



# FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

“REDUCCIÓN DE COSTOS POR MEJORA OPERATIVA DEL PROCESO, EN EL CONDENSADOR DE UNA PLANTA DE ÁCIDO SULFÚRICO CON TECNOLOGÍA WSA”

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título profesional de:

**INGENIERO INDUSTRIAL**

**Autor:**

Jorge Johan Brayan Escalante Chacón

**Asesor:**

Ing. Ruth Rodríguez Zárate

Lima - Perú

2021



## DEDICATORIA

Dedicado a mi familia por brindarme la fortaleza para continuar en este largo camino, motivándome y apoyándome en todo momento de mis estudios.



## AGRADECIMIENTO

A la Universidad Privada del Norte que me acogió en sus aulas, brindándome la competencia adecuada para poder afrontar los desafíos de un ingeniero.

A mi profesor M.B.A José Huapaya Barrientos por su paciencia y sacrificio que son de admirar e imitar.

Al equipo de trabajo de la Procesadora Industrial Río Seco, por la capacidad de enfrentar los retos con compromiso y dedicación.



## Índice De Contenido

<b>DEDICATORIA</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE ECUACIONES</b>	<b>9</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
1.1. Descripción de la Empresa	12
1.2. Antecedentes de la Empresa	13
1.3. El problema	19
1.4.1. Problema General	22
1.4.2. Problemas específicos	22
1.5. Justificación	23
1.6. Objetivos	24
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b>	<b>25</b>
2.1.1. Antecedentes Internacionales	25
2.1.2. Antecedentes Nacionales	26
<b>2.2. MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>29</b>
2.2.1. Proceso	29
2.2.2. Six Sigma	31
<b>CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA</b>	<b>37</b>
3.2. Proceso productivo de la empresa	37
3.3.2. Análisis de la situación problemática	58
3.3.3. Identificación de los problemas claves	59
3.3.4. Estrategia de solución	60



3.4 ETAPAS DE APLICACIÓN	64
3.4.1. Etapa de Pre-Definición	64
3.4.2. Etapa de Definición	67
3.4.3. Etapa de Medir	68
3.4.4. Etapa de Analizar	70
3.4.5. Etapa de Mejorar	82
3.4.6. Etapa de Controlar	85
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS</b>	<b>88</b>
PERIODO PRE-MEJORA	88
4.1 CÁLCULO DE LOS COSTOS POR RECURSO HUMANO	88
4.2 CÁLCULO DE LOS COSTOS POR RECURSOS MATERIALES	89
4.3 CÁLCULO DE LOS COSTOS POR 9090	
4.4 CÁLCULO DEL COSTO TOTAL ANTES DE LA MEJORA	91
4.5 CÁLCULO DEL COSTO TOTAL 911	
4.6 CÁLCULO DEL AHORRO 933	
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>96</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>96</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>97</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>98</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Reacción en plantas WSA y SNOX	53
Tabla 2. Composición e ingredientes de sulfato de manganeso monohidrato	55
Tabla 3. Propiedades físicas y químicas del sulfato.	55
Tabla 4. Turno de Operación y control de válvula manual de liberación de calor	62
Tabla 5. Cuadro de Definición del Proyecto de mejora operativa	67
Tabla 6. Propiedades físicas de los tubos de borosilicato	69
Tabla 7. Composición química (componentes principales en aprox. %-peso)	69
Tabla 8. Costo de Recursos Humanos	88
Tabla 9. Costo de recursos materiales	89
Tabla 10. Costo de producción	90
Tabla 11. Costo total antes de la mejora	91
Tabla 12. Reducción de días y repuestos en la parada de planta del año 2020	91
Tabla 13. Costo anual de la parada programada del año 2020	92
Tabla 14. Cálculo del ahorro después de la mejora	93
Tabla 15. Reducción de costos periodo 2019-2020	95



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Planta de Uchucchacua	13
Figura 2. Producción Anual de la PROCESADORA INDUSTRIAL RIO SECO S.A	15
Figura 3. Organigrama de la Empresa PROCESADORA INDUSTRIAL RÍO SECO S.A	18
Figura 4. Disposición de los tubos de vidrio en el interior del condensador	20
Figura 5. Tubería de vidrio de borosilicato	21
Figura 6. Etapas del Six Sigma. (Fuente internet)	34
Figura 7. Diagrama de proceso	38
Figura 8. Planta de Lavado Ácido	39
Figura 9. Planta de Ácido Sulfúrico	40
Figura 10. Planta de Cristalización	41
Figura 11. Diagrama de bloques del área de molienda	43
Figura 12. Diagrama de flujos del sistema de molienda	44
Figura 13. Diagrama de bloques del área de lavado ácido	45
Figura 14. Diagrama de flujos de la alimentación de pulpa al área de lavado ácido	46
Figura 15. Diagrama de bloques del área de flotación y espesamiento	50
Figura 16. Proceso WSA para gas H <sub>2</sub> S.	52
Figura 17. Condensador WSA	54
Figura 18. Diagrama de Operaciones de la Planta de ácido sulfúrico.	56
Figura 19. Se resalta la válvula PDV 36 que trabaja en automático.	57
Figura 20. Se resalta la válvula PDV 36-B, que trabaja en manual.	58
Figura 21. Diagrama de Ishikawa	61
Figura 22. Cuadro de 5W y 1H	64
Figura 23. Cuadro de 5W y 1H	65
Figura 24. Cuadro de 5W y 1H	65
Figura 25. Plantilla de la disposición de los tubos de vidrio de borosilicato	66
Figura 26. Ubicación de las tuberías de vidrio en la para de planta de enero 2019	72



Figura 27. Reconocimiento del área más propensa a la rotura de los tubos	73
Figura 28. Ubicación de las tuberías de vidrio en la para de planta de mayo 2019	74
Figura 29. Análisis de la ubicación de los tubos en la parada de planta de enero y mayo	75
Figura 30. Ingreso de aire del medio ambiente por contracorriente	77
Figura 31. Zona resaltada de la ubicación de la rotura de los tubos del condensador	78
Figura 32. Válvula manual PDV 36-B totalmente cerrada.	79
Figura 33. Ubicación de tubos reemplazados en enero y encontrados roto en mayo	80
Figura 34. Porcentaje de tubos encontrados rotos en mayo	81
Figura 35. Reducción de la cantidad de tubos rotos aplicando la mejora operativa	82
Figura 36. Cantidad de tubos rotos encontrados después de la mejora operativa	83
Figura 37. Ubicación de los tubos rotos encontrados después de la mejora operativa	84
Figura 38. Procedimiento para la inspección de las válvulas de control del condensador	86
Figura 39. Programación de actividades vs periodo de aplicación	87





## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Reacción del carbonato de manganeso	47
Ecuación 2 Reacción del carbonato de calcio	47
Ecuación 3 Reacción del sulfato de manganeso	47
Ecuación 4 Reacción del carbonato de calcio	48
Ecuación 5 Reacción del carbonato de manganeso	48
Ecuación 6 Reacción del sulfato de manganeso	48



## RESUMEN EJECUTIVO

La Planta de ácido sulfúrico con tecnología WSA cuenta con un condensador que en su interior tiene tubos de vidrio, los cuales anualmente presentan en promedio, la ruptura de ciento cincuenta tubos, incrementando los costos operativos de la Planta.

El sistema de enfriamiento del Condensador, tienen dos válvulas que liberan el exceso de aire caliente. Una de las válvulas, se encuentra trabajando en automático y la segunda en manual. Revisando la operación de ambas válvulas podemos corroborar que trabajando con la válvula automática, el proceso se mantiene sin sobresaltos.

Se realizó un planteamiento para la revisión del condensador y las válvulas de liberación de calor del sistema, evaluando la zona donde mayormente se presentan las roturas de los tubos de vidrio, encontrándose fracturadas en el lado más cercano a las válvulas de liberación de calor.

Usando el método six sigma se planteó la mejora operativa en la cuál se creó una plantilla para poder identificar y proveer historial del lugar donde se encuentran ubicados los tubos rotos y los tubos reemplazados. Al contrastar la información de las plantillas en cada mantenimiento programado del condensador en los meses de enero y mayo del 2019, apreciamos que de los tubos reemplazados solo se encontraron un 17% de tubos fracturados, siendo estos ubicados en una zona propensa a romperse. Además logramos uniformizar los criterios de los operadores con la creación de un procedimiento.



Con la mejora se logra ahorrar S/.402,799.87 al año, concerniente a la mano de obra en mantenimiento del equipo, la reducción de repuestos y al aumento de días para poder producir.

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Descripción de la empresa**

La minería en el Perú es una de las actividades económicas más importante en el país, representa el 9% del PBI (Osinermin,2019) y 61% del valor total de las exportaciones peruanas (Minem,2019). Es el mayor consumidor de energía eléctrica dependiendo del tipo de yacimiento y del tamaño de la mina. En 17 de los 24 departamentos del país se realiza extracción minera formal, siendo los minerales potenciales: el cobre, zinc, plomo, oro y plata.

La unidad minera Uchucchacua está ubicada a 4500 m.s.n.m. en el distrito de Oyón, región Lima, provee el concentrado plomo, plata con alto manganeso. Este concentrado, era difícil comercializar y tratar (año 1975), por la baja rentabilidad y las altas penalizaciones por el contenido de manganeso. Es por ello que el año 2010, nace la PROCESADORA INDUSTRIAL RÍO SECO S.A., donde se realiza el tratamiento del concentrado plomo, plata con alto manganeso.

