajo análisis, se establece que el proceso se regirá por las normas ASTM E 797 e IRAM-ISO 9712. La técnica de END por ultrasonido demanda competencias específicas para el analista, las cuales deben estar avaladas o certificadas por un ente especializado en el tema. Para el presente caso de estudio se tendrá el aval de IRAM, con sede en Buenos Aires, Argentina.

El mismo certifica las competencias del responsable de la utilización del equipo y de la interpretación de los resultados. Para este efecto se encuentra, en el Anexo 2, el certificado de competencias personales del ingeniero analista. Cabe destacar que para poder realizar este proceso de medición y emitir un informe con la interpretación de los resultados, el analista debe contar con el nivel II para el método de ultrasonidos.

Este END demanda un tiempo específico para la medición, sin embargo, previo a realizar el procedimiento es necesario desmontar el husillo de empuje del interior del cañón y realizar una limpieza de las superficies del husillo y de la parte interna del cañón, para eliminar todos los residuos del material que se

procesa en la máquina extrusora, a fin de evitar que se enmascaren las posibles imperfecciones.

El proceso del END por ultrasonido involucra al equipo de medición que se muestra en la figura 8; se muestra el equipo, el palpador de 5 Mhz y el medio acoplante de forma representativa. Para este caso de estudio se estará utilizando un dispositivo con las especificaciones mostradas en la tabla I:

Tabla I. **Especificaciones del equipo de ultrasonido**

Variable	Descripción
Marca	Dakota Ultrasonics CMX
Modelo	7499
Trasductor	5 MHz.
Tipo de acoplante	Acoplante Ultrasonix
Patrón	<i>Block</i> de calibración de 5 pasos acero

Fuente: elaboración propia.

Este equipo tiene la capacidad de tomar lecturas precisas para espesores desde 1 hasta 150 milímetros, por lo cual es apto para realizar las mediciones del cañón y el husillo de la máquina extrusora bajo análisis.

Figura 4. **Equipo Dakota de ultrasonido**



Fuente: elaboración propia.

Al instrumento se le realiza una verificación de control de linealidad, preferentemente cada doce meses. Para el caso de la linealidad vertical deberá presentar un +5 % hasta el 80 % de la altura total de la pantalla, y para el caso de la amplitud de la pantalla deberá estar dentro del 1 % de la longitud total de barrido realizado.

Para obtener lecturas correctas es preciso utilizar un medio acoplante, el cual consiste en una sustancia líquida y viscosa para permitir un fácil desplazamiento del palpador, es decir, el transductor de 5 Mhz. En este caso, se utilizará el lubricante mineral SAE 30, tanto para la calibración como para el ensayo mismo.

Antes de iniciar la medición se requiere realizar una verificación con el *block* de 5 pasos. Este *block* debe ser idealmente de la misma “composición del material a medir” (Colín y Viliesid, 2010. P.2), o en su defecto uno de material representativo o similar a la pieza medida. Para este caso, se utilizará el *block* de 5 pasos de acero aleado 4340.

Figura 5. **Block de 5 pasos**

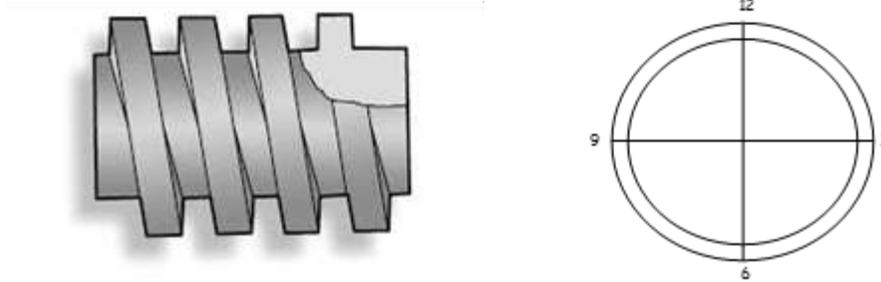


Fuente: elaboración propia.

Cada paso tiene un espesor definido, la verificación consiste en realizar la medición con el palpador y el medio acoplante, de tal forma que, en la pantalla del equipo de ultrasonidos, se muestre el valor especificado en cada uno de los pasos del *block*.

Para realizar el barrido y las mediciones se tomarán ciertas consideraciones, de tal forma que el informe pueda ser comprendido por el lector. El barrido se realizará de forma manual por contacto directo, de acuerdo al esquema de la figura siguiente:

Figura 6. **Esquema de medición de tornillo y cañón**



Fuente: elaboración propia.

Los valores obtenidos serán tabulados y tendrán posición horaria donde se efectúa la medición y el valor obtenido del equipo de ultrasonidos.

1.2. Costos del mantenimiento

Se puede indicar de forma sencilla que todos los esfuerzos de la gestión de mantenimiento están enfocados en maximizar la rentabilidad de los activos. Esto implícitamente está relacionado con la gestión de costos de mantenimiento, de tal forma que el equipo de colaboradores debe estar involucrado desde la fase de diseño de una línea de producción, la compra misma y el acompañamiento a lo largo de su vida útil.

El mantenimiento debe de evolucionar a no considerarse un gasto, sino definirlo como una inversión, por la magnitud del impacto que tiene en el resultado final del producto o servicio obtenido. Esto se puede lograr a través de la implementación de las nuevas metodologías de trabajo, tales como el mantenimiento predictivo y sus diversas técnicas.

Otros factores que influyen en una gestión adecuada de mantenimiento son el nivel de tecnología del equipo o maquinaria, la eficiencia energética, la accesibilidad para el monitoreo de condiciones, la disponibilidad de las piezas de recambio, entre otros. La implementación adecuada de estas metodologías y procesos permite al mantenimiento entrar en la dinámica de la mejora continua y obtener mejores indicadores respecto del costo-beneficio de lo invertido en la gestión del mantenimiento.

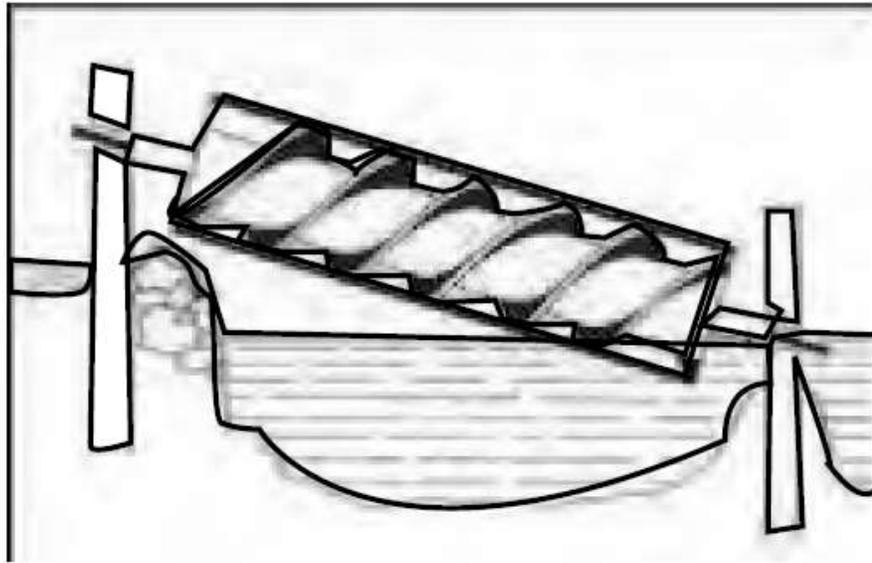
1.3. Proceso de extrusión

El proceso de extrusión se desarrolla a partir de un tornillo de Arquímedes o tornillo sin fin, que se utiliza para bombear materia prima bajo condiciones de temperatura y presión controlada, hasta llegar al punto de plastificación, para luego hacer pasar la mezcla de polímeros homogenizados al cabezal o molde y obtener una película tubular controlada.

La burbuja tubular obtenida debe cumplir con las propiedades y especificaciones previamente acordadas con el cliente; y cumplir con el objetivo para el cual fue diseñada y fabricada.

En la figura 7, se puede observar un esquema representativo de un tornillo de Arquímedes, el cual es la base de muchas aplicaciones industriales y para el desarrollo de esta investigación tiene relación directa con el husillo de una máquina extrusora.

