



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Análisis y propuestas de solución a falla de varilla
insertadora de carbones en las líneas R6**

Autor(es)

Cristian Camilo Aguirre Márquez

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería
Mecánica

Medellín, Colombia

2020



Análisis y propuestas de solución a falla de varilla insertadora de carbones en las líneas R6

Cristian Camilo Aguirre Márquez

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

INGENIERO MECÁNICO

Asesores (a):

Carlos Andrés Trujillo Suarez, Ingeniero Mecánico

Rubén Sneider Ruiz Pino, Ingeniero Mecánico

Línea de Investigación:

Diseño y mantenimiento

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica

Medellín, Colombia

2020.

CONTENIDO

CONTENIDO.....	2
INDICE DE FIGURAS.....	3
INDICE DE TABLAS.....	4
1. RESUMEN.....	5
2. INTRODUCCIÓN.....	6
3. OBJETIVOS.....	7
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	7
4. EMPRESA Y AREA DE TRABAJO.....	8
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.....	8
4.2 AREA DE TRABAJO.....	8
4.3 FUNCIONES ASIGNADAS.....	8
4.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN LA ESTACIÓN DE CARBONES Y ESTACIÓN TUCK WASHER.....	9
4.4.1 RESUMEN DE PROCESOS.....	9
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
5.1 PROBLEMA # 1.....	11
5.2 PROBLEMA #2.....	15
6. MARCO TEÓRICO.....	17
6.1 ELEMENTOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN GENERAL.....	17
6.2 MODELO DE COLUMNA LARGA CON CARGA CENTRADA.....	18
7. METODOLOGÍA.....	22
8. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	22
8.1 ANTECEDENTES DE PRODUCCIÓN EN LA LÍNEA R6-1, EN JUNIO DEL AÑO 2017.....	22
8.2 ANTECEDENTES DE PRODUCCIÓN LINEAS R6, AÑO 2019.....	25
8.3 CÁLCULO DE LA CARGA CRITICA EN LA VARILLA INSERTADORA DE CARBONES.....	26
8.4 ACTIVIDADES PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA#2.....	27
8.4.1 CONSECUENCIAS DE LA DESALINEACIÓN DE LA VARILLA INSERTADORA DE CARBONES.....	29
9. CONCLUSIONES.....	32
10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	33
11. ANEXOS.....	33

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo de la máquina CRIM, líneas R6	10
Figura 2: Sistema de inserción de carbones actual de las líneas R6.	11
Figura 3: Barra accionadora de agitadores de carbones.....	12
Figura 4: Sensor capacitivo en el tobogán de carbones de las líneas R6.	13
Figura 5: Flexo-pandeo de la varilla insertadora de carbones.....	13
Figura 6: Tornillos con forma de media luna del sistema de mordazas.	14
Figura 7: Desgaste en el diámetro interior de la boquilla de inserción.....	16
Figura 8: Valores de C para diferentes condiciones de los extremos de las columnas.....	19
Figura 9: Plano de la varilla insertadora de carbones líneas R6.	20
Figura 10: Comparativos de: Producción esperada, producción total y baterías no producidas en las semanas del mes de junio del año 2017 para la línea R6-1.....	23
Figura 11: Eficiencia de la producción en la línea R6-1 en las semanas del mes de junio del año 2017.....	23
Figura 12: Distribución de tiempos muertos en la línea R6-1 en el mes de junio del año 2017.....	24
Figura 13: Causas de tiempos muertos en la máquina CRIM-1.....	25
Figura 14: Variación de la eficiencia de la línea de producción R6 en el año 2019.	26
Figura 15: Alojamiento donde se encuentran los bujes soportes de las barras perforadas.	28
Figura 16: Bujes de soporte del sistema de inserción.....	29
Figura 17: Celda con carbón descentrado.....	30
Figura 18: Desalineamiento de los postizos con respecto a la boquilla de inserción.	31

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de C para diferentes configuraciones de extremos de las columnas.	19
Tabla 2: Certificado de calidad suministrado por el proveedor de varillas insertadoras de carbones (Ferro industrial).....	21
Tabla 3: Eficiencias de producción líneas R6.....	25
Tabla 4: Constantes físicas de diferentes materiales.....	26
Tabla 5: Mantenimientos sistemáticos y correctivos en la estación de carbones de las tres líneas de producción.....	27

1. RESUMEN

En la planta de manufactura de pilas de la empresa Tronex S.A.S, se presenta un problema de fractura en las varillas insertadoras de carbones de las líneas de producción R6, este problema está asociado a atranques de celdas en el sistema de transporte y carbones quebrados que bajan de la tolva de alimentación, generando la posterior fractura de la varilla insertadora de carbones.

En principio lo que se hizo fue seguir en orden el cronograma de actividades planteado en la propuesta inicial, logrando identificar el funcionamiento del sistema de inserción de carbones, identificación del material de la varilla insertadora por medio del certificado de calidad solicitado al proveedor de la varilla, revisión de los planes de mantenimiento preventivo que se realizan a la estación de carbones y revisión del sistema de sujeción de mordaza que presenta actualmente la estación de carbones.

Se realizó la programación en ordenes de trabajo de actividades de mantenimiento sistemáticas y correctivas al personal técnico especializado en cada máquina y se planteó la necesidad con el asesor interno de sugerir unas recomendaciones que impliquen una mejora en el funcionamiento del sistema, evitando en lo posible reducir la fractura de la varilla de inserción.

La mejora sugerida consiste en prescindir de la barra accionadora para el suministro de los carbones, ya que esta, la cual esta soportada sobre la mordaza, puede generar un efecto de flexión sobre el eje y se recomienda tener un cilindro o pistón neumático soportado en otra estructura independiente, adicionalmente se debe tener en cuenta la sincronización del mecanismo para que cumpla la función de inserción del carbón como también los sensores solicitados para que dicho sistema opere satisfactoriamente. Se cuestiona en la posibilidad de un sensor que permita identificar grietas en los materiales para adaptarlo al tobogán de alimentación y expulsar los carbones cuando se presentan dichas grietas.

Se realiza también un cálculo teórico de la carga crítica que soporta la varilla de inserción bajo el modelo de pandeo, este cálculo corresponde a una aproximación de dicha carga, ya que la varilla en términos generales presenta diferentes modos de falla. Se realizan en los laboratorios de espectrometría y de resistencia de materiales de la Universidad de Antioquía, ensayos de composición química y de tracción para un solo ejemplar de varilla de inserción, con estos resultados se espera caracterizar de mejor manera el material de la varilla insertadora de carbones sin controvertir los resultados del certificado de calidad suministrado por la empresa proveedora de varillas.

Finalmente se plantea un problema de desalineación en la varilla insertadora de carbones y se plantean diferentes causas del problema, posibles consecuencias y los pasos de solución al problema de desalineación.

2. INTRODUCCIÓN

En este informe se presenta el proceso de práctica realizado en la empresa Tronex S.A.S, la cual es la única empresa en América Latina especializada en la fabricación de pilas zinc-carbón, manejando las referencias R03, R6 y R20. También realiza la distribución y comercialización de productos de alta calidad para consumo masivo, industrial, hogar, entre otras cosas. Actualmente como practicante de ingeniería se apoya a la empresa desde la gestión del mantenimiento de maquinaria industrial, en el análisis de procesos de mantenimiento, programación de actividades de mantenimiento preventivas, ayuda en el registro de tiempos del personal técnico y adquisición de repuestos en el área logística, proveedores o terceros.