Para el tratamiento del concentrado se cuenta con tres plantas que hacen posible el lavado del mineral y la producción del sulfato de manganeso monohidratado. Una de las plantas es la de ácido sulfúrico con tecnología WSA (Wet sulphuric acid) de la empresa Haldor Topsoe de Dinamarca. Esta planta es responsable de recibir el gas proveniente de los reactores de lavado ácido y proveer el ácido sulfúrico para dicho lavado.

El presente trabajo está enfocado en el condensador de la planta de ácido sulfúrico, específicamente en el cuidado de los tubos de vidrio de borosilicato que se



encuentran en su interior. Por los constantes reportes de ruptura que presentan en la operación, se realiza el estudio; utilizando el diagrama de Ishikawa y la metodología Six Sigma para poder encontrar la razón por la cual los tubos de vidrio se quiebran. Es por ello que se tiene como resultado la mejora operativa en el ahorro de costos, en la reducción de la frecuencia de paradas de planta, y en disminuir el personal calificado para el mantenimiento del condensador de Planta.

## 1.2. Antecedentes de la empresa

La Procesadora Industrial Río Seco que fue fundada el 2010, por un estudio realizado por el ingeniero Alberto Benavides de la Quintana y el Laboratorio Plenge, por la necesidad de reducir la cantidad de manganeso en el concentrado plomo-plata, a valores que no se podía alcanzar en la mina Uchucchacua. La calidad que pedían los clientes era menor del 4% de manganeso en el concentrado plomo-plata, puesto que con valores superiores, el concentrado recibía penalidades que reducían la rentabilidad del concentrado.



*Figura 1.* Mina Uchucchacua, Oyón



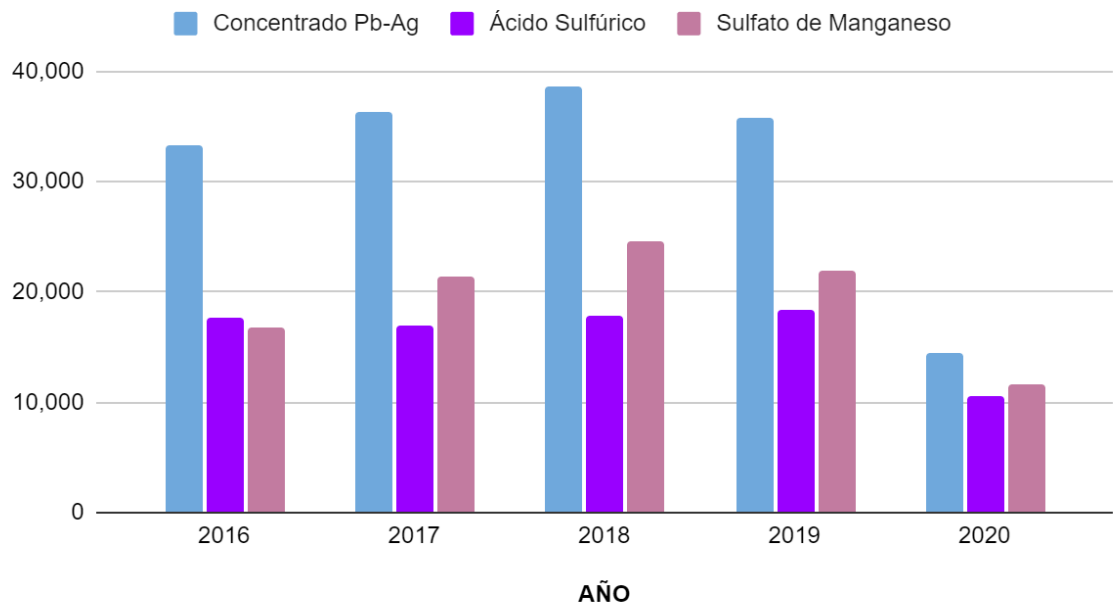
Es por ello que se crea la Procesadora Industrial Río Seco con la finalidad de retirar la mayor cantidad de manganeso del concentrado y a ese manganeso extraído se le dá un valor agregado que sirve para la agricultura. La Procesadora inició operaciones de una manera progresiva en el año 2014, para la producción de sulfato de manganeso monohidratado, el cual es el producto a comercializar.

Esta planta es pionera en el Perú y Latinoamérica, es moderna y está ubicada en el distrito de Huaral, provincia de Huaral, región Lima, que produce sulfato de manganeso monohidratado de alta calidad a partir del lavado del concentrado de plomo plata con alto contenido de manganeso de la mina Uchucchacua.

Este producto es utilizado como micronutriente para las plantas, favoreciendo al mercado interno e impulsando la agricultura nacional. Además, es materia prima para la fabricación de aceros, baterías, pigmentos, entre otros.

La Procesadora Industrial Río Seco cuenta con tres plantas de producción: la planta de lavado ácido, la planta de ácido sulfúrico y la planta de cristalización las cuales reportan una producción anual como se muestra en la figura 1, teniendo el reporte del año 2020 una reducción considerable producto de la pandemia del covid 19.

## PRODUCCIÓN ANUAL PROCESADORA RÍO SECO (TM/AÑO)



*Figura 2.* Producción anual de la Procesadora Industrial Río Seco

La Procesadora Industrial Río Seco produce 22,000 TM/año de sulfato de manganeso monohidratado convirtiéndose en el tercer productor mundial de dicho producto que es usado como fertilizante, para el crecimiento de las plantas en la sintetización de la clorofila.

Como alimento, el manganeso es uno de los nueve micronutrientes esenciales para los animales, para los huesos y la salud reproductiva.

Como fungicida, que ayuda a controlar la proliferación de enfermedades causadas por hongos que infectan a los cultivos.

La producción de ácido sulfúrico es la única que no se comercializa, pues es usada para la lixiviación del concentrado plomo - plata con alto manganeso.



Para alcanzar la producción de 60 TMD (Toneladas Métricas Diarias) es producto del 52.8% del azufre fundido y el 47.2% a partir de los gases ácidos producidos en la planta de lavado ácido.

La Procesadora Industrial Río Seco cuenta con certificaciones: ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001, BASC (Business Alliance for Secure Commerce) estas certificaciones mantienen y ratifican, la buena relación con los clientes y las comunidades campesinas de Huaral y Sayán, con las cuales se trabaja de manera coordinada para lograr los objetivos de calidad, seguridad, cuidado del medio ambiente y comercio seguro. (Revista Minería,2018)

Los ochenta y siete trabajadores de la planta tienen presente la visión y misión de la empresa así como los valores de la Compañía de Minas Buenaventura que son transmitidos y compartidos para ser llevado a la práctica dentro y fuera de las instalaciones de la empresa.

### **Visión**

Desarrollar recursos minerales generando el mayor valor posible a la sociedad





## Misión

Ser el operador minero de elección y de mayor aceptación para las comunidades, las autoridades y la opinión pública en general. Generar la más alta valoración de la compañía ante todos sus públicos de interés (stakeholders).

## Los valores de la empresa

**Seguridad:** es un valor central que promueve el respeto a la vida de nuestros colaboradores y que está presente en todos nuestros procesos, operaciones y actividades.

**Honestidad:** actuamos de manera recta y proba, sin mentir, engañar u omitir la verdad.

**Laboriosidad:** sentimos pasión por nuestro trabajo; damos lo mejor de nosotros y actuamos de manera eficiente, segura y responsable.