Figura 7. **Tornillo de Arquímedes**



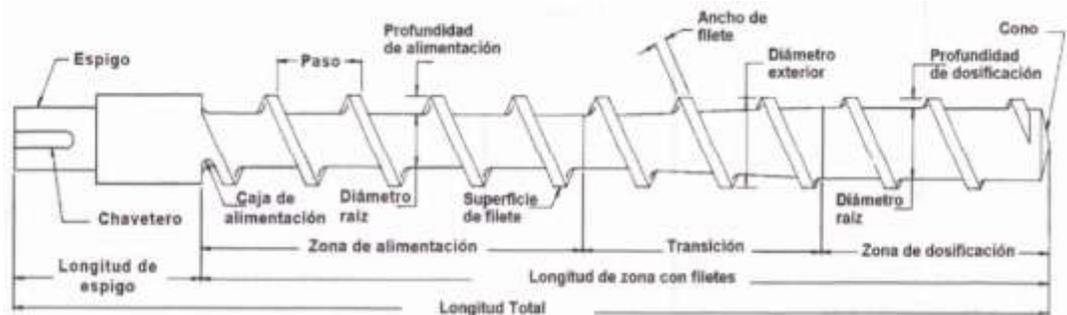
Fuente: Parra (2009)

1.3.1. Zonas geométricas del tornillo extrusor

Generalmente los husillos tienen diversas secciones geométricas, cada una desempeña un rol importante del proceso de extrusión, siendo estas secciones las siguientes:

- Zona de alimentación
- Zona de transición (o compresión)
- Zona de dosificación

Figura 8. Descripción típica del husillo de empuje



Fuente: Gómez y Gutiérrez (2007)

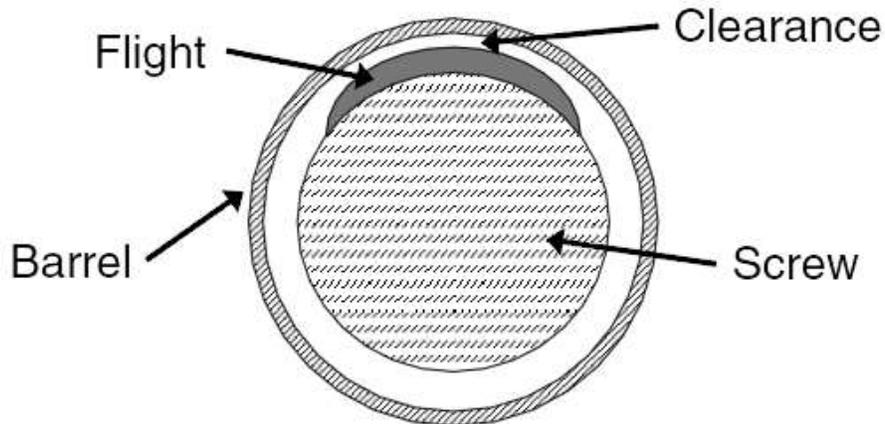
Una característica importante de la geometría del tornillo es la relación existente entre el largo y el diámetro del tornillo, L/D.

$L/D = \text{largo total de tornillo con filetes} / \text{diámetro de salida del tornillo}$.

Los rangos típicos de esta relación van desde 18:1 hasta 32:1, siendo comúnmente utilizados los que tienen relación de 24:1, para cumplir con las funciones estándar de traslados de material, fundición del material y bombeo del material fundido, de tal forma que menos funciones requerirán un tornillo más corto, mientras que más funciones, como mezclado y desgasificación, requerirán un tornillo más largo.

Otra característica es el ajuste o espacio libre que deba existir entre el filete del tornillo y el diámetro interno de la pared del cañón o barril. Generalmente esta holgura debe ser equivalente al 0,1% del diámetro del tornillo. Por ejemplo, si un tornillo tiene de diámetro de 70 mm, la holgura total deberá ser de 0,07 mm, de tal forma que holguras más pequeñas pueden generar un desgaste excesivo de los filetes del tornillo, mientras que holguras más grandes reducen la capacidad de fundición y bombeo de la mezcla fundida.

Figura 9. **Esquema de holgura del tornillo y pared interna del cañón**



Fuente: Cantor (2006)

1.3.2. **Zonas funcionales del tornillo extrusor**

Además, es importante establecer que para los tornillos extrusores se definen seis zonas funcionales, las cuales se deben reconocer para entender la forma en que trabaja el sistema y lograr el máximo rendimiento del proceso.

Cada zona desarrolla una función específica en el proceso de extrusión, es por esta causa que cada una de estas zonas tiene una configuración diferente; básicamente las variaciones se producen en el diámetro de la base del tornillo, en la distancia de separación del tornillo y finalmente en la forma de los filetes. Estas zonas funcionales son las siguientes:

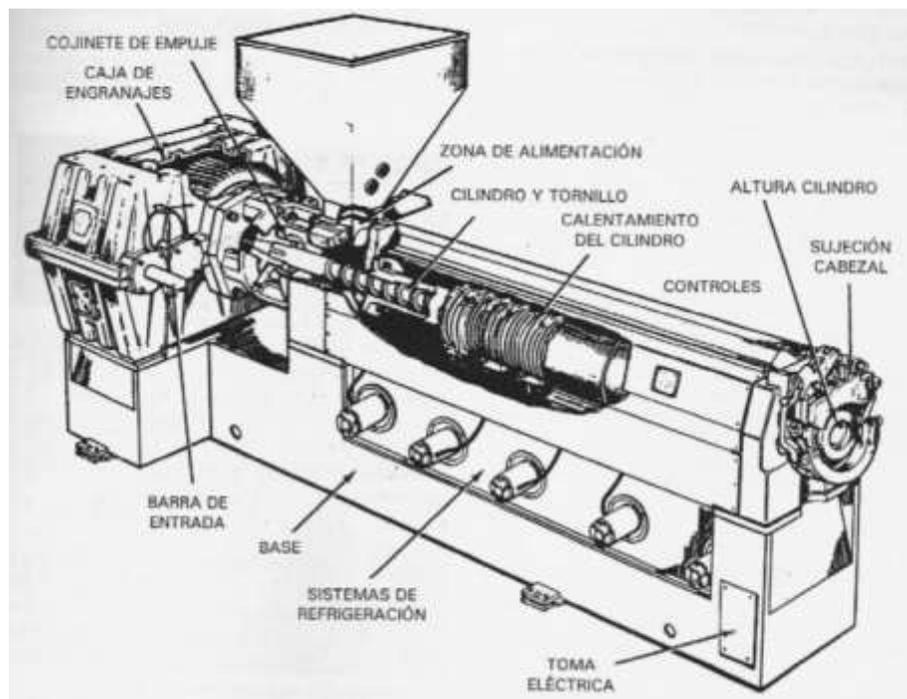
- Transporte de sólidos
- Fundición de sólidos
- Bombeo de material fundido
- Mezclado

- Desgasificación (o desvolatilización)
- Formador

Cada una de estas zonas trabaja a temperaturas diferentes para cumplir la función para la cual fue diseñada; por tal motivo, cada zona está regida por un control de temperatura y una resistencia eléctrica para mantener la temperatura en el valor programado.

Las temperaturas o el perfil de temperaturas del tornillo extrusor varían de acuerdo al tipo de material que se está procesando, generalmente va en forma ascendente de la zona de transporte de sólidos hasta el formador, iniciando en un rango de 90-100 °C y finalizando en el formador en un rango de 190-220°C.

Figura 10. **Extrusora típica con indicación de sus componentes**



Fuente: Maldonado y Medina (2008)

1.3.3. Variables de control del proceso

Las variables que se deben controlar en el proceso de extrusión, como indicaron Pérez, Torres y Candal (2013), “para obtener la medida, espesor y propiedades requeridas por el cliente”, constantemente se deben modificar a través de los equipos auxiliares de control de proceso. Dentro de este caso de investigación del proceso de extrusión de película tubular se puede citar como las variables más importantes:

- La temperatura de fusión
- El caudal o velocidad del husillo de empuje
- La presión dentro del cañón

1.3.4. Variables de control del equipo

Las variables para el monitoreo de condiciones del equipo en este caso de estudio son: el diámetro interno del cañón y el diámetro externo del husillo en la sección de compresión, además de los rangos de producción por unidad de tiempo, que para este caso serán fueron tabulados en por día.

1.4. Polímeros

Se denomina polímeros a las largas cadenas de átomos, usualmente Carbono (C), Oxígeno (O), Nitrógeno (N) o Azufre (S), combinados de tal forma que, tiene una configuración única para cada polímero. Para el proceso de extrusión de este caso de investigación se utilizan polímeros denominados de la siguiente forma: HDPE, LDPE, PP, LLDPE, entre otros.

Cabe destacar que “el polietileno, además de ser el plástico de mayor producción y consumo en el mundo, es uno de los más baratos” (Delgado y Medina, 2005).

1.5. Normas internacionales relativas al mantenimiento

En la industria generalmente se observa que se pone especial énfasis en sistemas de gestión de calidad enfocados en los procesos productivos. Estos sistemas están enfocados en obtener estándares de calidad de los productos y/o servicios, tomando como primicia el ciclo PHVA, obteniendo como consecuencia estandarización de los procesos, eficiencia, reconocimiento de los clientes, entre otros.

La gestión de mantenimiento no es ajena a los ciclos de la mejora continua, por ello se hace necesaria la implementación de las normas necesarias para cada uno de los procesos. Es importante hacer notar que todas las normas definen criterios relevantes para procesos productivos, los cuales son documentados por los distintos comités técnicos y para la implementación se definen como de carácter voluntario.