Adicional a las actividades asignadas en la empresa, por parte propia se realiza un proyecto de análisis de falla de la varilla insertadora de carbones en la máquina CRIM de las líneas de producción R6.

Se tienen registros del área de producción donde se ha afectado la eficiencia considerablemente debido a la fractura de la varilla insertadora de carbones.

De esta manera se involucran dentro de los objetivos las actividades asignadas como practicante de ingeniería en el área de mantenimiento industrial y otros objetivos para el proyecto del análisis de falla de la varilla insertadora de carbones.

Para este último proyecto, se tiene una propuesta de mejora de la estación mediante la implementación de un sistema neumático en reemplazo del mecanismo de barra que se tiene actualmente, como también rediseñar el sistema de sujeción de mordazas teniendo los tornillos pasantes y no tornillos en media luna como los actuales.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la práctica profesional de Ingeniería Mecánica en la empresa Tronex S.A.S y realizar una propuesta de mejora en el área de mantenimiento, específicamente en la estación de carbones de la máquina CRIM de las líneas de producción R6, con el fin de reducir la cantidad de paros que se presentan en la producción de pilas.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Ayudar al jefe inmediato en coordinar la gestión del mantenimiento industrial: Programación de actividades de mantenimiento, solicitud de repuestos en almacén del área logística, requerimientos de compra según especificaciones de los mecánicos de mantenimiento.
- Supervisar la intervención de los trabajos de mantenimiento, registro y análisis del tiempo de las ordenes de trabajo.
- Hacer una propuesta de mejora en la estación de carbones de las líneas de producción R6, para evitar la cantidad de paros.
- Realizar un cálculo estimado de la carga crítica que soporta la varilla insertadora de carbones, asumiendo un modelo teórico de pandeo.
- Realizar planos con la corrección en las medidas del sistema de mordaza.
- Realizar ensayos en el laboratorio de composición química y de tracción a un ejemplar de varilla insertadora de carbones.

4. EMPRESA Y AREA DE TRABAJO

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

La empresa Tronex S.A.S se encuentra localizada en frente del cementerio Campos de Paz por la avenida 80 en Medellín, Colombia. Esta empresa distribuye marcas propias como Swiss Lite, Mtek, Santa Blanca y otras marcas externas como lo son Gpbatteries, Case Logic, Thule, Alpino, General Electric, Clipper y Supertite. Tronex genera impacto en la comunidad por medio de programas de responsabilidad social empresarial como el programa RECOPILA, que tiene como objetivo principal forjar en los ciudadanos una conciencia que los motive a proteger el medio ambiente, por medio del posconsumo de pilas y baterías. También hace parte del programa LÚMINA, la cual es una política pública para la gestión de los residuos de bombillos, aparatos eléctricos y electrónicos. Adicionalmente apoya a la fundación Mahavir Kmina, la cual se encarga de fabricar y entregar prótesis de piernas totalmente gratuitas para niños y adultos a los cuales les es imposible adquirir estos miembros protésicos.

4.2 AREA DE TRABAJO

Practicante de ingeniería mecánica en el área de mantenimiento industrial de la empresa Tronex S.A.S, encargado de programar el personal para la realización de las ordenes de trabajo de mantenimiento preventivas y correctivas, tratando en buena medida de garantizar la disponibilidad de los equipos, verificar los tiempos de intervención en las actividades de mantenimiento del personal técnico, controlar las compras y el stock de los diferentes repuestos.

4.3 FUNCIONES ASIGNADAS

Colaboración al jefe inmediato con el soporte en la gestión del mantenimiento industrial, aportando algunos conocimientos de ingeniería mecánica para la resolución de problemas, realización de requerimientos de compra según las especificaciones del personal técnico, como, por ejemplo, la compra de materiales para la fabricación en el taller de diferentes repuestos para las máquinas y lograr tener un stock en caso de que algunos repuestos importados se demoren en llegar al país.

Estar pendiente de que el personal técnico diligencie y ejecute las intervenciones de mantenimiento programadas y tener en cuenta las solicitudes de servicio que generen para posteriores mantenimientos en las máquinas.

4.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN LA ESTACIÓN DE CARBONES Y ESTACIÓN TUCK WASHER

La estación de carbones y la estación de tuck washer pertenecen a la máquina CRIM, en esta máquina, por tanto, se le introduce el carbón a la celda, se verifica su buen estado y se ubica el tuck washer. El proceso a grandes rasgos es como se describe a continuación:

- Inicialmente en la primera estación (estación de carbones), ingresan los vasos de zinc con la mezcla, pasando los vasos por un sensor de fondo que detecte el fondo metálico, este sensor se encarga de verificar que el vaso se encuentre en la posición correcta.
- Si los vasos de zinc se encuentran en la posición correcta, la banda transportadora los pasa al proceso de inserción de la barra de carbón y posteriormente hay un chequeador de voltaje, que mide el nivel de tensión de la pila y selecciona o rechaza dependiendo del nivel de tensión, el nivel no puede ser inferior a 1.65 V.
- Si la pila es seleccionada, se le ubica el tuck washer, el cual es un elemento de material plástico que permite el sellado de la pila, anterior a este elemento el sellado era con una arandela final de cartón. Posteriormente la pila continúa su camino hacia el siguiente proceso.

4.4.1 RESUMEN DE PROCESOS

En términos generales el proceso entre la entrada a la estación de carbones y la salida se resumen en estas etapas:

- Entrada.
- Estación de carbones.
- Chequeador (tester).
- Estación de tuck washer.
- Salida.

En el siguiente diagrama de flujo, figura (1) se podrá observar el ciclo de funcionamiento de la máquina CRIM para las líneas de producción R6, y los sensores involucrados en el proceso.