**Lealtad:** estamos comprometidos con nuestra empresa, misión, visión y valores. Somos parte de un mismo equipo.

**Respeto:** demostramos consideración y trato cortés hacia las personas, sus ideas, su cultura y sus derechos.

**Transparencia:** nuestras comunicaciones y actos son veraces, claros, oportunos y sin ambigüedad.

### Organigrama de LA EMPRESA

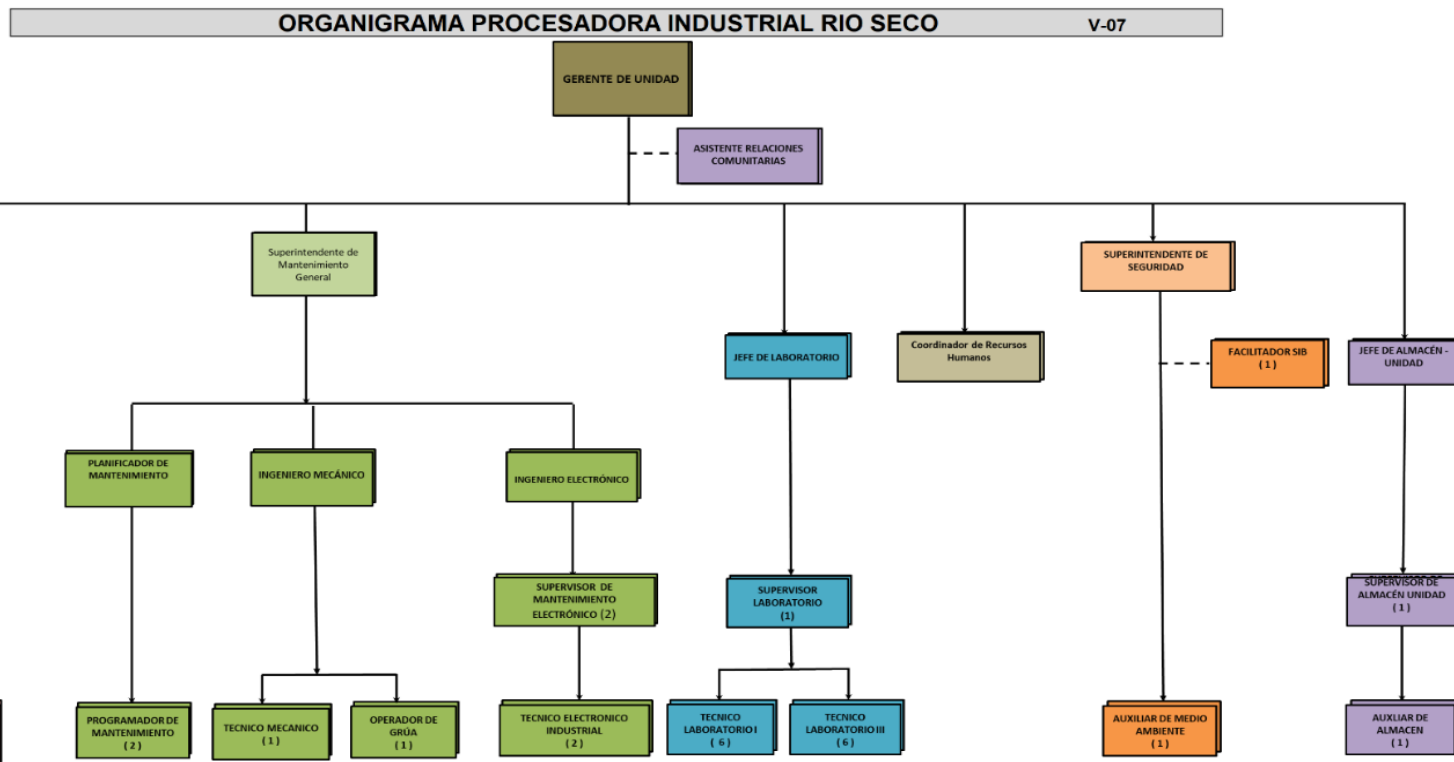


Figura 3. Organigrama de la Empresa PROCESADORA INDUSTRIAL RÍO SECO S.A



### 1.3. El Problema

En los últimos años, se ha tenido una penalidad de los clientes, porque el producto vendido, tenía una cantidad de 25% de manganeso en el concentrado de Plomo-Plata y ocasionó pérdidas a la empresa por las penalidades mencionadas. Por ello, se implementó en la Compañía de Minas Buenaventura, la Procesadora Industrial Río Seco en la que se retira el manganeso, reduciéndolo a 2.4 % en el concentrado y de este proceso se obtiene sulfato de manganeso, utilizando el ácido sulfúrico para el lavado (lixiviación) del concentrado.

La Procesadora Industrial Río Seco en su proceso utiliza el ácido sulfúrico para el lavado del concentrado plomo-plata-alto manganeso. Este concentrado ingresa con una concentración de plata de 120 Oz/Tn y 25 % de manganeso. Después del lavado, la concentración de plata aumenta a 230 Oz/Tn y alcanza el 2.4 % de manganeso, cumpliendo con la calidad requerida del cliente, de un porcentaje menor a 4 % de manganeso en el concentrado.

La planta de ácido sulfúrico recepciona el gas H<sub>2</sub>S proveniente de la lixiviación del concentrado Pb-Ag con alto Mn, este gas ingresa al combustor (1000°C) de la planta de ácido sulfúrico y lo convierte en SO<sub>2</sub>, luego es enfriado el gas a una temperatura de 410 °C para que ingrese al reactor que en su interior tiene catalizadores para acelerar la reacción de SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub>.

El SO<sub>3</sub> a 290°C ingresa al condensador de planta, este condensador en su interior tiene 828 tubos de vidrio de borosilicato (figura 4), que es refrigerado con aire del medio

ambiente que es inyectado por el blower de aire frío. Este condensador es una cámara en donde por las paredes externas de los tubos de vidrio está el aire de refrigeración y por el interior de los tubos pasa el gas  $\text{SO}_3$ . El intercambio de calor sucede en estos tubos, pues el gas es enfriado hasta llegar al punto de rocío a la temperatura de  $265^\circ\text{C}$  y es donde el ácido sulfúrico condensa.



*Figura 4.* Disposición de los tubos de vidrio en el interior del condensador. Fuente: Introducción a la tecnología WSA de Topsoe.

En el condensador fluyen dos corrientes, una de gas de proceso y otra de aire, ambas corrientes no entran en contacto. El gas de proceso con la condensación se convierte en ácido sulfúrico y el aire del medio ambiente que ingresa a  $23^\circ\text{C}$  sale del condensador con una temperatura de  $240^\circ\text{C}$ . En la figura 5 se muestra el tubo de vidrio de borosilicato antes de ingresar al condensador.



*Figura 5.* Tubería de vidrio de borosilicato. Fuente: Introducción a la tecnología WSA de Topsoe

Los tubos de vidrio son resistentes a los cambios de temperatura y a los incrementos de presión tanto del gas ácido como del aire de enfriamiento, que son productos del mismo proceso de producción, esta resistencia la podemos observar en las características físicas de los tubos de vidrio de borosilicato.

Esta planta con tecnología danesa está al cuidado del medio ambiente, manteniendo las concentraciones de la chimenea por debajo de los parámetros permisibles, también genera energía eléctrica producto del vapor de los intercambiadores de calor del convertidor que proporciona la fuerza mecánica para el generador.

La Planta de ácido sulfúrico realiza dos paradas de planta (anual) en promedio, para poder revisar equipos críticos para su mantenimiento y reparación. El problema se presenta cuando entra en mantenimiento el condensador de planta, pues nos encontramos en cada parada de planta con un promedio de setenta tubos de vidrio rotos, haciendo un total de ciento cuarenta tubos que se tienen que cambiar anualmente, generando retraso en la producción.



Es por ello que se necesita identificar la causa por la cual estos tubos de vidrio de borosilicato se rompen, pues producen sobrecostos en mantenimiento e incremento de días sin producción.

#### **1.4. Formulación del Problema**

##### **1.4.1. Problema general**

¿Por qué se rompen los tubos de vidrio de borosilicato en el Condensador de la Planta de ácido sulfúrico WSA?

##### **1.4.2. Problemas específicos**

###### **1.4.2.1. Problemas específicos 1**

¿Los tubos de vidrio de borosilicato que son cambiados son de la misma calidad?

###### **1.4.2.2. Problemas específicos 2**

¿Por qué la altura donde se fractura el vidrio de borosilicato generalmente es la misma?

###### **1.4.2.3. Problemas específicos 3**

¿Cuánto se ahorrará al hallar la causa de la rotura de los vidrios de borosilicato?



## **1.5. Justificación**

### **1.5.1. Justificación teórica**

Las herramientas que proporciona la ingeniería industrial nos sumerge en la búsqueda de cada día ser más eficiente, ahorrando tiempo, dinero y personal involucrado en el proceso. Utilizando el diagrama de Ishikawa, hallaremos las causas de la rotura de los tubos de vidrio por choque térmico.

### **1.5.2. Justificación práctica**

El proyecto servirá para encontrar la razón por la cual se fracturan los tubos de vidrio del Condensador de la Planta de ácido sulfúrico. Este trabajo servirá para otros profesionales que tengan a su cargo, plantas con tecnología WSA.

### **1.5.3. Justificación económica**

Debido al hallazgo del problema se tiene una reducción de costos en el área de mantenimiento, tanto en el ahorro de materiales, como en la mano de obra de personal calificado. Se reducirá el tiempo y el número de veces de paradas de Planta programadas en el año, que se traduce en más días de producción.



## **1.6. Objetivos**

### **1.6.1. Objetivo General**

Reducir los costos operativos en el condensador de la planta de ácido sulfúrico WSA determinando la causa principal de la rotura de los tubos de vidrio de borosilicato.

### **1.6.2. Objetivos Específicos**

#### **1.6.2.1. Objetivo específico 1**

Contrastar la resistencia de los tubos de vidrio repuestos en el mantenimiento según zona de instalación en el condensador de planta.

#### **1.6.2.2. Objetivo específico 2**

Analizar la altura y la ubicación en el condensador de la planta de ácido sulfúrico en donde se produce la rotura de los tubos de vidrio.

#### **1.6.2.3. Objetivo específico 3**

Detallar el ahorro con la implementación de la mejora operativa en el condensador de la planta de ácido sulfúrico.





## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de la investigación

#### 2.1.1. Antecedentes Internacionales

En esta investigación se tomó en consideración, los siguientes trabajos previos; en el plano internacional se tiene en referencias a:

Almeida Cruz (2016) en su estudio que lleva el tema “Optimización de procesos mediante la implementación de un sistema de planificación de recursos empresariales (ERP) enfocado en el mejoramiento logístico (inventarios, gestión de compras y ventas) para empresa comercializadora de equipos de protección personal” que tiene la finalidad de mejorar los procesos y minimizar los costos de dicha organización, a través de un sistema de planeamiento y monitoreo de gestión organizacional (ERP) e indicadores para obtener un mejor control del proceso. Finalmente concluyendo que con la ayuda de la incorporación de la mejora se logrará: un mayor control en relación con los inventarios, siendo la cantidad de ahorro de \$54,000, también se tendrá un ahorro de 25% en productos defectuosos, y que produciría un ahorro de \$18,500 para la empresa.