Existen diversos organismos o asociaciones internacionales, conformadas por equipos técnicos que elaboran normas o guías para estandarizar muchos procesos. Dentro de estos organismos es posible citar los siguientes:

- ASTM-American Society of Testing Materials
- ASME-The American Society of Mechanicals Engineers
- SAE-Society of Automotive Engineers
- EN-Normas europeas
- ISO-International Organization for Standardization

1.5.1. Monitoreo de condiciones, ISO 17359

Se denomina monitoreo de condiciones, según ISO 17359:2003 (E), a la serie de “actividades que están enfocadas en identificar y evitar los modos de fallas desde la causa raíz”. Esta norma fue elaborada por el subcomité de SC5 de vibración mecánica e impacto. Y todos los lineamientos son aplicables a todo tipo de máquina.

Generalmente para estas actividades se realiza la técnica VOSO como principio básico, porque no incurre en costos, sino que únicamente en las habilidades de los técnicos designados para la actividad. VOSO son las iniciales de ver, oír, sentir y oler; con estas actividades rutinarias se pueden detectar las condiciones anómalas en un equipo.

Posteriormente a la técnica VOSO y con la implementación de dispositivos tecnológicos, se pueden desarrollar actividades de monitoreo de “variables físicas que son indicadores de la condición” del activo (Altman, 2005, p.2). Estas variables pueden ser: temperatura, consumo de corriente, vibraciones, ruido, entre otras. Sin embargo, los equipos por sí mismos proporcionan datos netamente puntuales únicamente, por lo tanto, con el avance en la implementación de nuevas formas de administrar el mantenimiento, la capacitación y calificación del personal técnico se convierten en procesos relevantes dentro de la gestión de mantenimiento de una industria, como por ejemplo: en análisis de vibraciones, lubricantes, ultrasonidos, ensayos no destructivos (END), entre otros. Que el personal, luego de calificado, pueda realizar interpretaciones adecuadas que permitan obtener mejores resultados en la fase del mantenimiento predictivo.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

La norma relativa al monitoreo de condiciones, ISO 17359, sugiere generar mediciones y tendencia de los datos históricos, previamente se tienen que tener definidos algunos detalles tales como:

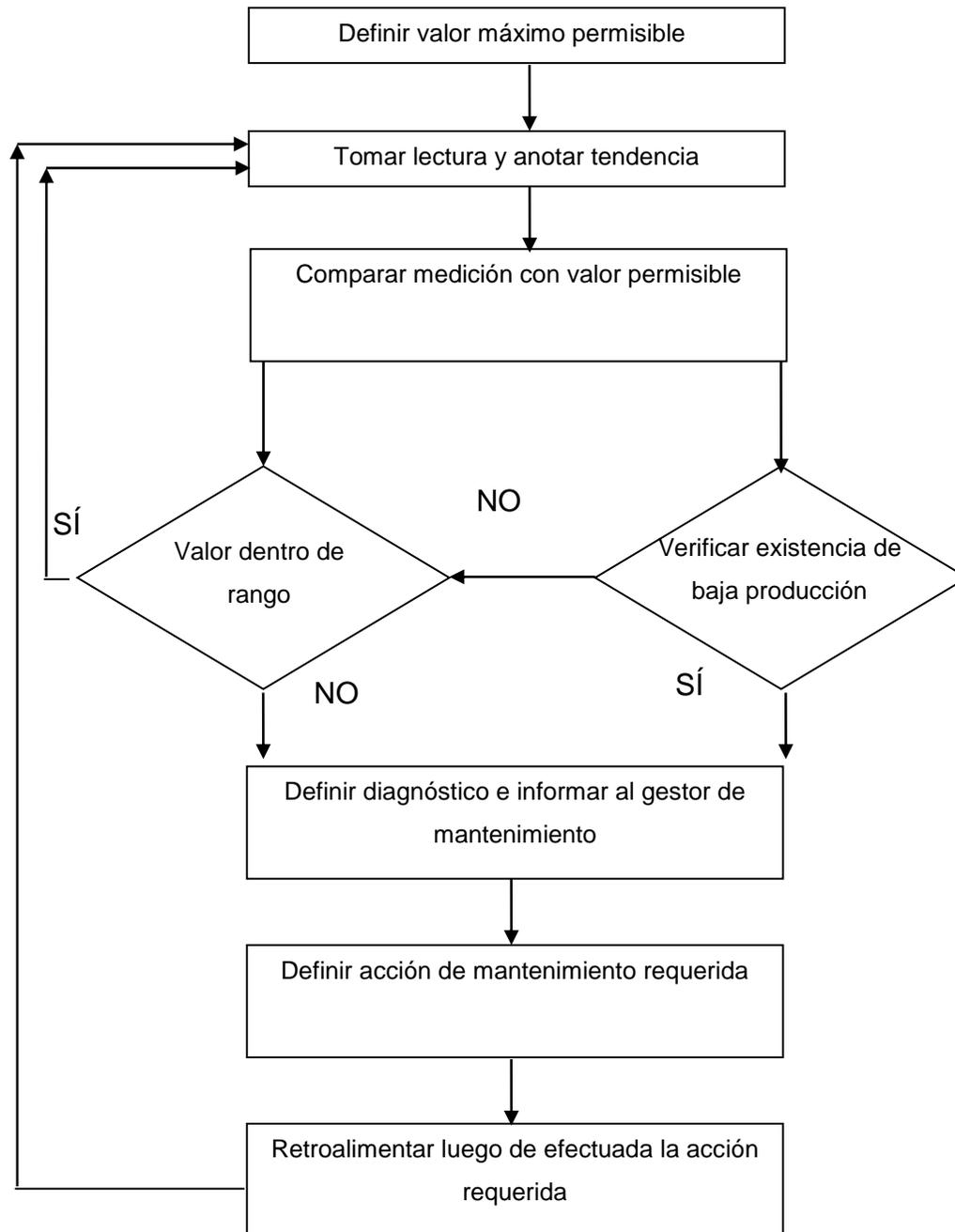
- Identificar el equipo
- Definir la función del equipo
- Definir la criticidad del dispositivo
- Definir la los parámetros que deseamos medir
- Definir los valores permisibles del parámetro medido

Estos elementos permitieron enfocar el estudio hacia el cañón y husillo de empuje de una máquina extrusora, toda vez que son dispositivos críticos del activo. En consecuencia, se desarrolló el diagrama de flujo del monitoreo de condiciones de la variable diámetro, que se muestra en la figura 11.

El proceso documental de investigación demandó obtener datos históricos de la variable rango de producción. Los que se obtuvieron a través de los reportes de producción por cada turno (ver anexo 1). Estos valores fueron tabulados en una hoja electrónica (Excel), para luego generar tendencias de producción en función del tiempo.

Se tuvo acceso a los reportes de un año, período durante el cual se desarrollaron las tres mediciones de ultrasonido realizado. Ambos procesos son complementarios en la investigación.

Figura 11. Diagrama del flujo monitoreo de condiciones variable diámetro



Fuente: elaboración propia.

Para el caso de la variable diámetro, interno del cañón y externo del husillo de empuje, se realizó un proceso de medición a través de la técnica pulso-eco de ultrasonido. Estas mediciones se realizaron durante el mantenimiento preventivo programado que se tiene para todo el equipo.

Aunque para el cañón y husillo solamente se desarrolla una limpieza mecánica. Lo cual es ideal para el proceso de medición por ultrasonido. El proceso se desarrolla se enumera a continuación:

- Elevará la temperatura del cañón y husillo hasta 250°C
- Evacuado de materia prima del interior del cañón
- Desmontaje del cabezal formado
- Expulsar el tornillo fuera del cañón a intervalos de un metro
- Limpieza mecánica de la sección expulsada del husillo de empuje
- Extraer el tornillo del cañón y finalizar limpieza mecánica
- Limpieza mecánica del interior del cañón
- Dejar enfriar los dispositivos hasta la temperatura ambiente
- Realizar las mediciones por ultrasonido de acuerdo a la norma específica
- Realizar la medición justo en la ubicación del sensor de presión

Este proceso se desarrolló en el equipo durante tres momentos distintos. El intervalo de tiempo se hizo coincidir con los paros programados para efectuar el mantenimiento preventivo, para no afectar la producción durante el desarrollo de la investigación.

Para la medición a través de ultrasonido, se utilizó un equipo Dakota Ultrasonics CMX, teniendo particular cuidado en esperar que la temperatura del cañón y tornillo no excediera los 93°C, para garantizar una lectura correcta del proceso de medición.

El equipo de ultrasonido se calibró justo antes de iniciar el proceso de medición, a través del patrón de referencia, tal como se indicó en la sección del marco teórico de este trabajo de investigación. Con la finalidad de garantizar una lectura correcta.

Posteriormente, se desarrolló un análisis a través de la estadística descriptiva, para definir la correlación de los datos de producción y los datos de las lecturas obtenidas por la técnica de ultrasonido

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados obtenidos derivados del trabajo de investigación desarrollado.