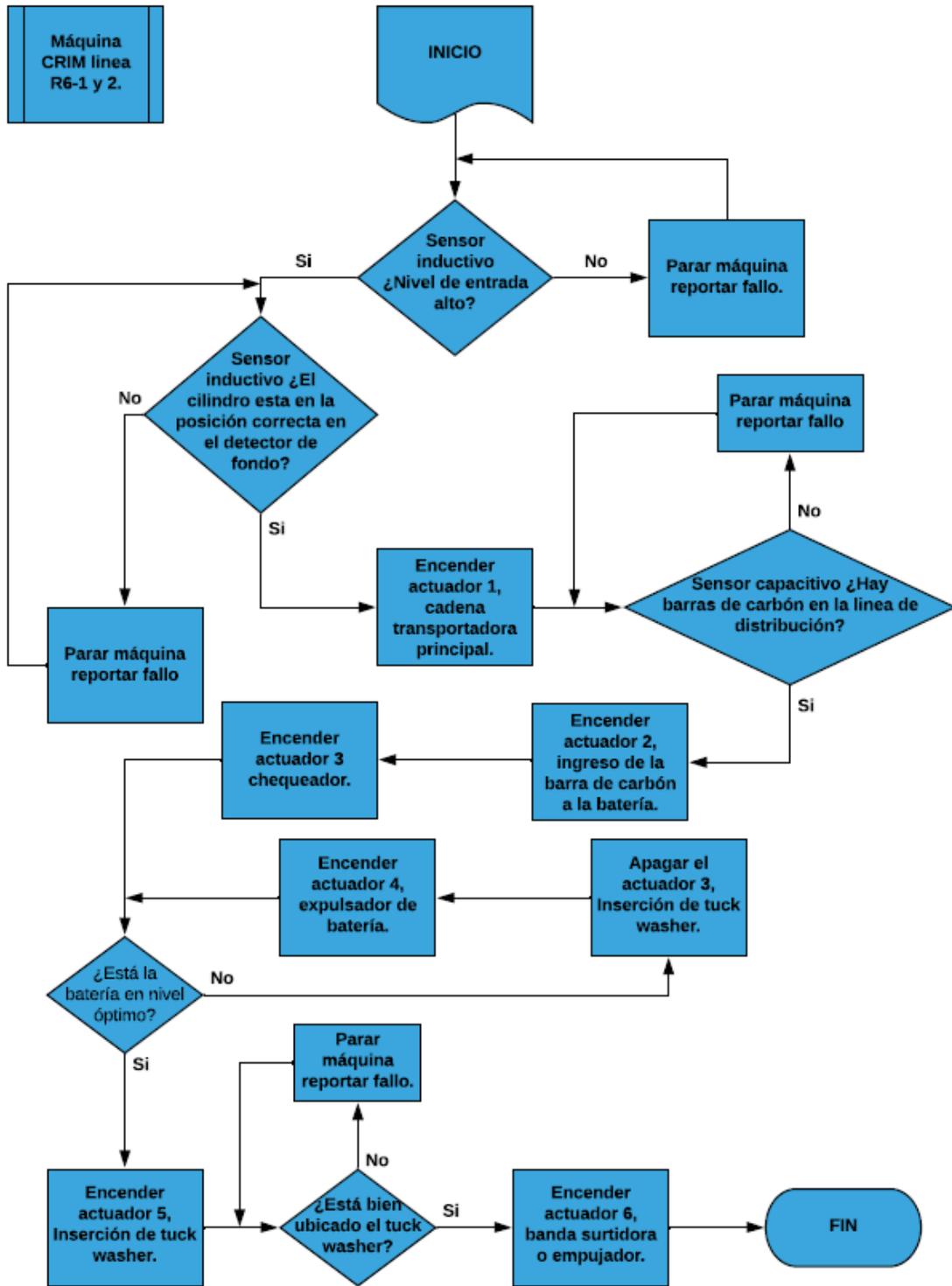


Figura 1: Diagrama de flujo de la máquina CRIM, líneas R6
 Fuente: Imagen suministrada por el área de producción de la empresa Tronex S.A.S.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

5.1 PROBLEMA # 1

En el proceso de reconocimiento de la planta, una de las actividades asignadas fue analizar y observar el proceso de producción con la finalidad de aprender del mismo. Durante el proceso productivo se evidenciaron fallos en la estación de carbones (fractura de la varilla insertadora de carbones), debido principalmente a atranques de celdas y carbones que bajan quebrados de la tolva de alimentación.

En la siguiente figura (2) se observa el sistema de inserción de carbones actual.

En esta figura se observa el tobogán de carbones, la boquilla de inserción de carbones y la banda de transporte de pilas.



**Figura 2: Sistema de inserción de carbones actual de las líneas R6.
Fuente: Fotografía propia.**

El problema se logró detectar por la alta cantidad de fractura de varillas que se presentó en la estación de carbones de la máquina CRIM en las líneas de producción R6, lo cual produce tiempos de paro que se traducen en pérdidas de dinero por producción. Estos atranques pueden ocasionar daños a piezas más importantes, es posible que, por fallo en el sensor de fondo metálico, ingresen celdas con fondo invertido a la línea de transporte y fracturen en consecuencia la varilla insertadora de carbones.

En la siguiente figura (3), se observa la barra que acciona el suministro de los carbones, la cual esta fija por tuercas al sistema de sujeción con mordazas.



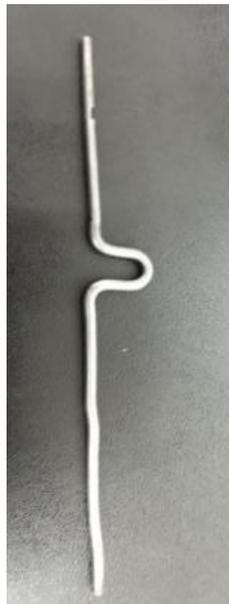
**Figura 3: Barra accionadora de agitadores de carbones.
Fuente: Fotografía propia.**

El sistema actual presenta un sensor capacitivo en el tobogán de carbones en las líneas R6, este sensor cumple con la función de parar la línea en caso tal de no detectar carbón y de iniciar nuevamente la operación de la línea en caso de detectar el carbón, en la siguiente figura (4), se puede observar este sensor, el cual esta fijo por medio de un soporte al tobogán de carbones.



**Figura 4: Sensor capacitivo en el tobogán de carbones de las líneas R6.
Fuente: Fotografía propia.**

El tipo de fallo que presenta la varilla es muy variado, pero comúnmente se presenta el flexo-pandeo, en la siguiente figura (5), se puede observar este tipo de fallo.



**Figura 5: Flexo-pandeo de la varilla insertadora de carbones.
Fuente: Fotografía propia.**

En la siguiente figura (6), se observan los tornillos del sistema de mordazas que presentan un desbaste en forma de media luna, lo cual obviamente genera altos esfuerzos y no garantizan una buena sujeción del sistema.

El diseño inicial del sistema de mordazas presenta estos tornillos con el desbaste en forma de media luna ya que, por razones de espacio en la mordaza, los mecánicos de ese momento tuvieron que realizar el desbaste a los tornillos haciendo a su vez que estos fueran tangentes al diámetro interior de la mordaza.



**Figura 6: Tornillos con forma de media luna del sistema de mordazas.
Fuente: Fotografía propia.**

Como solución al problema se dejan a la empresa una serie de recomendaciones para la mejora del sistema, como son, por ejemplo:

- Reemplazo de la barra que acciona el suministro de carbones por un pistón neumático. Con esta alternativa se disminuye la carga en el eje y con la instalación de un sensor que permita identificar grietas en los carbones se lograría evitar que descendan a la ranura de inserción carbones quebrados.

- El sistema de sujeción por mordaza que se tiene actualmente presenta tornillos que tienen una forma tangencial a la superficie circular interior, por tanto, una recomendación de diseño es tener los tornillos totalmente pasantes para garantizar una mejor sujeción de las dos barras perforadas que conecta este sistema, (Ver anexo 1).
- Adicionalmente se realiza un modelo teórico para el cálculo estimado de la carga crítica que soporta la varilla insertadora de carbones asumiendo condiciones estáticas.
- Es importante el cuidado en el proceso de los operarios de las máquinas, ya que en ocasiones los sensores de la línea pueden fallar y así evitar daños futuros en la máquina.
- Se cumplen en buena medida todas las funciones asignadas en el área de mantenimiento industrial.