Por otro lado, Ochoa González (2016) refiere en su investigación que tiene como finalidad en reducir sus costos logísticos, optimizar sus acciones logísticas mediante la técnica de observar para lograr ejecutar estrategias de mejoras en el área logística, además se usó la técnica de entrevista aplicada a los colaboradores para determinar las principales causas del problema de los elevados costos logísticos y su efecto en los estados



financieros. demostrándose, que al momento de aplicar las estrategias en la entidad “El Hierro”, se tendrá como resultados una mayor gestión de su logística externa e interna, a través de los indicadores se logrará un mejor control en la gestión de los inventarios,

Serna (2016) en el presente estudio que tiene como tema “Propuesta de mejora para el control de inventarios en el área de almacén de una empresa de servicios” se evidencia en los resultados del inventario del material de insumo desarrollando una confiabilidad de valor de 60%, con un margen de 35% a la que expone la política de inventarios de la entidad, que posee el valor de 95% de exactitud. Para determinar las causas por las cuales se evidencia en las diferencias de material, finalmente se obtiene como resultado unas inconsistencias que orienta a establecer una metodología de procesos, con análisis de acciones y obtener planes de actividades que lograra el avance y seguimiento en porcentaje y períodos por el Coordinador.

### **2.1.2. Antecedentes Nacionales**

En el plano nacional se tomó en consideración, los siguientes trabajos previos:

Zapata Terrones (2017) en el presente estudio que lleva como tema “Mejora de un sistema de gestión logística para reducción de los costos en la empresa EYSM INGENIERÍA SAC de Callao 2017”, tiene como finalidad optimizar los costos logísticos relacionado a la empresa mediante de la matriz de kraljic, en el sistema de gestión de las relaciones con los proveedores, se concluye, que la incorporación de las mejoras alcanza el



valor de los pedidos realizados de manera previa a la mejora de un sistema de logística que fue de 47.53% con una totalidad de valor de ítems de S/. 17,364.60 y posteriormente de su implementación se logró tener mayores pedidos realizados con un valor de 90.49%, obteniendo un incremento en el valor de las entregas. Por lo que los costos logísticos previo a su implementación de mejora tenía un valor de 71.68%, y ya con la implementación se minimizó a 13%, evidenciándose que la mejora del sistema de gestión logró reducir los costos logísticos de la entidad.

Por otro lado, Araujo Silva (2017) comenta en su estudio que lleva como tema “Diseño de un sistema logístico basado en la gestión de compras, inventario y almacenes para la reducción de costos en la empresa ANVIP PERÚ S.R.L. que cuenta como objetivo lograr un esquema de mejora en relación a la gestión logística con el objetivo de reducir los costos, mediante una clasificación ABC. Para la gestión de almacén se planteó aplicar los instrumentos 9 “S” y Layout para lograr un control, y optimizar la distribución del almacén. Finalmente se obtuvo como resultado el diseño del sistema logístico facilitó la reducción de costos de compra, inventario en un 38%. Teniendo mayor calidad de sus procesos e incrementando la productividad a un 11.4%.

White Alvarez (2016) sostuvo en su investigación que cuenta como objetivo diseñar alternativas de mejora para reducir los costos logísticos, mediante el análisis de causa – efecto, lluvia de ideas y diagrama de Pareto, concluyendo que posteriormente a la



implementación de mejora, se eliminó las causas que producían los elevados costos. Además, se minimizan los costos logísticos que es un valor de S/. 2,066,455.34, y que con la ayuda de la implementación se logró una significativa reducción a S/1, 956,499.45. Así mismo se desarrolló un manual de procesos de compra y proveedores, para mejorar la gestión de compras y cumplimiento de pedido. Y se eliminó los costos de compras de urgencias que eran un valor de 25% de los costos de las compras.



## **2.2. Marco Conceptual**

### **2.2.1. Proceso**

#### **2.2.1.1. Definición**

Proceso. Pacheco (2017) proceso se refiere a la secuencia de actividades establecidas, que sigue un patrón estructurado y ordenado encaminado a alcanzar un objetivo propuesto.

Campos y Vargas (2020) indican que un proceso es la aplicación de manera progresiva de un conjunto de etapas, sea artificiales o naturales, de un periodo de tiempo determinado; estas fases están compuestas por actividades guiadas para seguir un camino objetivo.

Ponce (2016) lo define como un conjunto ordenado de acciones o actividades, que sigue a un determinado patrón y tiene la finalidad de concretar un resultado.

Proceso Industrial. Aguirre (2018) se refiere a un sistema determinado de actividades que están vinculadas, de manera dinámica, y dirigidas hacia la transformación de recursos de materia prima artificial o natural en bienes o productos que vendría ser el resultado del proceso. Esto quiere decir, los elementos que ingresan (factores) se transforman en resultados (productos terminados) a través de un proceso del cual incrementa su valor.

IIO (2016). Refiere sobre proceso industrial que está centrado en el consumo de manera eficiente de los recursos utilizados en la transformación de materia prima, ya sea como recursos tecnológicos, humanos y materias primas, a través de la ejecución de los instrumentos y técnicas de la ingeniería.

### **2.2.1.2. Variable costos**

Costo. Chiliquinga y Vallejos (2017) indica que es el conjunto de recursos utilizados (gastos) la cual son aplicados para el desarrollo de un determinado proceso, o tarea del que se espera, por lo general, lograr un resultado objetivo.

Costos industriales. Aguirre (2018) indica que es el valor económico que se financia para las operaciones industriales que consiste en la transformación de los materiales en resultados (bienes o productos).

Costo Operativo Caipo (2016), sostuvo respecto a los costos operativos también son denominados valor de operación y estos gastos se realizan para mantener la actividad del proyecto, una línea que está en proceso o un equipo que tenga un óptimo funcionamiento.

### **2.2.1.3. Clasificación de los costos.**

Caipo (2016), depende la función que desarrollan, los costos se clasifican como: costos comerciales, costos industriales y costos financieros.

Los costos industriales se segmentan de la siguiente manera: Costos directos e indirectos. Los cuales tenemos como:

- Costos indirectos de fabricación.
- Costos de materia prima directa
- Costos de mano de obra directa



Costos de mano de obra indirecta. Aguirre (2018) consistes en los costos vinculados con el personal que no compone de forma directa con la materia prima transformada en productos terminados; esto nos dice, que es el recurso humano que no interviene en el proceso productivo, ya que, a través de su labor, colabora a que los procesamientos de soporte, del proceso principal, se encuentren constantemente activos.

Costos de servicios indirectos. Aguirre (2018) Se refiere a los costos que guardan relación con el alquiler de equipos o maquinarias que contribuyen, de forma indirecta, en el procesamiento productivo. Su incorporación está en los procesos de soporte, del proceso principal.

## **2.2.2. Six Sigma**

### **2.2.2.1. Definición**

Barrera, Cambra y González (2017) Los autores afirman que el Six Sigma es una metodología estricta que se basa en información o datos reales para eliminar defectos o fallas en un proceso. Es una mejora de procesos, una forma eficiente de elaborar un trabajo y actividades. Es una manera de medir el desempeño de un proceso con relación a sus productos o servicios, de acuerdo con lo mencionado. Un trabajo eficaz es una mejora continua de productos y servicios en un proceso, basadas con el uso adecuado de herramientas industriales.

Bermúdez, J y Betancurt , L (2016) indican sobre el Six Sigma que es un sistema que cuantifica y optimiza la calidad. Cuyo objetivo es mejorar el proceso de productos o



servicios, además logra identificar y eliminar las causas de las fallas y defectos en el ciclo de servicios y producción al centrarse en los resultados que es prioridad y exigido por los clientes y genera grandes ingresos para la organización. Además, el Six Sigma tiene 3.4 o menos defectos de errores por millón de oportunidades.

#### **2.2.2.2. Historia**

Bermúdez, J y Betancurt , L (2016) Respecto a la historia del Seis Sigma, refiere que es una filosofía que nació en los años ochenta como la urgencia de crear estrategias de mercado y optimizar la calidad en la empresa Motorola, el ingeniero Mikel Harry. Se centró como meta considerable en la organización; la evaluación y análisis de la variación que se presentaba en el proceso de la organización, de manera que se ajuste más a la realidad, y así permitiendo mejorar la competitividad y productividad.

#### **2.2.2.3. Ventajas del Six Sigma**

Julia Máxima Uriarte. (2019) En cuanto a las ventajas del Six Sigma nos genera un contexto muy favorable, ya que nos facilita estrategias y a la vez existe un mejor ambiente con relación al flujo y elimina los desperdicios, a continuación, describiremos las ventajas del Six Sigma:

- ❖ **Eliminación del desperdicio:** En cuanto a los desperdicios, se presentan en todas las áreas dentro de un proceso y generan inconvenientes en los procesos, y consecuentemente ocasiona demoras en las actividades perjudicando todo el proceso de una organización.





- ❖ **Incremento de la calidad:** El Six Sigma es un sistema que nos permite lograr una mejor calidad. Se obtienen resultados óptimos del proceso y reduce variaciones y fallas del proceso, y así obtener mejor calidad en bienes y servicios.
  