3.1. Mantenimiento básico de equipos de extrusión

Las actividades desarrolladas en el equipo de extrusión se limitan a mantenimiento planificados, tanto correctivos como preventivos de recambio. Las tareas de mantenimiento se listan a continuación:

- Limpieza general de la máquina
- Verificación de muestras de desgaste en rodillos
- Verificación de muestras de desgaste en cojinetes de rodillos
- Limpieza de paneles eléctricos
- Rectificación de rodillos jaladores, metal y hule (nip roll)
- Cambio de rodamientos al motor de transmisión de potencia
- Cambio de rodamientos a caja reductora de transmisión de potencia
- Cambio de fajas
- Cambio de aceite a caja reductora
- Cambio de rodamientos a rotación del cabezal
- Limpieza de filtros de aire del soplador del cabezal
- Verificación de funcionamiento de las resistencias de calentamiento
- Verificación de funcionamiento de blower de cañon
- Limpieza del circuito de agua fría, intercambiador
- Limpieza del molde de extrusión

- Calibración de molde de extrusión

Estas actividades son importantes para garantizar la operación de la máquina extrusora, sin embargo, en el cañón y husillo únicamente se realizan las siguientes tareas de mantenimiento programado:

- Verificación de punta de acople del husillo impulsor
- Limpieza mecánica del husillo impulsor
- Limpieza mecánica del interior del cañón
- Inspección visual del husillo

La inspección visual que se realiza tiene como finalidad verificar la ausencia de fisuras o daños significativos a criterio del gestor de mantenimiento.

Este proceso se realiza cada tres meses, de acuerdo al plan de mantenimiento preventivo de la máquina extrusora. El fabricante no hace referencia de esta frecuencia, pero la experiencia de los responsables del mantenimiento del área ha definido que esta frecuencia garantiza un proceso relativamente estable. En caso de no realizarlo se producen paros inesperados con tiempos cortos, pero que generan un incremento en la merma generada,

3.2. Recomendaciones del fabricante relativas al mantenimiento

El fabricante centra sus recomendaciones en la funcionalidad de la máquina, indicando actividades básicas de limpieza y de rutinas de inspección, tales como:

- Limpieza periódica de los rodillos
- Limpieza periódica del sistema nip roll
- Limpieza periódica del sistema de rotación del soplador del molde
- Limpieza periódica del sistema de enfriamiento-intercambiador
- Verificación del consumo de corriente del motor principal
- Verificación de consumo de corriente del motor del nip roll
- Verificación de la ausencia de fugas de aceite
- Verificación del estado de las fajas
- Verificación de los niveles de aceite de los diversos dispositivos
- Verificación de los controles de temperatura-resistencia
- Verificación del funcionamiento de los blower del cañón

Para el caso de cañón y husillo de empuje, el fabricante se limita a indicar que es necesario realizar limpiezas periódicas y verificación visual de la ausencia de daños.

La frecuencia de revisión queda a criterio del gestor de mantenimiento, toda vez que están en función de las horas de uso del equipo. Se hace referencia que, si se observa una disminución considerable en los resultados de producción obtenidos, es necesario evaluar el cambio del cañón y husillo de empuje.

3.3. Monitoreo de condiciones variables de investigación

En esta sección se muestran los resultados de la investigación documental y de campo realizada para esta investigación, se presentan los datos históricos de producción y las mediciones realizadas a través de ultrasonido.

Se recopiló información de los reportes de producción para realizar un análisis de la variable kilos producidos del equipo bajo estudio.

Tabla II. **Tabla datos históricos de producción**

Año	Mes	Día	Kg	Kg/hr	Nominal
2017	9	1	3,475	174	200
2017	9	2	2,800	140	200
2017	9	4	3,650	183	200
2017	9	5	3,875	194	200
2017	9	6	3,750	188	200
2017	9	7	3,925	196	200
2017	9	8	4,150	208	200
2017	9	9	4,125	206	200
2017	9	10	3,800	190	200
2017	9	11	3,925	196	200
2017	9	12	3,650	183	200
2017	9	13	3,525	176	200
2017	9	14	3,500	175	200
2017	9	15	3,275	164	200
2017	9	16	3,325	166	200
2017	9	17	3,750	188	200
2017	9	18	3,700	185	200
2017	9	19	4,125	206	200
2017	9	20	4,000	200	200
2017	9	21	3,925	196	200
2017	9	22	4,325	216	200
2017	9	23	3,925	196	200
2017	9	24	3,200	160	200
2017	9	25	2,650	133	200
2017	9	27	4,100	205	200
2017	9	28	3,925	196	200
2017	9	29	3,875	194	200
2017	9	30	4,000	200	200
2017	10	1	4,075.00	204	200
2017	10	2	4,250.00	213	200
2017	10	3	4,075.00	204	200

2017	10	4	2,875.00	144	200
2017	10	5	3,875.00	194	200
2017	10	6	3,925.00	196	200
2017	10	7	3,200.00	160	200
2017	10	8	3,550.00	178	200
2017	10	9	3,175.00	159	200
2017	10	10	3,275.00	164	200
2017	10	11	3,750.00	188	200
2017	10	12	3,450.00	173	200
2017	10	13	2,525.00	126	200
2017	10	14	3,575.00	179	200
2017	10	15	4,150.00	208	200
2017	10	16	2,825.00	141	200
2017	10	17	3,725.00	186	200
2017	10	18	3,550.00	178	200
2017	10	19	3,375.00	169	200
2017	10	20	3,375.00	169	200
2017	10	22	2,900.00	145	200
2017	10	24	2,900.00	145	200
2017	10	25	2,500.00	125	200
2017	10	26	2,475.00	124	200
2017	10	29	2,425.00	121	200
2017	11	1	4,075.00	204	200
2017	11	2	4,250.00	213	200
2017	11	3	4,075.00	204	200
2017	11	4	2,875.00	144	200
2017	11	5	3,875.00	194	200
2017	11	6	3,925.00	196	200
2017	11	7	3,200.00	160	200
2017	11	8	3,550.00	178	200
2017	11	9	3,175.00	159	200
2017	11	10	3,275.00	164	200
2017	12	15	2,825.00	141	200
2017	12	17	4,600.00	230	200
2017	12	18	2,900.00	145	200
2017	12	19	2,875.00	144	200
2017	12	20	2,850.00	143	200
2017	12	21	2,750.00	138	200
2017	12	22	2,725.00	136	200

2017	12	26	2,475.00	124	200
2017	12	27	3,125.00	156	200
2017	12	28	3,100.00	155	200
2017	12	29	3,050.00	153	200
2017	12	30	3,075.00	154	200
2018	1	2	2,725.00	136	200
2018	1	3	3,100.00	155	200
2018	1	4	3,025.00	151	200
2018	1	5	3,025.00	151	200
2018	1	6	3,050.00	153	200
2018	1	8	3,050.00	153	200
2018	1	9	2,850.00	143	200
2018	1	10	3,350.00	168	200
2018	1	11	3,325.00	166	200
2018	1	12	3,300.00	165	200
2018	1	13	3,275.00	164	200
2018	1	14	2,850.00	143	200
2018	1	15	3,000.00	150	200
2018	1	16	2,550.00	128	200
2018	1	17	2,800.00	140	200
2018	1	18	3,000.00	150	200
2018	1	19	2,700.00	135	200
2018	1	21	2,700.00	135	200
2018	1	22	3,025.00	151	200
2018	1	23	3,075.00	154	200
2018	1	24	3,025.00	151	200
2018	1	25	2,900.00	145	200
2018	1	26	2,650.00	133	200
2018	1	27	2,475.00	124	200
2018	1	28	2,550.00	128	200
2018	1	29	2,400.00	120	200
2018	1	30	2,500.00	125	200
2018	1	31	2,500.00	125	200
2018	2	8	2,675.00	134	200
2018	2	9	2,900.00	145	200
2018	2	10	2,525.00	126	200
2018	2	11	3,075.00	154	200
2018	2	12	3,125.00	156	200
2018	2	13	2,800.00	140	200