5.2 PROBLEMA #2

En un mantenimiento sistemático (preventivo) que se programó a los mecánicos encargados de las líneas R6, en la estación de carbones, estos identificaron al realizar dicho mantenimiento que la varilla de inserción presentaba una desalineación y la boquilla de inserción, un desgaste en su diámetro interior, lo cual puede ocasionar problemas de carbón descentrado.

Por tanto, más adelante se describirán las actividades que se realizaron para lograr solucionar dicho problema.

En la siguiente figura (7), se muestra el desgaste en el diámetro interior de la boquilla insertadora de carbones.



**Figura 7: Desgaste en el diámetro interior de la boquilla de inserción.
Fuente: Fotografía propia.**

Estas actividades de mantenimiento se supervisaron y se documentaron, para tener una base de las actividades realizadas por los mecánicos en la solución del problema presente.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 ELEMENTOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN GENERAL

El análisis y diseño de los elementos sometidos a compresión difiere de manera significativa de los elementos sometidos a tensión o a torsión. El tipo de falla que presentan los elementos sometidos a compresión se puede clasificar de acuerdo con su longitud y al tipo de carga ya sea centrada o excéntrica.

El término columna se aplica a todos los elementos exceptuando aquellos en los que el tipo de falla es por compresión simple o pura.

Las columnas se pueden clasificar como:

- Columnas largas con carga centrada.
- Columnas de longitud intermedia con carga centrada.
- Columnas con carga excéntrica.
- Puntales o columnas cortas con carga excéntrica.

Cada clasificación de columnas presenta métodos de análisis y diseños específicos.

Para el caso específico del elemento de estudio (Varilla insertadora de carbones) este elemento se modelará como una columna ya que el tipo de falla que se presenta no es por compresión simple sino especialmente por flexo-pandeo, además las cargas que se presentan son a nivel axial y no perpendicular al eje como sería en el caso de las vigas, la falla se presenta al introducirse el carbón en la celda, ya que en algunas ocasiones caen a la ranura de inserción, carbones quebrados y desalineados con respecto a la ranura y en otras ocasiones por desajustes del sistema y bujes desgastados, la varilla insertadora de carbones no se encuentra bien alineada y está impacta directamente con la boquilla del sistema de inserción produciéndose el fallo de la misma.

Es importante tener en cuenta que una falla de columna siempre es repentina, total e inesperada y, por ende, peligrosa, ya que no hay advertencia previa. Una viga en cambio se curvará, lo cual será una advertencia visual de que está sobrecargada.

Se asume el modelo de columna larga con carga centrada, ya que se presenta una relación alta entre la longitud de la varilla insertadora de carbones con respecto al diámetro de la varilla, además el sistema en condiciones óptimas de funcionamiento se encuentra alineado con respecto al carbón que se debe introducir a la celda.

6.2 MODELO DE COLUMNA LARGA CON CARGA CENTRADA

Si la fuerza axial P que se muestra en la figura (7), actúa a lo largo del eje centroidal de la columna, ocurre compresión simple del miembro para valores bajos de la fuerza. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, cuando P alcanza un valor específico, la columna adquiere inestabilidad y se desarrolla rápidamente una flexión.

Donde la carga crítica de flexión inestable es:

$$P_{cr} = \frac{C\pi^2 EI}{l^2}, \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde C es una constante o factor que depende de las condiciones de los apoyos o extremos del sistema.

Como $I = Ak^2$, donde A = Área y k = Radio de giro, la ecuación anterior se reacomoda a la forma siguiente:

$$\frac{P_{cr}}{A} = \frac{C\pi^2 E}{\left(\frac{l}{k}\right)^2}, \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

$\lambda = \frac{l}{k}$: Es la relación de esbeltez, utilizado para la clasificación de las columnas de acuerdo con la categoría de longitud.

$\frac{P_{cr}}{A}$: Es la carga crítica unitaria, que se necesita para poner la columna en una condición de equilibrio inestable.

La siguiente tabla (1) y figura (8), muestran los valores de C para diferentes condiciones de extremo de columnas.

Figura 4-18

a) Ambos extremos están pivoteados o articulados;
 b) ambos extremos están empotrados;
 c) un extremo libre, un extremo empotrado;
 d) un extremo redondo y articulado, y un extremo empotrado.

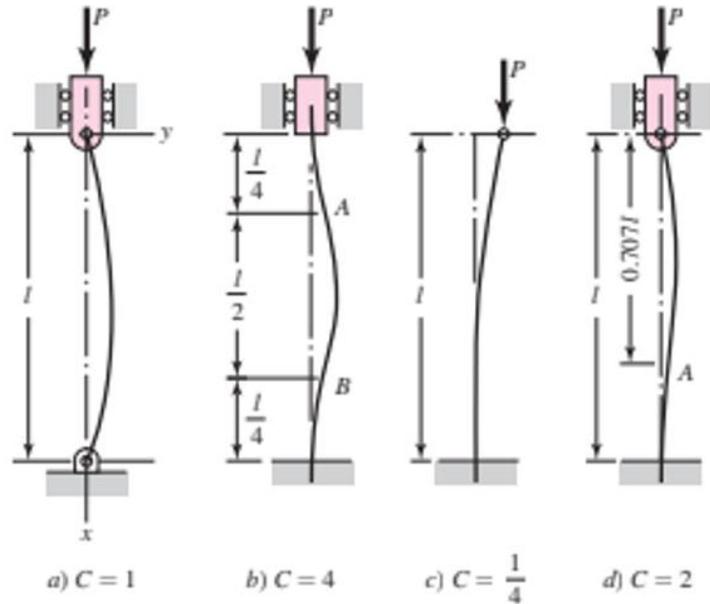


Figura 8: Valores de C para diferentes condiciones de los extremos de las columnas.
 Fuente: Libro Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley 8 edición.

Tabla 1: Valores de C para diferentes configuraciones de extremos de las columnas.
 Fuente: Libro Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley 8 edición.

Condiciones de extremos de columnas	Constante C de condición de extremos		
	Valor teórico	Valor conservador	Valor recomendado*
Empotrado-libre	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
Articulado-articulado	1	1	1
Empotrado-articulado	2	1	1.2
Empotrado-empotrado	4	1	1.2

*Para usarse sólo con factores de seguridad amplios cuando la carga de la columna se conozca con exactitud.

Se sabe que la varilla insertadora de carbones está sujeta a una distancia de su extremo por un tornillo prisionero, el cual permite fijar radialmente la varilla a la guía horizontal del eje porta varilla y el otro extremo de la varilla se encuentra libre.

Por tanto, se puede modelar la varilla como una columna que presenta un extremo empotrado y el otro libre; Por tanto, el valor recomendado de es $C = \frac{1}{4}$.