- ❖ **Localizar e identificar la causa raíz:** El análisis de causa raíz, es una acción que forma parte de la metodología Six Sigma, en esta parte de la metodología se realiza el análisis a profundidad del problema para determinar su causa. Una vez identificada la causa raíz, nos facilita a seguir los pasos correspondientes para conseguir la solución.
  
- ❖ **La Satisfacción del cliente:** El Six Sigma cuenta con VOC, Voice of the Customer, es un instrumento que ayuda a determinar los deseos y necesidades de los clientes. Y así la empresa pueda cubrir las expectativas y entregue mayor satisfacción a los clientes.
  
- ❖ **La mejora del proceso:** Respecto a la mejora del proceso en una organización, aplicando el método DMAIC, esta es posible aplicar a diverso tipo de industria. Cada vez más industrias han aplicado el Six Sigma, y todas han obtenido un gran éxito después de su implementación.

#### 2.2.2.4. Etapas del Six Sigma

Pérez, I y Rojas, J (2019) Indican sobre las etapas del Six Sigma o también conocido como DMAIC, el cual está constituido por cinco fases que se describe en el siguiente orden: 1) Definir, 2) Medir, 3) Analizar, 4) Mejorar y 5) Controlar.



Figura 6. Etapas del Six Sigma

- **Define** (Definir):

La primera etapa es definir cuál es el problema o inconveniente. En esta fase se logra determinar los posibles proyectos de la metodología, la cual se tomará en cuenta por la organización para prevenir un mal manejo de los recursos. Esto acontece una vez de haber elegido el proyecto, se seleccionará al equipo o grupo de trabajo más preparado para ejecutarlo.



- **Medir**

La fase de medir consiste en evaluar e identificar las necesidades claves y expectativas de los clientes, las propiedades críticas del producto (o variables del resultado) y los parámetros que hacen efecto al desarrollo del proceso y a las características clave. Desde ese contexto se basará las medidas y también se mide la suficiencia del desempeño del proceso.

- **Analizar**

En cuanto a la etapa de análisis una vez que se obtuvo la información se tiene que determinar la causa raíz del servicio o producto que no es conforme, comprender de qué manera y cómo se generan los inconvenientes analizando detalladamente hasta conocer las causas más críticas certificadas mediante los datos.

- **Mejorar**

En la fase mejorar consiste en desarrollar, comprobar e incorporar las soluciones a los problemas causa raíz. Usando datos que nos permitan evaluar los resultados. En esta etapa se ejecuta la implementación de las mejoras a la empresa para mejorar el producto o servicio que es el objetivo del sistema.



- **Controlar**

En la etapa de control, consiste en diseñar y documentar las verificaciones a través del control y monitoreo. La cual es necesaria para avalar lo logrado a través del Six Sigma y así sea constante una vez incorporadas las mejoras en el proceso de la empresa. Finalmente, una vez concretado los objetivos termina la misión y el equipo se disuelve.



## **CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA**

### **3.1. Introducción**

El presente trabajo de suficiencia profesional se llevó a cabo en la empresa PROCESADORA INDUSTRIAL RIO SECO S.A., para mejorar la operatividad del condensador de la planta de ácido sulfúrico, con la finalidad de reducir los costos de la organización. Lo que acontece, es que la empresa en sus inicios no contaba con el correcto control de las válvulas de liberación de aire caliente excedente del proceso de la Planta de ácido sulfúrico. En consecuencia, se producía la ruptura de un promedio de ciento cuarenta tubos de vidrio (anualmente) en el Condensador de la Planta.

A inicio del año 2019 nace el interés de encontrar la respuesta a nuestra interrogante del ¿por qué se rompen los tubos de vidrio?

Gracias al conocimiento adquirido en la Universidad en mi proceso de formación académica, se logra resolver el problema mediante el seguimiento, el estudio de las propiedades físicas de los tubos de borosilicato y la observación del proceso tanto en campo como en sala de control y así reducir costos, mejorando también la productividad de la empresa.



### 3.2. El proceso productivo de la empresa

#### 3.2.1. Áreas de producción de la empresa

En la figura 7 se visualiza el Diagrama de Proceso de la procesadora Industrial Río Seco que consta de tres procesos principales, los cuales se realizan en tres plantas:

Planta de Lavado Ácido

Planta de Ácido Sulfúrico

Planta de Cristalización

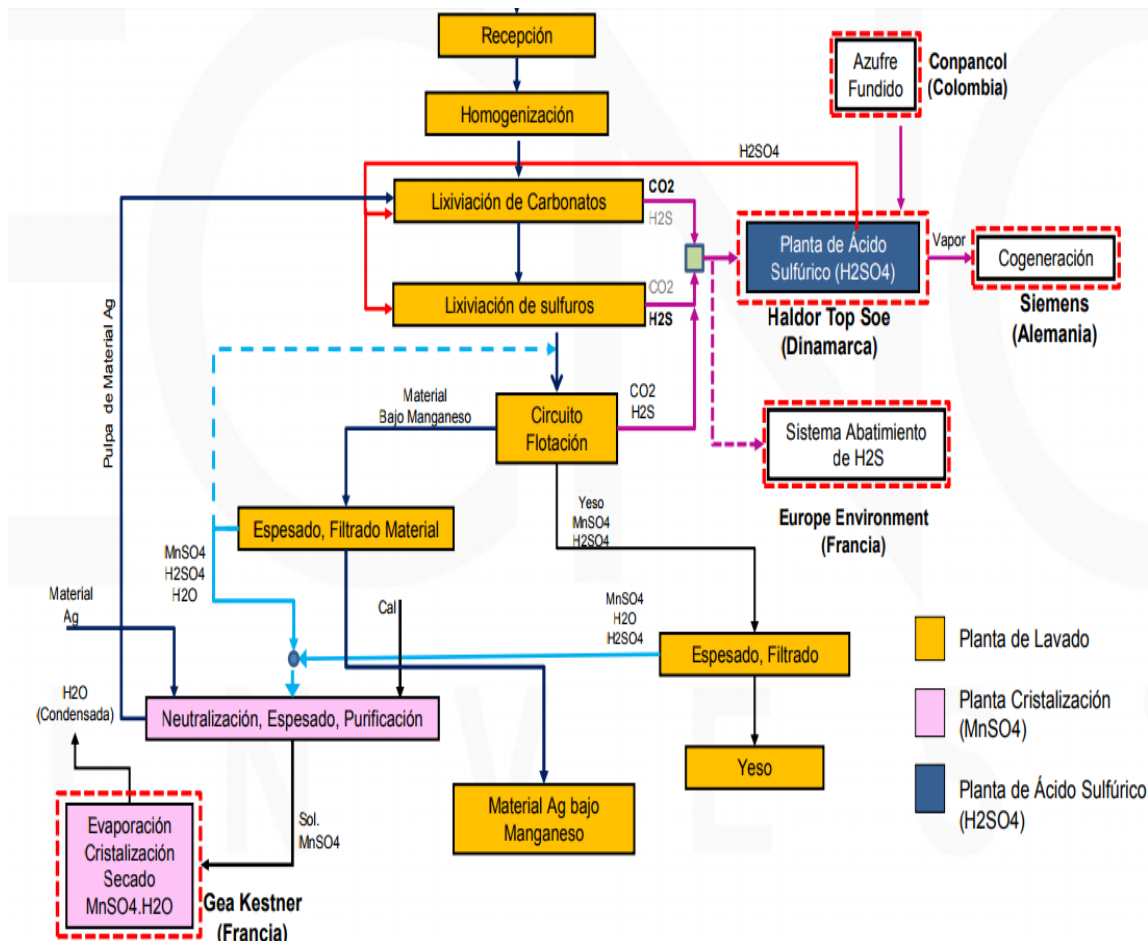


Figura 7. Diagrama de proceso

### 3.2.1.1. Planta de Lavado Ácido:

La Planta de Lavado Ácido tiene capacidad para procesar 130 TM/día de material plomo plata con alto manganeso (Mn 18-25%), que proviene de la unidad minera Uchucchacua. Este diseño fue desarrollado por la compañía de minas Buenaventura y el laboratorio Plenge. Con la finalidad de poder retirar el manganeso de dicho concentrado.

En la figura 8, se aprecia el proceso de la Planta de Lavado Ácido (lixiviación).