2018	2	20	3,650.00	183	200
2018	2	21	2,875.00	144	200
2018	2	22	3,475.00	174	200
2018	2	23	3,500.00	175	200
2018	2	24	2,600.00	130	200
2018	2	27	3,400.00	170	200
2018	2	28	3,150.00	158	200
2018	3	1	3,250.00	163	200
2018	3	2	3,075.00	154	200
2018	3	3	3,350.00	168	200
2018	3	6	2,500.00	125	200
2018	3	7	3,025.00	151	200
2018	3	8	3,125.00	156	200
2018	3	9	3,275.00	164	200
2018	3	10	3,425.00	171	200
2018	3	11	3,375.00	169	200
2018	3	12	3,325.00	166	200
2018	3	13	3,025.00	151	200
2018	3	15	2,725.00	136	200
2018	3	16	2,700.00	135	200
2018	3	17	3,050.00	153	200
2018	3	18	3,200.00	160	200
2018	3	20	2,425.00	121	200
2018	3	21	2,900.00	145	200
2018	3	22	2,775.00	139	200
2018	3	23	2,800.00	140	200
2018	3	26	2,650.00	133	200
2018	3	27	3,475.00	174	200
2018	3	28	2,925.00	146	200
2018	3	29	2,550.00	128	200
2018	3	30	2,750.00	138	200
2018	3	31	3,375.00	169	200
2018	4	2	2,900.00	145	200
2018	4	3	3,225.00	161	200
2018	4	12	3,375.00	169	200
2018	4	13	3,200.00	160	200
2018	4	14	3,000.00	150	200
2018	4	16	3,025.00	151	200
2018	4	17	3,600.00	180	200

2018	4	18	3,200.00	160	200
2018	4	19	3,325.00	166	200
2018	4	20	3,000.00	150	200
2018	4	22	2,900.00	145	200
2018	4	23	3,250.00	163	200
2018	4	24	2,925.00	146	200
2018	4	25	2,725.00	136	200
2018	4	26	3,025.00	151	200
2018	4	27	3,025.00	151	200
2018	4	28	3,225.00	161	200
2018	4	29	2,550.00	128	200
2018	5	1	3,125.00	156	200
2018	5	2	3,175.00	159	200
2018	5	3	2,875.00	144	200
2018	5	4	2,425.00	121	200
2018	5	5	2,975.00	149	200
2018	5	6	3,100.00	155	200
2018	5	7	3,300.00	165	200
2018	5	8	3,025.00	151	200
2018	5	11	3,075.00	154	200
2018	5	12	2,950.00	148	200
2018	5	13	2,750.00	138	200
2018	5	14	3,050.00	153	200
2018	5	15	2,700.00	135	200
2018	5	16	2,500.00	125	200
2018	5	18	3,300.00	165	200
2018	5	19	3,275.00	164	200
2018	5	20	2,925.00	146	200
2018	5	21	3,275.00	164	200
2018	5	23	2,875.00	144	200
2018	5	24	2,825.00	141	200
2018	5	25	2,575.00	129	200
2018	5	26	3,100.00	155	200
2018	5	28	2,425.00	121	200
2018	5	29	2,725.00	136	200
2018	6	2	3,100.00	155	200
2018	6	3	2,675.00	134	200
2018	6	4	2,925.00	146	200
2018	6	5	3,075.00	154	200

2018	6	6	3,400.00	170	200
2018	6	7	3,550.00	178	200
2018	6	11	3,125.00	156	200
2018	6	12	3,000.00	150	200
2018	7	1	2,650.00	133	200
2018	7	8	2,825.00	141	200
2018	7	9	2,475.00	124	200
2018	7	13	2,525.00	126	200
2018	7	14	3,000.00	150	200
2018	7	15	2,875.00	144	200
2018	7	16	2,600.00	130	200
2018	7	17	2,800.00	140	200
2018	7	19	2,925.00	146	200
2018	7	20	2,800.00	140	200
2018	7	21	2,850.00	143	200
2018	7	23	2,500.00	125	200
2018	7	24	4,050.00	203	200
2018	7	25	2,125.00	106	200
2018	7	26	2,300.00	115	200
2018	7	27	2,225.00	111	200
2018	7	29	2,600.00	130	200
2018	7	30	2,275.00	114	200
2018	8	2	2,725.00	136	200
2018	8	3	3,100.00	155	200
2018	8	4	3,025.00	151	200
2018	8	5	3,025.00	151	200
2018	8	6	3,050.00	153	200
2018	8	8	3,050.00	153	200
2018	8	9	2,850.00	143	200
2018	8	10	3,350.00	168	200
2018	8	11	3,325.00	166	200
2018	8	12	3,300.00	165	200
2018	8	13	3,275.00	164	200
2018	8	14	2,850.00	143	200
2018	8	15	3,000.00	150	200
2018	8	16	2,550.00	128	200
2018	8	17	2,800.00	140	200
2018	8	18	3,000.00	150	200
2018	8	19	2,700.00	135	200

2018	8	21	2,700.00	135	200
2018	8	22	3,025.00	151	200
2018	8	23	3,075.00	154	200
2018	8	24	3,025.00	151	200
2018	8	25	2,900.00	145	200
2018	8	26	2,650.00	133	200
2018	8	27	2,475.00	124	200
2018	8	28	2,550.00	128	200
2018	8	29	2,400.00	120	200
2018	8	30	2,500.00	125	200
2018	8	31	2,500.00	125	200
2018	9	1	3,125.00	156	200
2018	9	2	3,175.00	159	200
2018	9	3	2,875.00	144	200
2018	9	4	2,425.00	121	200
2018	9	5	2,975.00	149	200
2018	9	6	3,100.00	155	200
2018	9	7	3,300.00	165	200
2018	9	8	3,025.00	151	200
2018	9	11	3,075.00	154	200
2018	9	12	2,950.00	148	200
2018	9	13	2,750.00	138	200
2018	9	14	3,050.00	153	200
2018	9	15	2,700.00	135	200
2018	9	16	2,500.00	125	200
2018	9	18	3,300.00	165	200
2018	9	19	3,275.00	164	200
2018	9	20	2,925.00	146	200
2018	9	21	3,275.00	164	200
2018	9	22	2,300.00	115	200
2018	9	23	2,875.00	144	200
2018	9	24	2,825.00	141	200
2018	9	25	2,575.00	129	200
2018	9	26	3,100.00	155	200
2018	9	28	2,425.00	121	200
2018	9	29	2,725.00	136	200

Fuente: elaboración propia.

Se tiene el registro de la cantidad de kilos producidos en un día. Para obtener una producción por hora promedio, este valor se dividió entre 20 horas, toda vez que durante el proceso de producción se realicen cambios de filtros, limpieza de cuchillas, entre otras actividades, lo cual implica 4 horas durante el día. También se tiene la última columna con el valor nominal de producción, es decir, el valor en kilos por hora que debe de producir el equipo, según lo indica el fabricante.

Además, se tabuló la información de la variable diámetro medida a través del uso de la técnica de ultrasonido. Posteriormente, se podrá analizar y generar una tendencia de las variables en control. Para el investigador fue de gran utilidad revisar las características y comportamiento de las variables en el pasado, para definir su proyección en el futuro.

Para el caso de las mediciones del diámetro y cañón de la máquina extrusora se muestran las tres mediciones realizadas; además se tiene como punto inicial las dimensiones específicas del fabricante para un equipo nuevo. Se tiene como referencia para el diámetro interno del cañón un valor de 70 milímetros. De acuerdo al fabricante la holgura debía ser hasta un equivalente al 0.1% del diámetro interno del cañón.

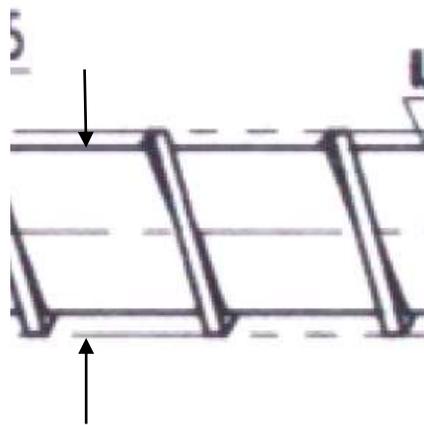
$$\begin{aligned} \text{Holgura} &= (0.1 \times 70) / 100 \\ &= 0.07 \text{ mm} \end{aligned}$$

Para este caso de estudio la holgura representa el espacio libre entre la parte alta del husillo y la parte interna del cañón; en consecuencia, el diámetro externo del tornillo se pudo obtener sustrayendo dos veces la holgura al valor nominal del diámetro.

De esta manera, se definió que el diámetro externo del tornillo equivale a 69.86 milímetros, de acuerdo a las indicaciones del fabricante. Estos dos valores fueron la referencia para las mediciones que se realizaron a través de ultrasonido.

Se muestra en la figura 12 un esquema de la distancia tomada con la medición, esto derivado de la complejidad de la forma del husillo para realizar la medición.

Figura 12. **Esquema de medición del husillo**



Fuente: elaboración propia.

Estas mediciones se realizaron específicamente en la sección del cañón definida como zona de transición. La razón para tomar en cuenta esta posición es derivado a que en esa área se produce la mayor concentración de desgaste y en este punto específico se tiene instalado un sensor de presión, que es un parámetro de control de la operación de la máquina extrusora.

Tabla III. **Diámetro interno en mm del cañón medido por ultrasonido**

	D int0	Dint1	D int2	D int3
Cañón	70	70.42	70.7	70.98

Fuente: elaboración propia.

En la tabla anterior se muestran las tres mediciones efectuadas a través del equipo de ultrasonido, y se agrega el valor inicial, es decir; cuando el equipo está nuevo.