La muesca donde ingresa el tornillo prisionero se encuentra a 18,83 mm de uno de los extremos de la varilla insertadora de carbones, como se muestra en el respectivo plano, figura (9):

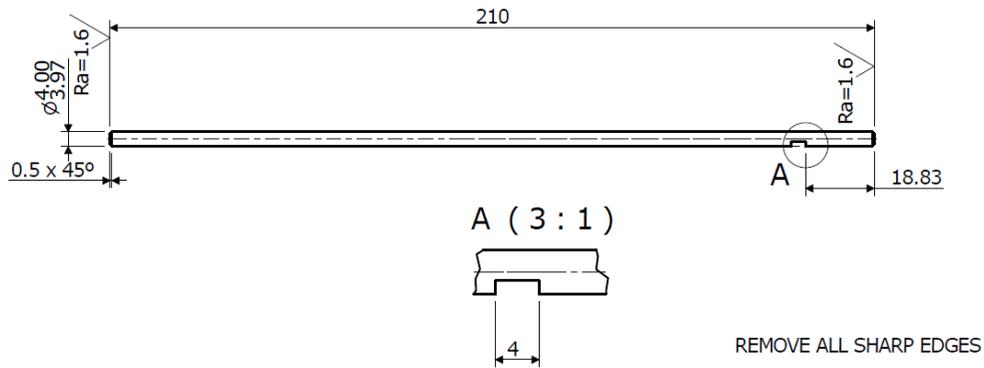


Figura 9: Plano de la varilla insertadora de carbones líneas R6.
Fuente: Plano suministrado por el área de proyectos de la empresa Tronex S.A.S.

Como la sección transversal de la varilla insertadora de carbones es circular, se puede emplear el momento de inercia para una sección transversal redonda:

$$I_{s.circular} = \frac{\pi d^4}{64}, \quad \text{Ecuación (3)}$$

El área de una sección transversal redonda en función del diámetro de la sección es:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}, \quad \text{Ecuación (4)}$$

El radio de giro es:

$$k = \sqrt{\frac{I_{s.circular}}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi d^4}{64}}{\frac{\pi d^2}{4}}} = \frac{d}{4}, \quad \text{Ecuación (5)}$$

Reemplazando el radio de giro *Ecuación (5)*, en la relación de esbeltez (λ), se tiene lo siguiente:

$$\lambda = \frac{l}{k} = \frac{4l_e}{d} = \frac{4 \cdot 180 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 180 < 200 \rightarrow \text{Columna larga}$$

Reemplazando las ecuaciones (4) y (5) en la ecuación (2), se obtiene el valor de la carga crítica de la varilla en términos del diámetro y de la longitud de la varilla, de este modo:

$$P_{cr} = \frac{C \pi^3 E d^4}{64 l^2}, \quad \text{Ecuación (6)}$$

De la anterior ecuación se conocen el valor de la constante de extremos (C), el diámetro (d), la longitud de la varilla (l).

La empresa proveedora de las varillas insertadoras de carbones (Ferro industrial) suministro el certificado de calidad de las varillas donde se encuentra algunas características mecánicas del material de la varilla (Material: Acero plata) y también la composición química.

En este certificado de calidad se tiene el valor del límite de elasticidad del material (Yield point), diámetro de la varilla, el esfuerzo máximo de tensión o tracción del material, el porcentaje de elongación y la dureza Brinell del material.

Para determinar la fuerza crítica (P_{cr}) se requiere el módulo de elasticidad del material (E), este corresponde a la pendiente en la región elástica en una curva de esfuerzo-deformación lo cual en este caso no se tiene, por tanto, se toma un valor de módulo de elasticidad estándar para el acero.

La siguiente tabla (2) corresponde al certificado de calidad suministrado por la empresa Ferro industrial:

Tabla 2: Certificado de calidad suministrado por el proveedor de varillas insertadoras de carbones (Ferro industrial).

Fuente: Certificado de calidad suministrado por el proveedor de Acero plata (Empresa Ferro industrial)

FERROINDUSTRIAL S.A.S.		Bönen	:	19.06.17
Calle 32 No. 41-74		Page	:	1
Medellin/ COLOMBIA				
Kolumbien		Customer no. :		2017200 000
		Order :		S-17-000072-0013
		Works ref. . . :		1-17-003091
		Order date . . :		3.05.17
		Order :		27.04.2017
Inspect. certificate EN 10204-3.1				
Item ID	115 Cr V 3	4,000	MM	
Quantity . . :	250,200	KG		

Mechanical values				
Diameter		3,992	-	3,994 MM
Tensile strength		634,000	-	640,000 MPa
Yieldpoint RP 0,2		497,000	-	501,000 MPa
Elongation A		22,000	-	22,500 %
Hardness Brinell		190,000	-	191,000 HBW

Chemical composition				
Batch no. : 254230				
Carbon	(C)	1,250	%	
Silicon	(SI)	0,190	%	
Manganese	(MN)	0,390	%	
Phosphorus	(P)	0,008	%	
Sulphur	(S)	0,003	%	
Chromium	(CR)	0,510	%	
Vanadium	(V)	0,080	%	

7. METODOLOGÍA

La metodología empleada fue consulta directa con los mecánicos de mantenimiento, coordinador de mantenimiento industrial y coordinador de producción sobre el funcionamiento de la máquina, exploración en la web, visualización del proceso de funcionamiento, entre otras cosas. Con el asesor interno se visualizaron en la estación diferentes posibilidades de mejora y automatización las cuales ya se mencionaron anteriormente, el asesor fue de vital importancia en ser un apoyo en la formulación teórica y del planteamiento del modelo de pandeo establecido como soporte para la estimación de la fuerza crítica que experimenta la varilla insertadora de carbones.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para cumplir con los objetivos propuestos se realiza una recopilación y análisis de datos de la cantidad de paros ocurridos en el mes de junio del año 2017 y para todo el año 2019, considerando las líneas R6 y determinado las máquinas más críticas en el tema de paros, eficiencias de producción y cantidad de rechazos de celdas.

Estos datos históricos se obtienen gracias al coordinador de producción de la planta de manufactura de pilas de la empresa Tronex S.A.S.

8.1 ANTECEDENTES DE PRODUCCIÓN EN LA LÍNEA R6-1, EN JUNIO DEL AÑO 2017

En el área de producción de la planta de manufactura de pilas de la empresa Tronex S.A.S, se manejan dos indicadores de calidad, la eficiencia y el producto no conforme o rechazo.

El primer indicador es la razón entre la producción real y la producción esperada, teniendo en cuenta la velocidad de producción de la línea en específico y el tiempo real de producción neto. El segundo indicador corresponde a la razón entre el número de baterías rechazadas y la producción total de baterías.

Nota: La línea de producción R6-1 tiene una velocidad de producción de 116 baterías/Minuto.

La siguiente figura (10) corresponde al comparativo entre la producción real, producción esperada y la cantidad de baterías no producidas para las semanas del mes de junio del año 2017.