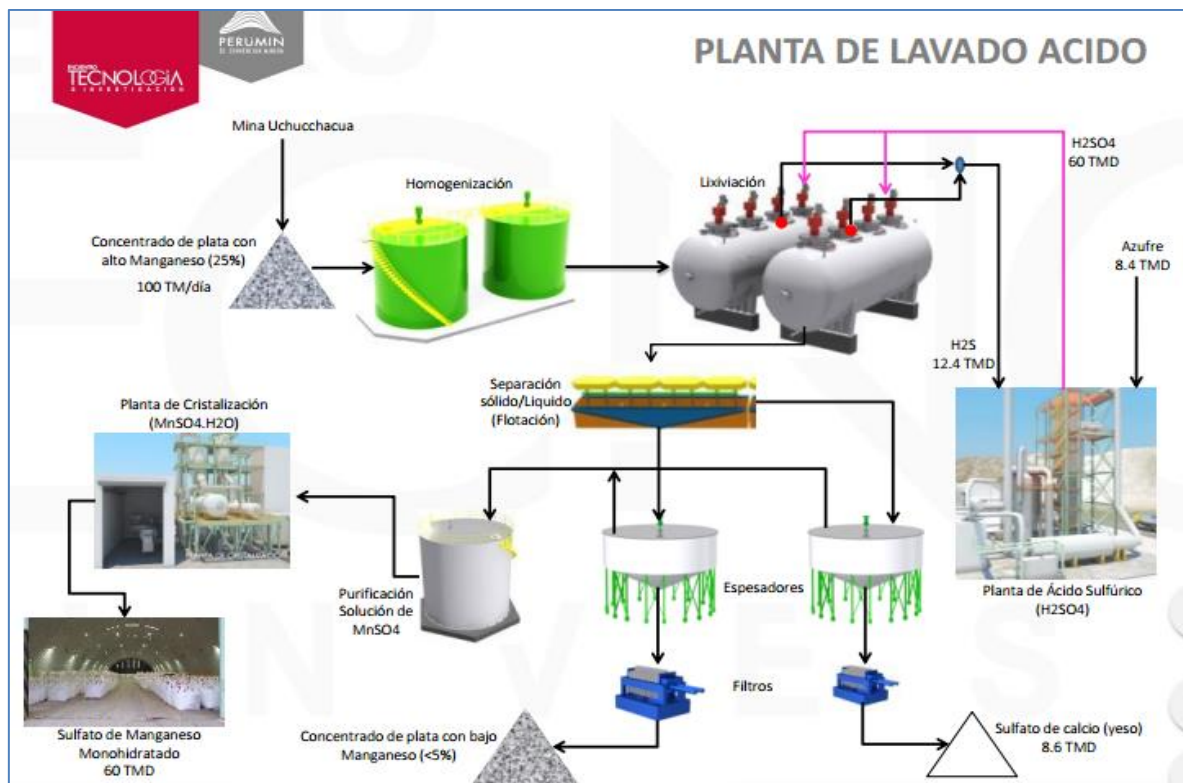


Figura 8. Planta de lavado ácido

### 3.2.1.2. Planta de Ácido Sulfúrico:

La tecnología seleccionada para el tratamiento de los gases de la planta de lavado ácido es la planta de ácido sulfúrico WSA (Wet Sulphuric Acid) de la empresa Haldor Topsoe de Dinamarca. Su capacidad es de 60 Tn/día. Como insumos utiliza el gas de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), proveniente de lavado ácido y el azufre líquido de las fosas de fundición. Estos dos insumos se complementan para alcanzar la producción de 60 Tn/día de ácido sulfúrico concentrado al 98.5%, teniendo siempre la prioridad del ingreso del sulfuro de hidrógeno y de una manera más restringida la del azufre líquido.

Esta planta genera su propia energía eléctrica (0.8 MW) para su funcionamiento pues cuenta con un generador que es impulsado por vapor de alta presión (55 Bar) proveniente de la misma reacción exotérmica que se produce en la planta.

En la figura 9 observamos el Diagrama de proceso de la Planta de Ácido Sulfúrico.

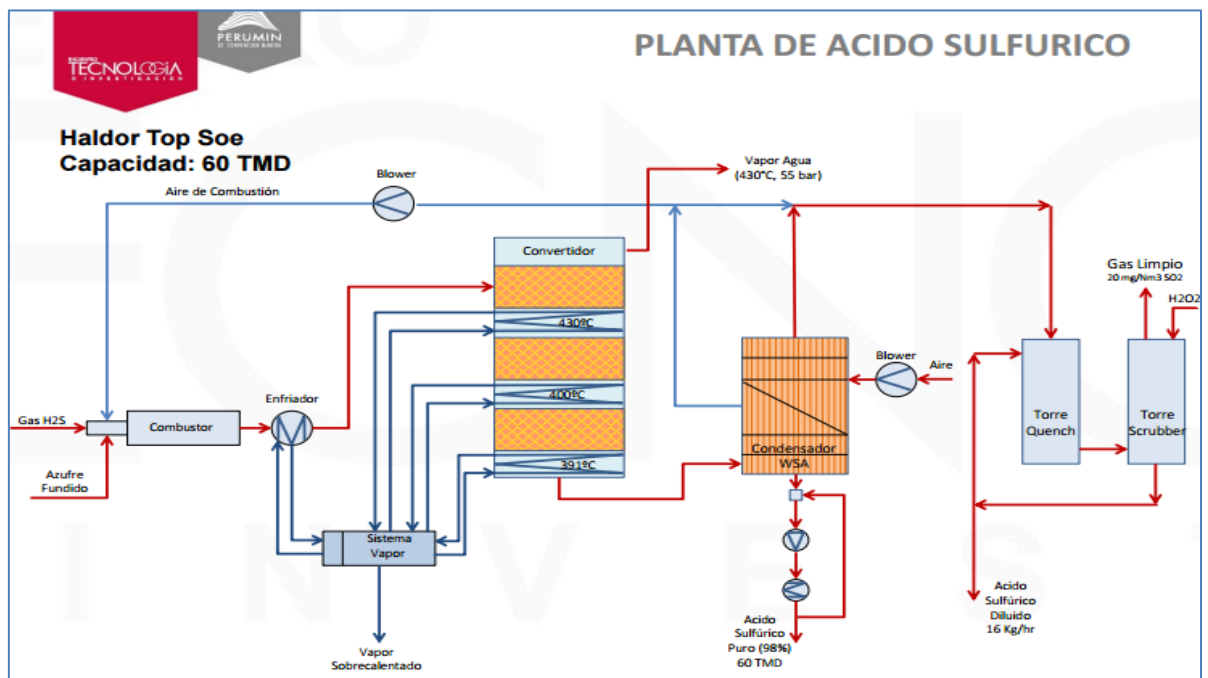


Figura 9. Diagrama de Flujos de la Planta de ácido sulfúrico



### 3.2.1.3. Planta de Cristalización:

Su capacidad es de 60 TM/día de sulfato de manganeso monohidratado. Luego de la etapa de purificación de la solución rica en manganeso, ingresa a la planta de cristalización para la evaporación de la solución y así ir retirando contaminantes a medida que va ganando densidad. Después de este proceso ingresa a la etapa de secado, y es donde el sulfato de manganeso monohidratado es retirado en big bag con una humedad del 0.8%. Esta planta fue construida con altos estándares de seguridad y cuidado del medio ambiente, para lo cual se utilizaron tecnologías de punta que permiten reutilizar el agua de procesos.

En resumen esta planta fue diseñada para aprovechar el vapor de enfriamiento de la planta de ácido sulfúrico, para generar energía eléctrica (0.8 MW), utilizar el gas (H<sub>2</sub>S) del proceso del lavado para la fabricación de ácido sulfúrico y la utilización de aguas residuales para la forestación de 10 hectáreas de influencia.

En la figura 10 encontramos el diagrama de flujos de la Planta de Cristalización.

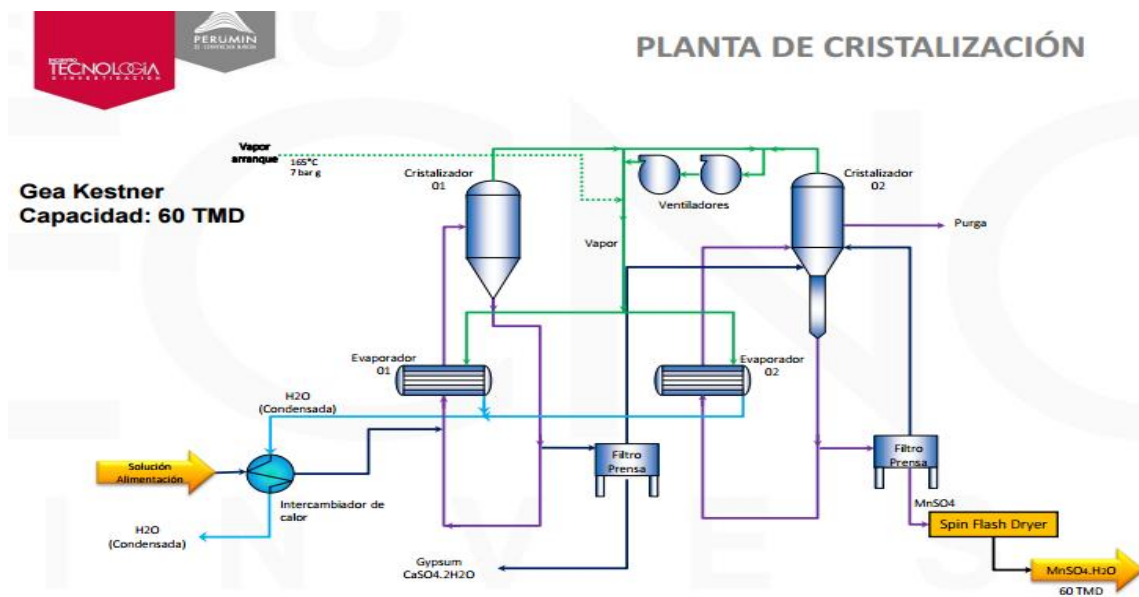


Figura 10. Planta de cristalización



### **3.2.2. Proceso productivo en la Procesadora Industrial Río Seco**

#### **3.2.2.1. Molienda**

El edificio de almacenamiento de concentrados recibe el concentrado Pb-Ag alto manganeso (Mn) procedente de la unidad minera Uchucchacua, Distrito de Oyón, además recibe los concentrados de Pb-Ag bajo manganeso (Mn) proveniente de la planta de lavado ácido. El yeso producido en la planta será almacenado en un área externa al edificio de almacenamiento de concentrados.