Tabla IV. **Medida externa en mm del husillo por ultrasonido**

	D ext0	D ext1	D ext2	D ext3
Tornillo	69.75	61.56	59.21	56.86

Fuente: elaboración propia.

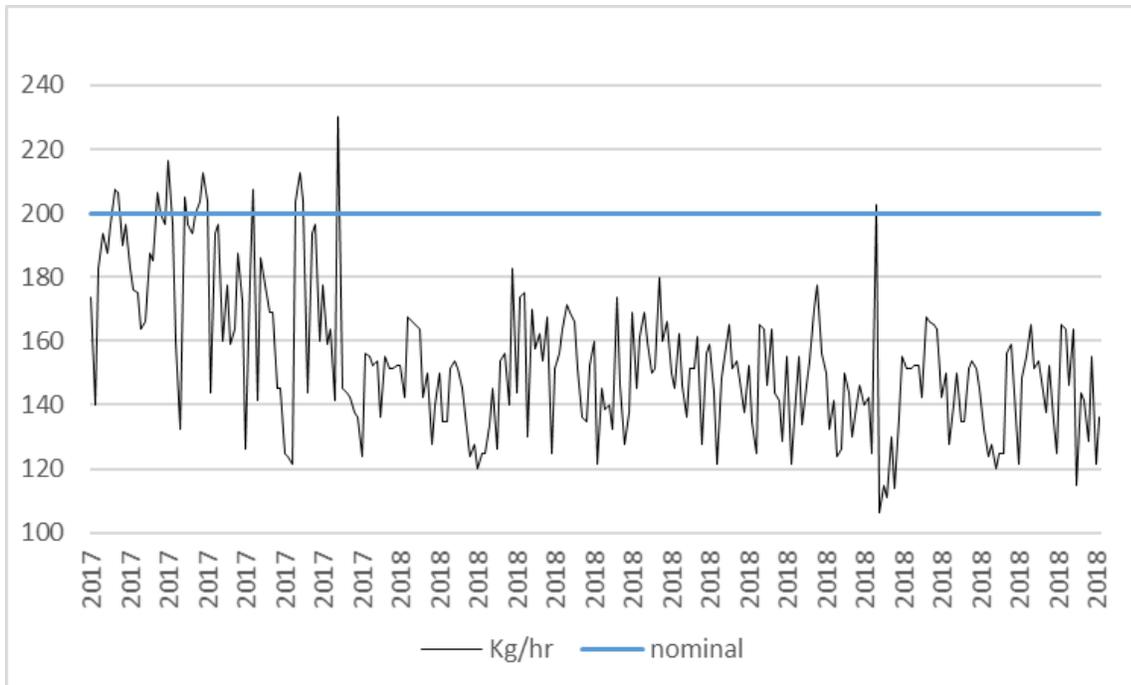
En la tabla anterior se muestran las dimensiones obtenidas a través del ultrasonido en la sección del tornillo denominada sección de transición. Se agrega el punto inicial “D ext0”, a manera de referencia. Este valor es el equivalente al diámetro de la base del eje del tornillo más una altura del filete, esto se obtuvo a través del equipo de ultrasonido por la forma compleja del tornillo.

3.4. Análisis gráfico

A través del gráfico, se obtuvo una perspectiva general de los datos obtenidos, con lo que se puede observar disminución de la producción en la

media que avanza el tiempo. Se tiene en la gráfica un año, empezando en septiembre 2017 y finalizando en septiembre 2018.

Figura 13. **Gráfica de producción**



Fuente: elaboración propia.

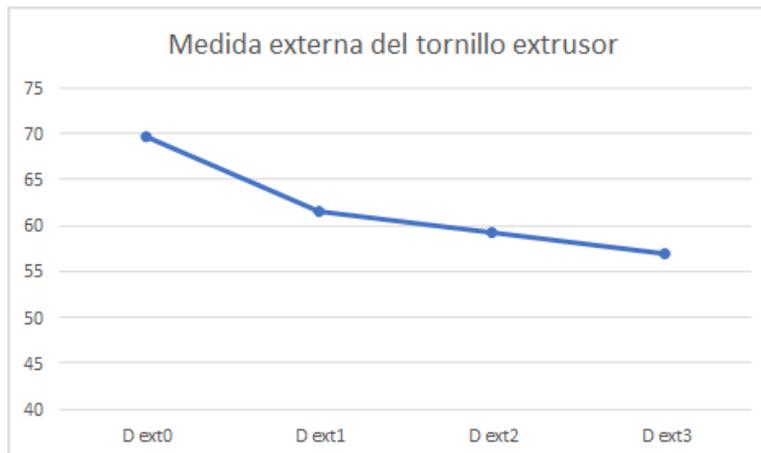
Se muestran las gráficas con las mediciones a través del ultrasonido, en el diámetro interior del cañón y en la medición externa del husillo. Para el investigador y el personal dueño del proceso será de ayuda disponer de la información presentada de esta forma, porque podrán analizar la relación de todas las variables, por ejemplo: rendimiento del equipo y desgaste de los componentes, lo cual permitirá definir oportunamente el cambio de los activos bajo análisis, de tal forma que se obtenga el mayor rendimiento de los equipos.

Figura 14. **Diámetro interno del cañón**



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Medida externa del husillo**



Fuente: elaboración propia.

3.5. Modelo de gestión de mantenimiento predictivo para máquina extrusora

De acuerdo a lo observado a través de la investigación en el manual del fabricante del equipo y de las actividades desarrolladas por los responsables

del mantenimiento de este activo, se considera adecuado lo realizado de manera preventiva programada.

Sin embargo, en función de la sistematización y de la mejora continua, un modelo de gestión de mantenimiento adecuado, implica dar un salto cualitativo en esa gestión; implementando actividades de monitoreo de condiciones y de inspecciones, a través del ultrasonido. Principalmente para el cañón y husillo de empuje.

Al tomar como referencia los lineamientos de la norma ISO 17359 relativa al monitoreo de condiciones y las técnicas de mantenimiento predictivo, se pueden obtener resultados satisfactorios en la gestión de mantenimiento en la máquina extrusora bajo análisis; y posteriormente implementar estas mejoras a los equipos de similares condiciones operacionales.

Con la implementación del monitoreo de las dimensiones del cañón y husillo de empuje obtenidos a través de la inspección por ultrasonido, se puede llegar a tener una tendencia del desgaste en función del tiempo, propio del trabajo mecánico desarrollado por estos dispositivos.

Estas inspecciones se pueden realizar trimestralmente en complemento a lo establecido en el mantenimiento preventivo programado para no incurrir en paros adicionales de la máquina extrusora.

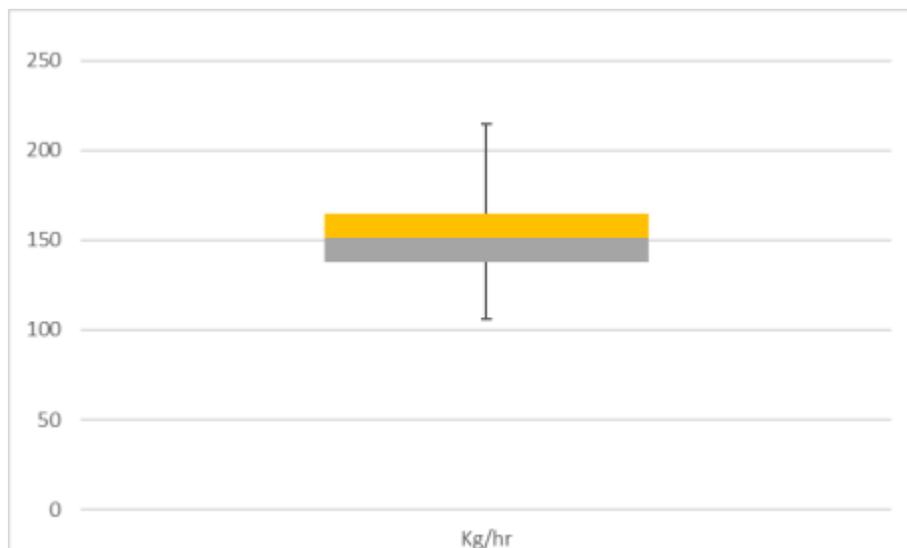
También se pueden implementar otras técnicas de mantenimiento predictivo y monitoreo de condiciones de otros dispositivos de criticidad relevante. Para generar tendencias que permitan anticiparse a una falla catastrófica de la máquina extrusora.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Luego de obtener los datos de producción durante un año, se puede observar en la gráfica que la variable Kg/hr de producción, los valores presentan una distribución simétrica y la variable tiene relativamente poca dispersión, es decir; sus valores se comportan de forma homogénea a lo largo del período de medición.

El 75% del tiempo del período analizado, se observó la tendencia a obtener producción en valores muy bajos, y con un leve sesgo hacia la derecha, es decir, a seguir hacia la baja en los rendimientos de producción. Esto es contrario a lo que se tiene como objetivo en todas las industrias, como indica Estupiñan y Saavedra en 2004, aumentar “la productividad” del equipo bajo análisis.