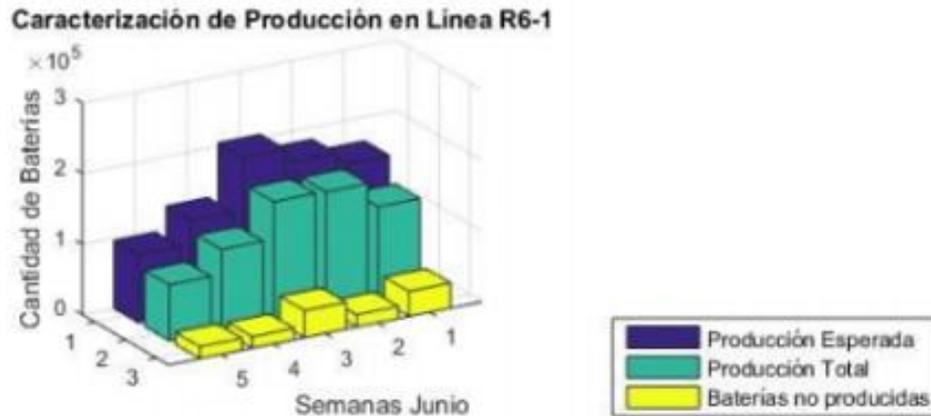


Figura 10: Comparativos de: Producción esperada, producción total y baterías no producidas en las semanas del mes de junio del año 2017 para la línea R6-1.
Fuente: Imagen suministrada por el área de producción de la empresa Tronex S.A.S.

La figura (11) corresponde a la eficiencia de producción para la línea R6-1 en las semanas del mes de junio del año 2017.

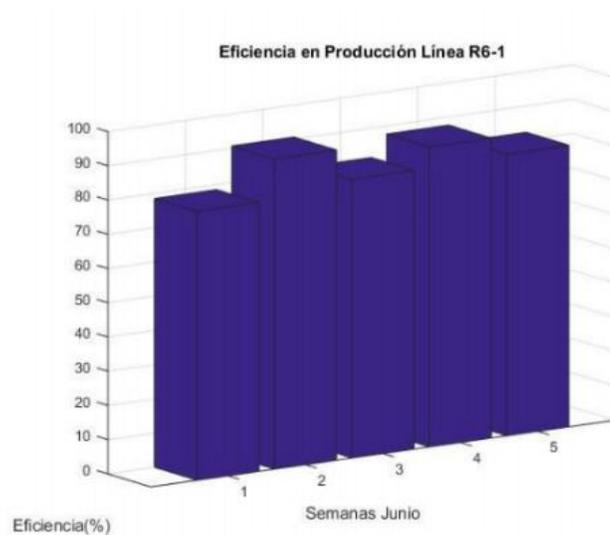


Figura 11: Eficiencia de la producción en la línea R6-1 en las semanas del mes de junio del año 2017.

Fuente: Imagen suministrada por el área de producción de la empresa Tronex S.A.S.

En el mes de junio del año 2017 se logró cumplir en las semanas 2 y 4 con el estándar de producción, que debe ser igual o superior al 85% de la eficiencia, más adelante se mostraran las causas de la baja eficiencia en las semanas restantes.

A continuación, se muestra la figura (12), la cual corresponde a los tiempos muertos en las máquinas de la línea R6-1.

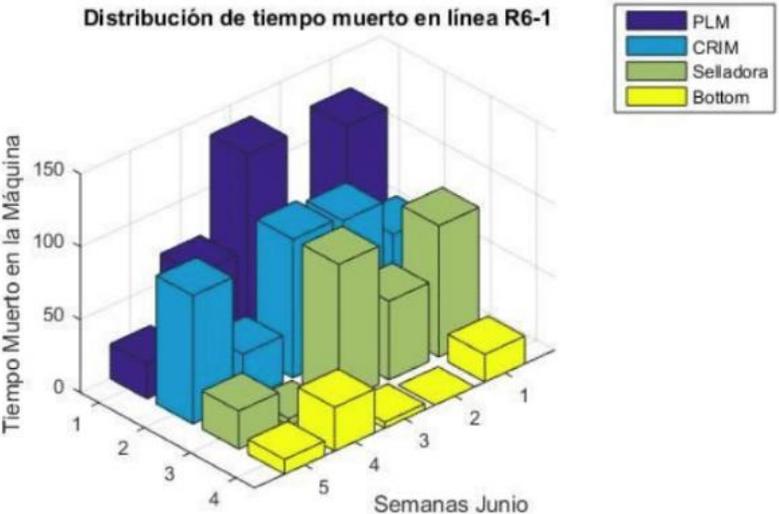


Figura 12: Distribución de tiempos muertos en la línea R6-1 en el mes de junio del año 2017.
Fuente: Imagen suministrada por el área de producción de la empresa Tronex S.A.S.

El tiempo muerto, es el tiempo improductivo de las máquinas de la línea, es decir, tiempo en el que no se encuentran disponibles las máquinas para la producción de baterías debido a fallos o eventualidades en el proceso productivo, la cabeza de serie de los tiempos muertos en el mes de junio del año 2017 está comandada por la máquina PLM, la máquina que sigue y aporta gran cantidad de tiempos muertos a la línea R6-1 es la máquina CRIM.

En la siguiente figura (13), se muestra los principales factores que afectan la eficiencia de la máquina CRIM de la línea R6-1 y por tanto afectan la eficiencia de la línea de producción.

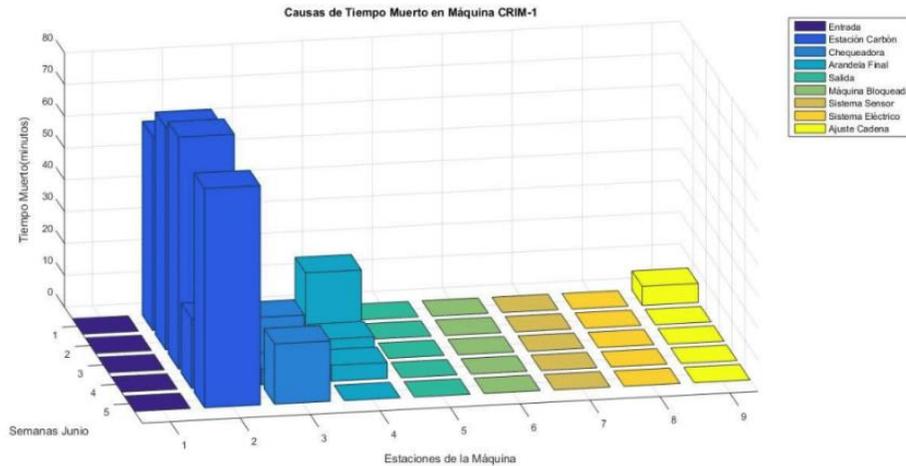


Figura 13: Causas de tiempos muertos en la máquina CRIM-1.

Fuente: Imagen suministrada por el área de producción de la empresa Tronex S.A.S. Según la ilustración anterior se puede ver que la principal causa de la ineficiencia (Tiempos muertos) de la máquina CRIM-1, es debido a la estación de carbones.

En el mes de junio del año 2017 aún no estaba implementado el sellado con tuck washer sino con una arandela final de cartón.

8.2 ANTECEDES DE PRODUCCIÓN LINEAS R6, AÑO 2019

La tabla (3), relaciona la eficiencia de producción para las líneas R6-1 y 2, comparativamente con los indicadores de producción del año anterior y la meta establecida correspondiente a una eficiencia mínima del 85% en la producción.

Tabla 3: Eficiencias de producción líneas R6.

Fuente: Tabla suministrada por el área de producción de la empresa Tronex S.A.S.