En el ingreso los camiones son pesados antes de su descarga en el edificio de almacenamiento.

En la figura 11, se aprecia el diagrama de bloques del área de Molienda y Filtrado. El concentrado Pb-Ag alto Mn es alimentado al sistema de molienda mediante un cargador frontal y un sistema de fajas transportadoras que descargan el concentrado en el molino de bolas, que tiene por finalidad desmenuzar los grumos del concentrado de Pb-Ag con alto Manganeso (Mn) que ingresan al edificio de almacenamiento y así formar la pulpa de concentrados que es enviada a los tanques de homogenización.

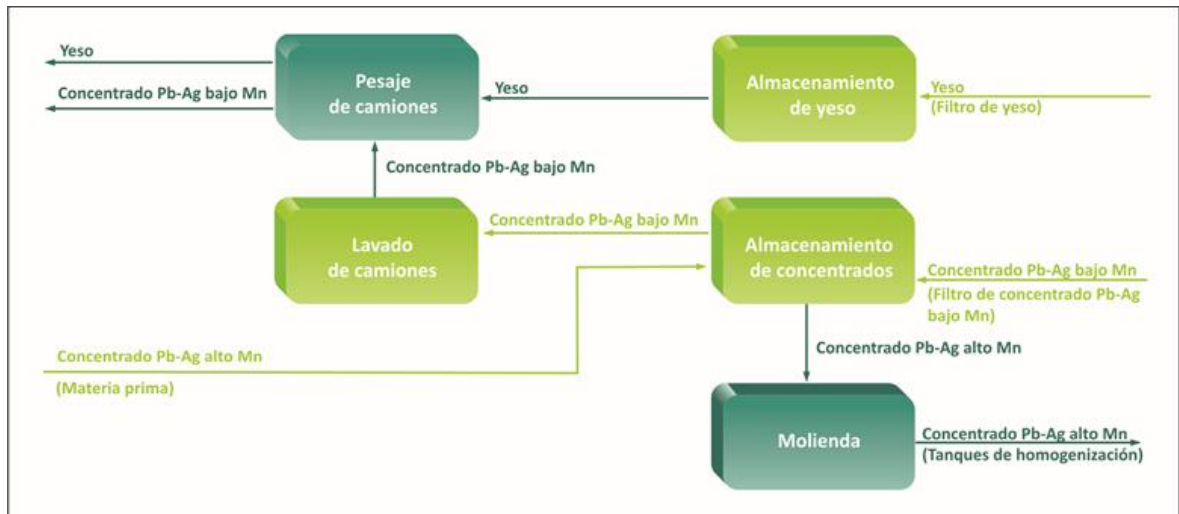


Figura 11. Diagrama de bloques del área de molienda del manual de Operaciones Río Seco

En la planta de Río Seco se contempla el procesamiento de concentrados Pb-Ag alto manganeso (Mn), en el que se encuentran distribuidas dos formas mineralógicas principales de manganeso, que corresponde al carbonato de manganeso ( $MnCO_3$ ) y sulfuro de manganeso ( $MnS$ ), conocidos como rodocrosita y alabandita, respectivamente.

En la figura 12 se muestra el diagrama de flujos del sistema de molienda. El molino de bolas tiene como función desmenuzar los grumos del concentrado de alto manganeso (Mn), formados como consecuencia de la oxidación de la alabandita ( $MnS$ ), formando entonces una pulpa. La pulpa obtenida en el molino tiene aproximadamente un 60% de sólidos

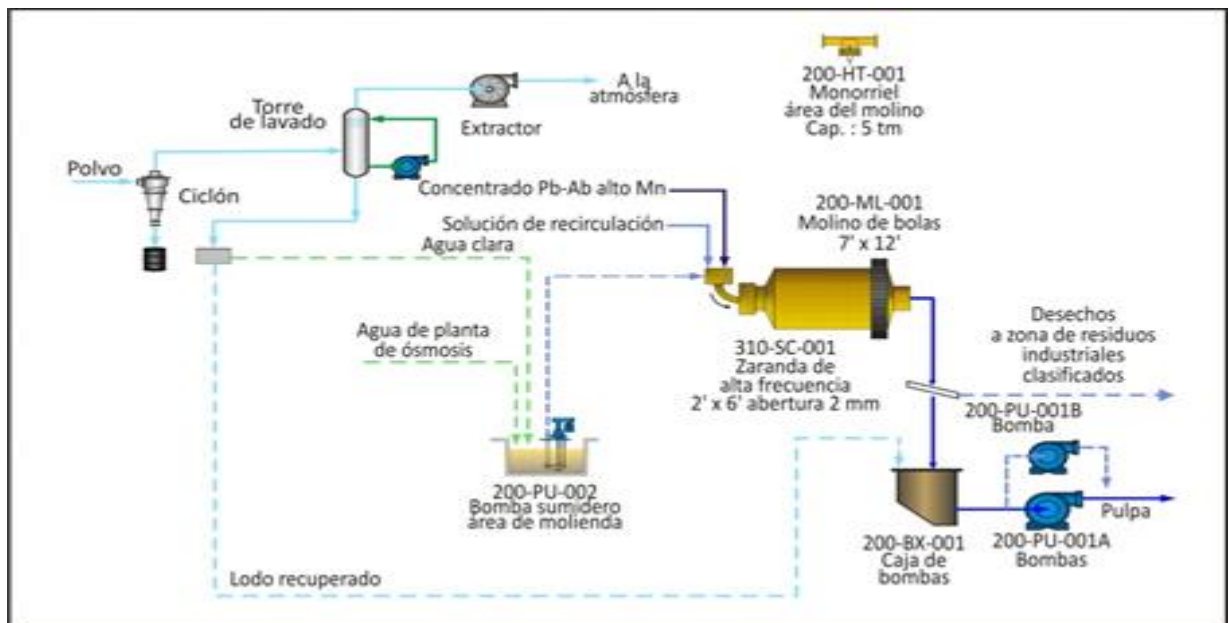


Figura 12. Diagrama de flujos del sistema de molienda del manual de Operaciones Río Seco

La pulpa descargada del molino de bolas pasa a través de una zaranda vibratoria de alta frecuencia, de simple deck, con aberturas de 2 mm; esta zaranda tiene como función de separar de la pulpa el material orgánico, dejando pasar la pulpa limpia hacia el cajón de bombas de 32,76 m<sup>3</sup>/h de capacidad, así el material orgánico retenido en la zaranda es enviado a la zona de residuos industriales clasificados. La pulpa de concentrados se impulsa hasta los tanques de homogenización.

### 3.2.2.2. Lavado ácido de Carbonatos y Sulfuros

La pulpa de concentrado Pb-Ag alto manganeso (Mn), que tiene como especies mineralógicas principales a la alabandita (MnS) y la rodocrosita (MnCO<sub>3</sub>), viene del área de molienda e ingresa a los tanques homogenizadores, donde la pulpa es sometida a agitación, alimentando de pulpa homogenizada a la etapa de neutralización. Las características del manganeso en el sólido en los tanques de homogenización es de 20.14%.

El underflow del espesador de pulpa neutra alimenta al tanque de lavado ácido de carbonatos, donde son lixiviados los carbonatos y luego pasa al tanque de lavado ácido de concentrados para la lixiviación de manganeso, usando ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) como agente de disolución para ambos sistemas y desde aquí se alimenta de pulpa lixiviada al área de flotación. En el lavado ácido y en la flotación existe la formación de una corriente gaseosa ( $H_2S$ , principalmente) que es alimentada a la planta de producción de ácido sulfúrico.

En la figura 13, apreciamos el recorrido del concentrado plomo-plata con alto manganeso por la Planta de Lavado Ácido y la pre-lixiviación que se realiza en el área de Neutralización.