Figura 16. **Caja y bigotes de producción**



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se muestran gráficas para analizar la producción por períodos, de tal forma que, se obtuvieron cuatro graficas más. La primera gráfica contiene los valores tabulados hasta antes de realizarse la primera medición por ultrasonido. La medición por ultrasonido, se realizó en el paro programada que se tenía previsto para realizar el mantenimiento planificado correspondiente.

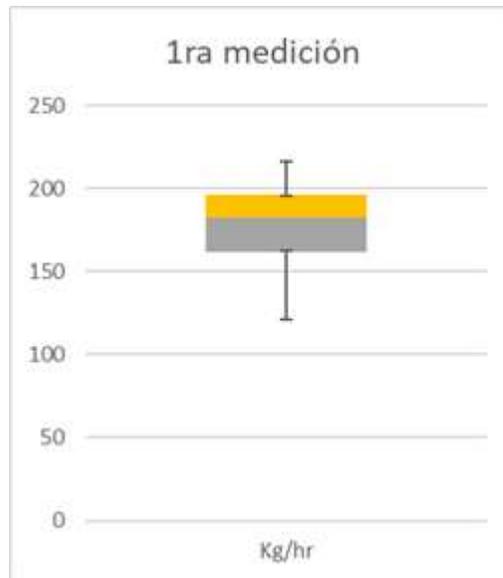
La segunda gráfica contiene los valores que van desde el momento en que se reinicia la producción, después del primer paro del mantenimiento planificado, hasta el paro del segundo mantenimiento planificado; en ese momento se realizó la segunda medición por ultrasonido.

La tercera gráfica representa a los valores obtenidos de la producción que van desde el segundo mantenimiento planificado, hasta el tercer mantenimiento planificado, además coincide con la medición por ultrasonido realizada.

La gráfica final muestra los valores que se obtuvieron con el monitoreo de condiciones de la variable producción posterior a la tercera medición por ultrasonido desarrollada.

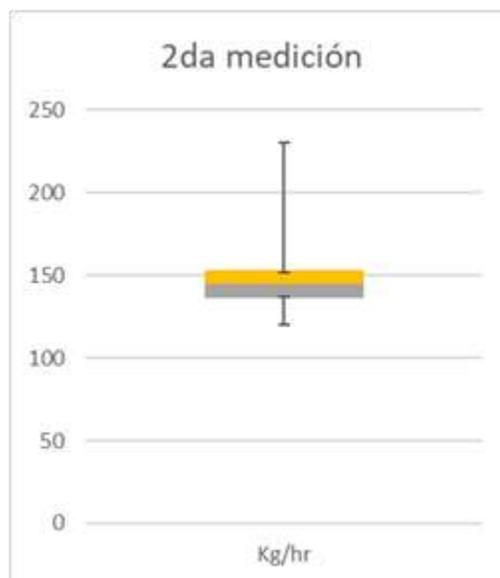
El período de análisis fue de aproximadamente un año, tiempo durante el cual se realizó el monitoreo de condiciones de la variable producción. Los ensayos de ultrasonido se realizaron en las fechas de los mantenimientos planificados, para no generar paros de producción adicionales.

Figura 17. **Valores antes de la 1ra medición**



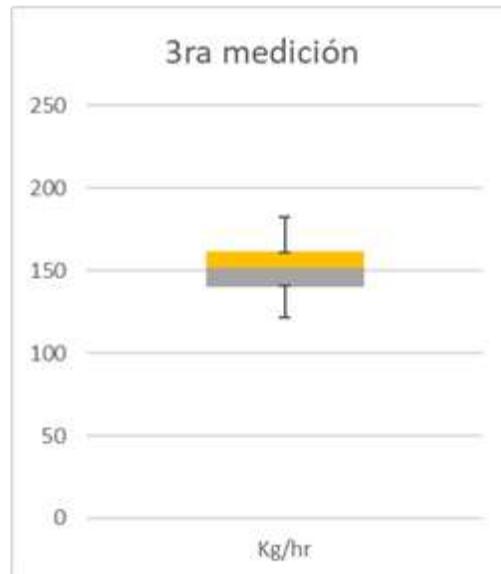
Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Valores antes de la 2da medición**



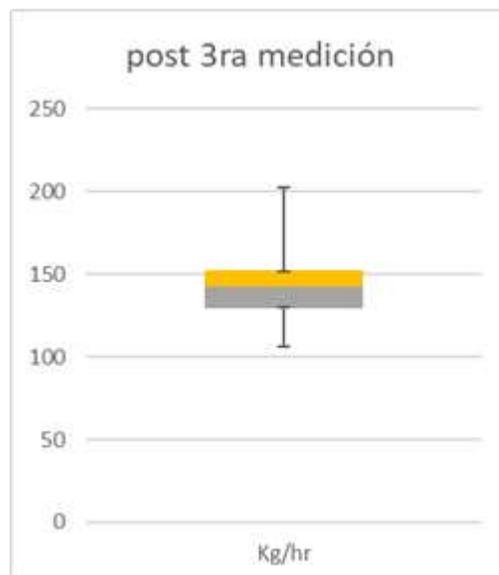
Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Valores antes de la 3ra medición**



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Valores posteriores a la 3ra medición**



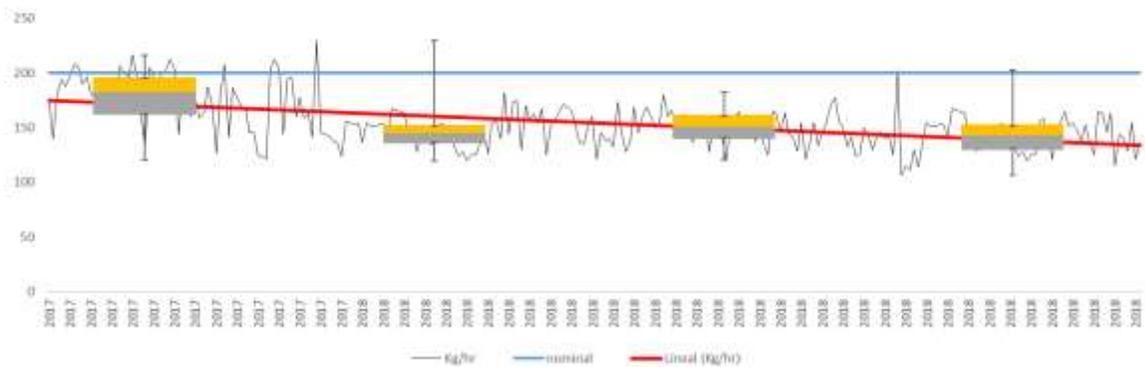
Fuente: elaboración propia.

Luego de la primera medición, las gráficas de cajas y bigotes muestran una forma leptocúrtica, manteniendo sus valores homogéneos; sin embargo, en cada período la mediana disminuye de valor respecto del período anterior. Mostrando como consecuencia una tendencia a obtener valores inferiores de producción en la maquina extrusora.

En la gráfica de la figura 20, se observa una sobreposición de cajas y bigotes con las líneas de producción en kg/hr, se muestra la gráfica de tendencia de estos puntos, con lo que se verifica que la tendencia hacia la baja, está directamente ligado la reducción del diámetro del tornillo, es decir, al desgaste físico que se genera en estos componentes propios del uso.

Es necesario indicar que, para obtener resultados confiables en las mediciones, como indica Cárdenas en el 2007, “calibrar correctamente” el quipo de ultrasonido es fundamental, sobre todo si esto conlleva a una toma de decisión que represente un costo de inversión de recambio de los dispositivos relativamente alto.

Figura 21. **Tendencia de producción**



Fuente: elaboración propia.

Con los datos históricos de la producción se genera la línea de tendencia, que tiene la siguiente fórmula:

$$y = -0.1558x + 174.82$$

Al observar la pendiente negativa de la recta, se define matemáticamente una tendencia a la baja de la producción diaria de la máquina extrusora. Aún cuando se tiene una dispersión de los valores alrededor de la línea de tendencia.

Revertir esta tendencia o minimizar el impacto en los indicadores de productividad es labor del gestor de mantenimiento, aspectos que se pueden lograr complementando las actividades programadas de mantenimiento preventivo con el monitoreo de condiciones críticas del equipo y “potenciando el mantenimiento predictivo” (Ballester, Olmeda, Macián y Tornos. 2002).