TABLA DE DATOS																	
	ENE	FEB	MAR	Trimestre 1	ABR	MAY	JUN	Trimestre 2	JUL	AGO	SEP	Trimestre 3	OCT	NOV	DIC	Trimestre 4	TOTAL
Número de Unidades Netas Producidas	823.441	1.303.472	1.023.994	3.150.907	1.027.363	1.264.722	1.103.269	3.395.354	1.635.439	1.088.888	740.500	3.464.827	1178500	1228500	1.067.000	3.474.000	13.485.088
Número de Unidades Esperadas	1.042.588	1.694.076	1.391.404	4.128.068	1.333.272	1.666.540	1.316.048	4.315.860	1.923.524	1.209.072	928.048	4.060.644	1.427.736	1.696.928	1.332.540	4.457.204	16.961.776
Resultado indicador	79%	77%	74%	76%	77%	76%	84%	79%	85%	90%	80%	85%	83%	72%	80%	78%	80%
Resultado indicador año anterior	78%	72%	76%	75%	68%	74%	74%	72%	83%	85%	81%	83%	83%	87%	81%	84%	79%
Meta	85%	85%	85%	85%	85%												

La figura (14), corresponde a la variación de la eficiencia de las líneas de producción R6 (R6-1 y R6-2) durante el año 2019.

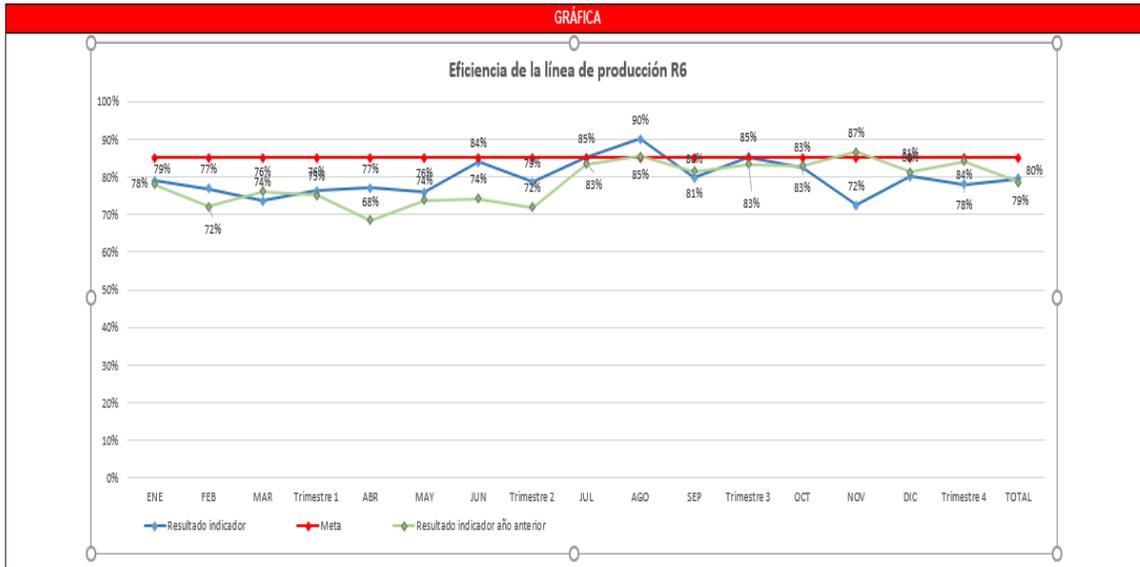


Figura 14: Variación de la eficiencia de la línea de producción R6 en el año 2019.

Fuente: Imagen suministrada por el área de producción de la empresa Tronex S.A.S.

8.3 CÁLCULO DE LA CARGA CRÍTICA EN LA VARILLA INSERTADORA DE CARBONES

Tabla 4: Constantes físicas de diferentes materiales.

Fuente: Libro Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley 8 edición.

Material	Módulo de elasticidad E		Módulo de rigidez G		Relación de Poisson ν	Peso unitario w		
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa		lb/pulg ³	lb/ft ³	kN/m ³
Aluminio (todas las aleaciones)	10.3	71.0	3.80	26.2	0.334	0.098	169	26.6
Cobre al berilio	18.0	124.0	7.0	48.3	0.285	0.297	513	80.6
Latón	15.4	106.0	5.82	40.1	0.324	0.309	534	83.8
Acero al carbono	30.0	207.0	11.5	79.3	0.292	0.282	487	76.5
Fundición de hierro (gris)	14.5	100.0	6.0	41.4	0.211	0.260	450	70.6
Cobre	17.2	119.0	6.49	44.7	0.326	0.322	556	87.3
Abeto Douglas	1.6	11.0	0.6	4.1	0.33	0.016	28	4.3
Vidrio	6.7	46.2	2.7	18.6	0.245	0.094	162	25.4
Inconel	31.0	214.0	11.0	75.8	0.290	0.307	530	83.3
Plomo	5.3	36.5	1.9	13.1	0.425	0.411	710	111.5
Magnesio	6.5	44.8	2.4	16.5	0.350	0.065	112	17.6
Molibdeno	48.0	331.0	17.0	117.0	0.307	0.368	636	100.0
Metal Monel	26.0	179.0	9.5	65.5	0.320	0.319	551	86.6
Níquel plata	18.5	127.0	7.0	48.3	0.322	0.316	546	85.8
Acero al níquel	30.0	207.0	11.5	79.3	0.291	0.280	484	76.0
Bronce fosforado	16.1	111.0	6.0	41.4	0.349	0.295	510	80.1
Acero inoxidable (18-8)	27.6	190.0	10.6	73.1	0.305	0.280	484	76.0

Para determinar la carga crítica del sistema se toma el valor del módulo de elasticidad del acero al carbono de la tabla anterior (4), se toman también los valores de diámetro y longitud de la varilla de la figura (8), la constante del tipo de extremo C y estos valores se reemplazan en la ecuación (6), quedando de la siguiente manera:

$$P_{cr} = \frac{C\pi^3 E d^4}{64l^2} = \frac{\frac{1}{4} * \pi^3 * 207 * 10^9 Pa * (4 * 10^{-3} m)^4}{64 * (210 * 10^{-3} m)^2} = 145,54 N$$

$$\rightarrow P_{cr} = 145,54 N$$

Se toma como referencia un valor de módulo de elasticidad de 207 Gpa para un acero al carbono estándar, al tomar este valor no se incurre en una desviación considerable de la carga crítica con respecto a la que se da en la realidad. Si se excede esta carga crítica, la teoría de falla indica que es posible que el elemento adquiera cierta inestabilidad, tendiendo a la flexión y por consiguiente a la fractura del elemento.

Con los ensayos de laboratorio realizados (Ver anexo 2), se espera tener una mejor caracterización del material.

8.4 ACTIVIDADES PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA#2

En primer lugar, se muestran en la siguiente tabla (5) los mantenimientos sistemáticos y correctivos que actualmente se realizan en las tres líneas de producción R6-1, R6-2 y R03.

Tabla 5: Mantenimientos sistemáticos y correctivos en la estación de carbones de las tres líneas de producción.

Fuente: Imagen tomada del área de mantenimiento de la empresa Tronex S.A.S.