CONCLUSIONES

1. Se diseñó un modelo de gestión de mantenimiento para la máquina extrusora, donde se complementan todas las actividades preventivas con el monitoreo de condiciones de acuerdo a los lineamientos de ISO 17359 y las actividades predictivas, a través de las técnicas de ultrasonido, específicamente para el cañón y husillo de empuje.
2. A través de la inspección de campo, se definieron los procedimientos adecuados para el mantenimiento preventivo planificado en la gestión de mantenimiento de los equipos de extrusión, los cuales se enfocan en mantener operativo el equipo en forma general.
3. Por medio de la revisión documental, se determinó que el fabricante de la maquinaria únicamente define actividades de inspección y limpieza para los dispositivos bajo análisis. Esto permite implementar monitoreo de condiciones como una mejora a la gestión de mantenimiento, específicamente para el cañón y husillo de empuje.
4. Se consideró que el cañón y husillo de empuje son dispositivos ligados directamente al rendimiento de producción del equipo de extrusión, la implementación de monitoreo de condiciones, de acuerdo a los lineamientos de ISO 17359, permitirá generar una tendencia del desgaste de los dispositivos bajo análisis, y como consecuencia ser útil para la toma de decisiones en la gestión de mantenimiento.

5. Aun cuando se tiene una línea de tendencia hacia la baja, los valores presentan una relativa dispersión alrededor de esta línea; sin embargo, estas causas no son producto del análisis de esta investigación.

RECOMENDACIONES

1. La implementación del monitoreo de condiciones como complemento a las actividades de mantenimiento preventivo programado puede también desarrollarse en otras variables, tales como: temperaturas de motor, temperatura de cajas reductoras, análisis de aceite, consumo de corriente de los motores, entre otros. Posteriormente se pueden trasladar el plan de mantenimiento de similares condiciones de operación.
2. Para obtener mejores resultados en la gestión de mantenimiento es necesario complementar al mantenimiento básico desarrollado, con actividades de mantenimiento predictivo a los dispositivos que se definan como críticos.
3. Se sugiere realizar una investigación de tipo longitudinal para establecer una tendencia adecuada que permita predecir el punto económicamente viable, donde se hace necesario realizar un cambio del cañón y husillo de empuje.
4. Realizar un estudio de investigación de las causas del bajo rendimiento de producción, toda vez que se tiene valores dispersos, es probable que se tenga otras causas que no favorezcan alcanzar los resultados esperados en la producción del equipo bajo análisis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Asociación Española de Ensayos no Destructivos. *Ensayos no destructivos de ultrasonidos nivel II*. (2009).
2. Aladesaye, M. (2008) *Application of predictive maintenance to industry including cepstrum analysis of a gearbox*. Tesis Doctoral. Massey University Auckland, New Zealand.
3. Altman, C. (2005). *El análisis de aceite como herramienta del mantenimiento proactivo de flotas de maquinaria pesada. Gestión de activos y confiabilidad*. I Congreso de Mantenimiento, Montevideo, Uruguay.
4. Amendola, L. (2013). *Gestión integral de mantenimiento de activos como estrategia de negocios. Mantenimiento, ingeniería industrial y de edificios*. Págs. 12-16
5. Balageas, D. (2007). *Termografía infrarroja: una técnica multifacética para la evaluación no destructiva (END)*. IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Argentina.
6. Ballester, S; Olmeda, P; Macían, V; Tornos, B. (2002). *El mantenimiento de las flotas de transporte*. Revista Técnica Industrial. Valencia, España. Pág. 47.

7. Cantor, K. (2006). *Blow film extrusion*. Munich, Germany: Carl Hanser Verlag.
8. Cárcel, J. (2014). *La gestión del conocimiento en la ingeniería del mantenimiento industrial*. DOI: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.197>.
9. Cárdenas, M. (2007). *Análisis comparativo de evaluación de defectos en ductos entre estudios realizados con equipos instrumentados inteligentes de segunda y tercera generación*. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, México.
10. Ccolín, C.; Viliesid, M. (2010). *Consideraciones en la estimación de incertidumbre en la calibración y medición con medidor de espesores por ultrasonido*. Simposio de Metrología en CENAM, Querétaro, México.
11. Delgado, O.; Medina, J. (2005). *Extrusión de perfiles espumados de madera plástica*. Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Págs. 58-63
12. Estupiñan, P.; Saavedra, P. (2004). Alcances de la implementación de las nuevas técnicas de análisis en los programas de mantenimiento predictivo-proactivo en la industria. *Revista de Ingeniería de la Universidad de Tarapacá Chile*.
13. García, S. (2003). *Organización y gestión integral del mantenimiento*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.

14. Giles, H. (2005). *Extrusion: the definitive processing guide and handbook*. United States of America: William Andrew, Inc.
15. Gómez, J.; Gutiérrez, J. (2007). *Diseño de una extrusora para plástico*. Tesis de Tecnólogo en Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.
16. Hernández, R.; et al. (1997). *Metodología de la investigación*. Colombia: McGraw-Hill.
17. Huacuz, H. (2003). *Determinación óptima de la frecuencia de mantenimiento preventivo. Confiabilidad y mantenimiento*. Primer Seminario Mexicano de Confiabilidad y Mantenimiento. México.
18. International Standard ISO 17359. (2003). *Condition monitoring and diagnostics of machines-General guidelines*. Switzerland.
19. Jiménez, G; et al. (1993). *Simulación de un proceso de extrusión de polietileno de alta densidad*. Tesis de la Facultad de Ingeniería, Instituto Politécnico Nacional, México.
20. Maldonado, M.; Medina, C. (2008). *Diseño y construcción de una extrusora con capacidad de 1 Kg/h, diseño de proceso y diseño del producto para el reciclaje mecánico del PET*. Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica del Ejército, Salgoquí, Ecuador.
21. Muñoz, C. (2011). *Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis*. México: Pearson.

22. Olarte, W.; Botero, M.; Cañón, B. (2010). *Técnicas de mantenimiento predictivo usadas en la industria. Scientia et Technica*. Págs. 223-226.
23. Olarte, W.; Botero, M. (2011). *La detección de ultrasonido: una técnica empleada en el mantenimiento predictivo*. Scientia et Technica. Págs. 230-233.
24. Parra, E. (2009). Arquímedes: su vida, obras y aportes a la matemática moderna. *Revista digital de matemática, educación e internet*. [en línea] <http://www.Cidse.itcr.ac.cr/revistamate/>. [Consulta: 2018].
25. Pérez, R.; Torres, A.; Candal, M. (2013). Efectos de las variables del proceso de extrusión sobre la relación estructura-propiedades de películas tubulares de PEBD. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, P. 257-274.
26. Puertas, J. (2016). *Gestión estratégica del mantenimiento de clase mundial*. Seminario llevado a cabo en Cámara de Industria de Guatemala, Guatemala.
27. Quesada, G. (2006). *Modelo para análisis de la confiabilidad y disponibilidad en plantas de procesamiento de petróleo*. Tesis de Maestría, Universidad del Zulia, Venezuela.
28. Rodríguez, E.; Miguel, A.; Sánchez, M. (2001). *Gestión de mantenimiento para equipos médicos*. II Congreso Latinoamericano de Bioingeniería, La Habana, Cuba.

29. Sánchez, J. (2012). *Estudio del ensayo no destructivo ultrasónico aplicado a líneas de tuberías submarinas en mantenimiento*. Tesis de Maestría, Universidad Libre, Colombia.
30. Santos, E.; *et al.* (2005). El ultrasonido y sus aplicaciones. *Revista Industrial Data*, Revista de Investigación, Págs. 25-28
31. Tabares, L. (2006). *Administración moderna del mantenimiento*. Brasil: Novo Polo.
32. Valdez, J.; San Martín, E. (2009). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo-predictivo aplicado a los equipos de la empresa Remaplas*. Tesis de pregrado, Universidad de Cartagena, Colombia.
33. Zaldívar, M. (2006). *El mantenimiento técnico: un reto histórico-lógico en el perfeccionamiento de la actividad gerencial*. Tecnología en Marcha. Págs. 24-30

Anexo 2. Certificado de competencias personales



IRAM, Organismo de certificación de personas acreditado por el OAA según norma IRAM-ISO/IEC 17024:2013 (ISO/IEC 17024:2012, IDT) certifica que

CARIÁS, Rudy René

documento de identidad
Pas. 2649057250502

ha dado cumplimiento a los requisitos de la norma
IRAM-NM-ISO 9712:2014 (ISO 9712:2012, IDT)

cuyo alcance es:
Sector: Ensayos previos y durante el servicio, que incluyen los de fabricación.

Método: Ultrasonidos
Nivel: 2
Organismo calificador autorizado: ENDE - CNEA

Nº de certificado: 001/US/2/520

Fecha de otorgamiento: 14/07/2017
Fecha de vencimiento: 14/07/2022

Titular del certificado

Dirección de Certificación

OAA ✓

Organismo
Argentina de
Acreditación

Organismo de Certificación
de Personas
ISO 17024

DC-FI_006 Rev 02

IRAM | Perú 552/5 | C1068AAB | Buenos Aires, República Argentina | certipersonas@iram.org.ar
Este certificado es propiedad de IRAM y debe confirmarse su vigencia y forma de uso autorizada en www.iram.org.ar

Fuente: IRAM, Buenos Aires, Argentina.