?	Código	Actividad	Entidad	Tipo	Especialidad	Frecuencia	Estado
-	EQ-005-C-018	Sustitución de varilla insertadora de carbones	EQ-005 CRIM R6-1	Correctiva	Mecánica	-	Activa
-	EQ-005-C-208	Sustitucion elemento de la estacion de carbones	EQ-005 CRIM R6-1	Correctiva	Mecánica	-	Activa
-	EQ-005-C-245	Sustitución de Pines Alimentador de Carbones	EQ-005 CRIM R6-1	Correctiva	Mecánica	-	Activa
-	EQ-005-C-372	Ajuste estación carbones	EQ-005 CRIM R6-1	Correctiva	Ajuste	-	Activa
-	EQ-005-S-168	Mantenimiento estación de carbones	EQ-005 CRIM R6-1	Sistemática	Mecánica	Cada 2 Semana(s) los Sábado	Activa
-	EQ-007-C-391	Ajuste presion de carbones ristra	EQ-007 EMPACADORA DE RISTRA R6	Correctiva	Ajuste	-	Activa
-	EQ-018-C-018	Sustitución de varilla insertadora de carbones	EQ-018 CRIM R6-2	Correctiva	Mecánica	-	Activa
-	EQ-018-C-205	Sustitucion elemento de la estacion de carbones	EQ-018 CRIM R6-2	Correctiva	Mecánica	-	Activa
-	EQ-018-C-244	Sustitución de Pines Alimentador de Carbones	EQ-018 CRIM R6-2	Correctiva	Mecánica	-	Activa
-	EQ-018-C-361	Ajuste estación carbones	EQ-018 CRIM R6-2	Correctiva	Ajuste	-	Activa
-	EQ-018-S-164	Mantenimiento estación de carbones	EQ-018 CRIM R6-2	Sistemática	Mecánica	Cada 2 Semana(s) los Sábado	Activa
-	EQ-028-C-019	Sustitución de varilla insertadora de carbones	EQ-028 CRIM R03	Correctiva	Mecánica	-	Activa
-	EQ-028-C-213	Sustitucion elemento de la estacion de carbones	EQ-028 CRIM R03	Correctiva	Mecánica	-	Activa
-	EQ-028-C-252	Sustitución de Pines Alimentador de Carbones	EQ-028 CRIM R03	Correctiva	Mecánica	-	Activa
-	EQ-028-C-385	Ajuste estación carbones	EQ-028 CRIM R03	Correctiva	Ajuste	-	Activa
-	EQ-028-S-172	Mantenimiento estación de carbones	EQ-028 CRIM R03	Sistemática	Mecánica	Cada 2 Semana(s) los Sábado	Activa

El mantenimiento sistemático de la estación de carbones en las tres líneas de producción se basa en: Limpieza del chute, inspección de los tornillos de sujeción de (4mm) de la boquilla de inserción de carbones, la cual está hecha en acero stelite, inspección y estado de los bujes y finalmente la lubricación del sistema.

Como se mencionó con anterioridad al realizar este mantenimiento sistemático, los mecánicos de mantenimiento de las líneas R6, detectaron problemas por desalineación de la varilla insertadora de carbones y desgaste en diámetro interior de la boquilla insertadora de carbones, la desalineación puede ocasionar problemas por carbón descentrado.

En la figura (15), se muestran los alojamientos donde se encuentran los bujes soporte del sistema de inserción de carbones.



**Figura 15: Alojamientos donde se encuentran los bujes soportes de las barras perforadas.
Fuente: Fotografía propia.**

Las causas del problema de desalineación se pueden deber, al desgaste de las barras perforadas en su diámetro exterior, debido a la corrosión de la mezcla y desgaste de los bujes de las barras.

Por tanto, las actividades por realizar son las siguientes, en ese orden: Rectificado de las barras perforadas, sustitución de la boquilla de inserción de carbones y sustitución de los bujes.

En la siguiente figura (16), se observa la instalación de nuevos bujes de soporte de las barras perforadas del sistema de inserción.



**Figura 16: Bujes de soporte del sistema de inserción.
Fuente: Fotografía propia.**

8.4.1 CONSECUENCIAS DE LA DESALINEACIÓN DE LA VARILLA INSERTADORA DE CARBONES

- Arrastre de la arandela de compactación, evitando la función de esta en la celda.
- Al tener el carbón descentrado, se puede ocasionar la perforación del papel electrolítico, figura (17).
- Una mala inserción del carbón también puede producir tuck washer descentrado, y este problema a su vez papel expuesto, este último fallo evita un buen sello de la pila y ocasiona escape de gases, lo que conlleva a formar cristales en la mezcla.



**Figura 17: Celda con carbón descentrado.
Fuente: Fotografía propia.**

Finalmente, a modo de recomendación, se debe verificar en las inspecciones rutinarias realizadas en la estación de carbones, que no exista un descentramiento de los postizos, figura (18) (donde cae la pila en los rieles) con respecto a la boquilla de inserción de carbones, ya que si hay descentramiento se puede producir una fractura de la varilla insertadora de carbones o cualquiera de los problemas mencionados anteriormente.



**Figura 18: Desalineamiento de los postizos con respecto a la boquilla de inserción.
Fuente: Fotografía propia.**

9. CONCLUSIONES

- Gracias al mecánico encargado de las líneas R6 ,al mecánico del taller y al asesor interno se pudo reconocer el problema, y darle una posible solución desde el punto de vista de mejora y del cálculo de la carga crítica, Sin embargo en la realidad la varilla insertadora presenta diferentes modos de falla: pandeo, torsión, entre otros, y se asume un modelo teórico solo de pandeo para el cálculo de la carga crítica la cual puede ser aproximada a la realidad, sin embargo, existen más variables en el proceso que no se han caracterizado e involucrado en el cálculo teórico como por ejemplo, la resistencia que realiza la mezcla al introducirse la barra de carbón, además en el modelo de cálculo de pandeo solo se consideran los parámetros geométricos y de material del elemento de estudio.
- Se adquirieron durante el proceso de la práctica conocimientos de mecánica industrial, tales como, ciencia de los materiales, procesos de manufactura. Todo esto se dio gracias al acompañamiento del personal de mantenimiento y al coordinador de mantenimiento industrial.
- En cuanto a las funciones asignadas se adquirieron ciertas habilidades en gerencia de mantenimiento, calidad, producción, logística y trabajo en equipo.
- Con la información recopilada del área de producción en cuanto a la cantidad de pilas rechazadas y la eficiencia de la máquina CRIM de las líneas R6, se espera que con la implementación de las mejoras mencionadas se aumente la productividad en el proceso.
- Los resultados de composición química obtenidos en el ensayo realizado en la Universidad de Antioquia demuestran que, si bien hay una diferencia mínima con respecto a algunos componentes del material de la varilla, se debe tener en cuenta que solo se realizó este ensayo para un solo ejemplar y no para un lote, reflejando una variabilidad mínima.

10. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Octava edición. Ricardo A. del Bosque Alayón, 2008. ISBN-13:978-0-07-312193-2.

11. ANEXOS

- Anexo 1: Se adjuntan los planos del sistema de mordaza con dimensiones corregidas para evitar el desgaste de los tornillos de sujeción.
- Anexo 2: Se adjuntan los resultados de los ensayos de composición química y de tracción realizados a la varilla insertadora de carbones.