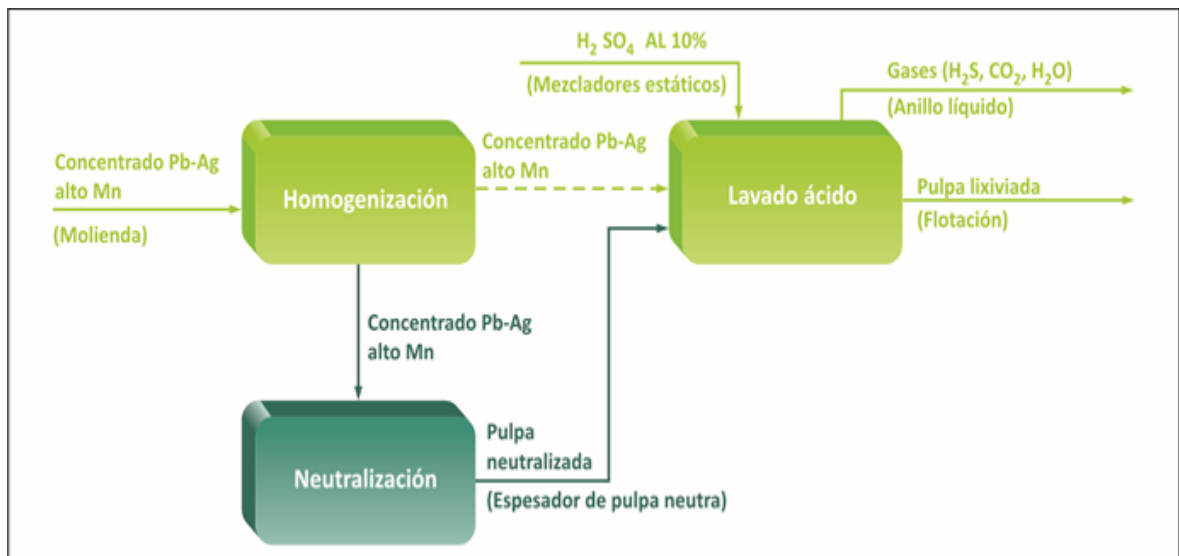


Figura 13. Diagrama de bloques del área de lavado ácido del manual de Operaciones Río Seco

El underflow procedente del espesador high rate de solución neutralizada es enviado mediante las bombas peristálticas de pulpa de 5,46 m<sup>3</sup>/h, al tanque cilíndrico horizontal de lavado ácido para carbonatos, que cuenta con 4 cámaras, cada una con su respectivo sistema de agitación, los que poseen sellos mecánicos para evitar fugas de gases del proceso al exterior. A este tanque se adiciona también ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) al 10%, como agente de lixiviación de los carbonatos que llegan en el concentrado.

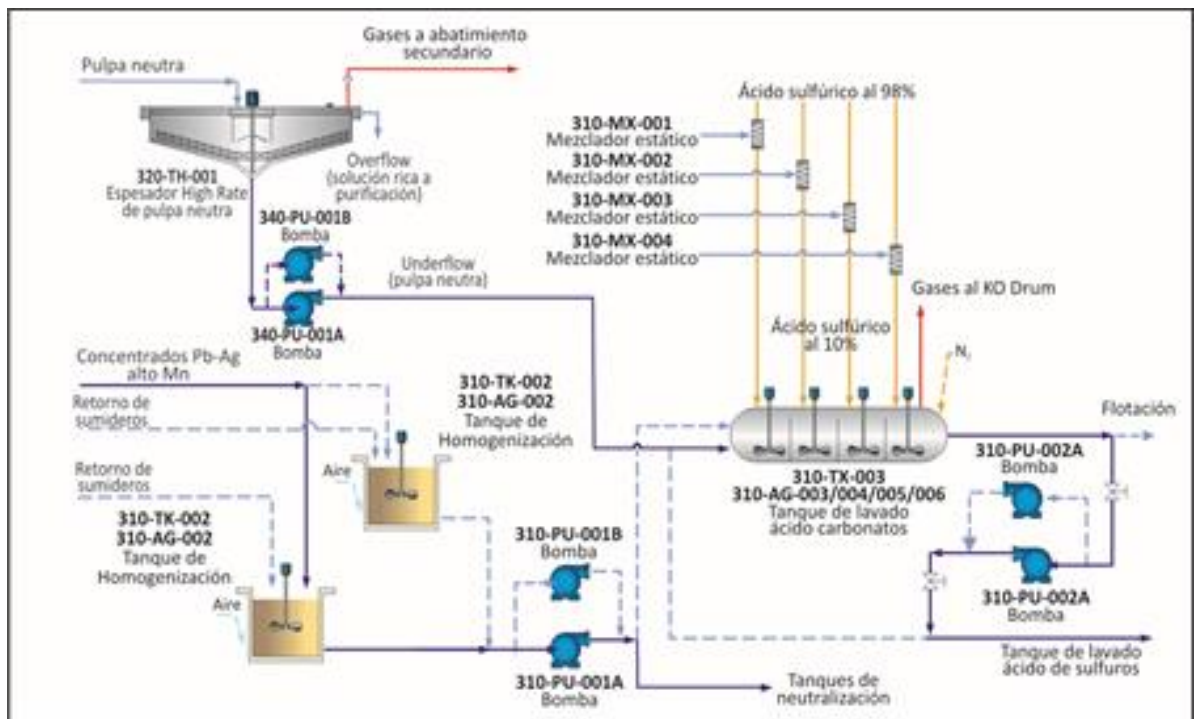


Figura 14. Diagrama de flujos de la alimentación de pulpa al área de lavado ácido del manual de Operaciones Río Seco

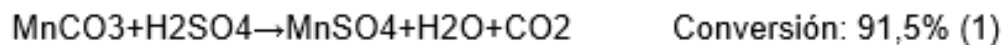
En la figura 14, nos muestra la dosificación de ácido sulfúrico a los reactores de carbonatos y sulfuros para el lavado del concentrado (lixiviación).

En el tanque de lavado ácido de carbonatos reacciona principalmente el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) y carbonato de manganeso (MnCO<sub>3</sub>) con el ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) para producir sulfato de calcio (CaSO<sub>4</sub>, yeso) y sulfato de manganeso (MnSO<sub>4</sub>). Las

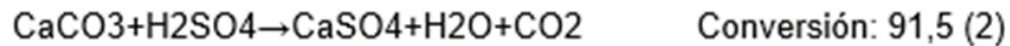


principales reacciones que toman lugar en este sistema son mostradas en las Ecuaciones 1, 2 y 3:

*Ecuación 1 Reacción del Carbonato de Manganeso*



*Ecuación 2 Reacción del Carbonato de Calcio*



*Ecuación 3 Reacción del Sulfato de Manganeso*



Los carbonatos son sales derivadas del ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), se trata de minerales que aportan alcalinidad al medio donde se encuentran ( $\text{pH} > 7$ ) y por tanto se constituyen en minerales consumidores de acidez en sistemas de lixiviación ácida. Las Ecuaciones 1 y 2 muestran como el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) reacciona con los carbonatos presentes en la pulpa concentrados alimentada al tanque de lavado ácido de carbonatos, consiguiendo con ello el descenso del pH ( $\text{pH} \approx 4$ ) del medio; acondicionando la pulpa para la lixiviación en medio ácido del sulfuro de manganeso, (alabandita,  $\text{MnS}$ ), en el tanque de lavado ácido de sulfuros. Las características del manganeso en el sólido que abandona el tanque de lavado ácido de carbonatos y alimenta al tanque de sulfuros es de 12.33%.



La pulpa procedente del tanque de lavado ácido de carbonatos es impulsada por las bombas peristálticas de pulpa de 15,88 m<sup>3</sup>/h de capacidad. La tubería de conducción de un tanque al otro es de 3”.

En el tanque de lavado ácido de sulfuros cuenta con 4 cámaras, cada una con su respectivo sistema de agitación, los que poseen sellos mecánicos para evitar fugas de gases del proceso al exterior, en este tanque se adiciona ácido sulfúrico al 10%.

Al tanque de lavado ácido de sulfuros se alimenta ácido sulfúrico al 10%, el que se obtiene mezclando ácido sulfúrico al 98% con solución de recirculación proveniente del tanque. Para esta operación se utilizan los mezcladores estáticos en línea, cada uno de 2,12 m<sup>3</sup>/h de capacidad.

Las reacciones principales que se producen en el tanque están representadas en las Ecuaciones 4, 5 y 6:

*Ecuación 4 Reacción del Carbonato de Calcio*



*Ecuación 5 Reacción del Carbonato de Manganeso*



*Ecuación 6 Reacción del Sulfato de Manganeso*



Las características del manganeso en el sólido que abandona el tanque de lavado ácido de sulfuros y alimenta al área de flotación es de 2.3%.





### 3.2.2.3. Flotación y Espesamiento

La pulpa de concentrados lixiviada proveniente de los tanques de lavado ácido y la solución de recirculación es alimentada al sistema de flotación, el mismo que cuenta con 12 celdas dispuestas en 3 bancos de 4 celdas cada uno, donde por medio de un proceso de flotación se separa el concentrado Pb-Ag bajo Mn (concentrados) del yeso (relaves).

La flotación es una técnica de concentración que aprovecha la diferencia entre las propiedades superficiales o interfaciales de los minerales. Se basa en la adhesión de algunos sólidos en espumas generadas por las burbujas de H<sub>2</sub>S gaseoso recirculado. Las burbujas de gas transportan los sólidos a la superficie donde son recolectados y recuperados como concentrado. La fracción que no se adhiere a las burbujas permanece en la pulpa y constituye la cola o relave.

La espuma se produce gracias a los reactivos espumantes, la agitación y la inyección de gas. La captación del mineral en las burbujas producidas es dependiente también del tamaño de las partículas de mineral y los reactivos colectores agregados.

La espuma es retirada como concentrado de Pb-Ag bajo Mn. El concentrado de cada celda se extrae a medida que este se mueve de un banco al siguiente. El concentrado de Pb-Ag bajo Mn en la pulpa disminuye uniformemente hasta que el contenido concentrado de Pb-Ag bajo Mn en el relave (yeso) que sale de la última celda sea aceptable.

El concentrado y el relave generado en las celdas de flotación alimentan a los espesadores de concentrado Pb-Ag bajo Mn y de yeso respectivamente. El espesamiento es una operación de separación de la pulpa en dos corrientes, una líquida u overflow y una sólida ó underflow.

En la figura 15 encontramos el diagrama de bloques del área de flotación y espesamiento.

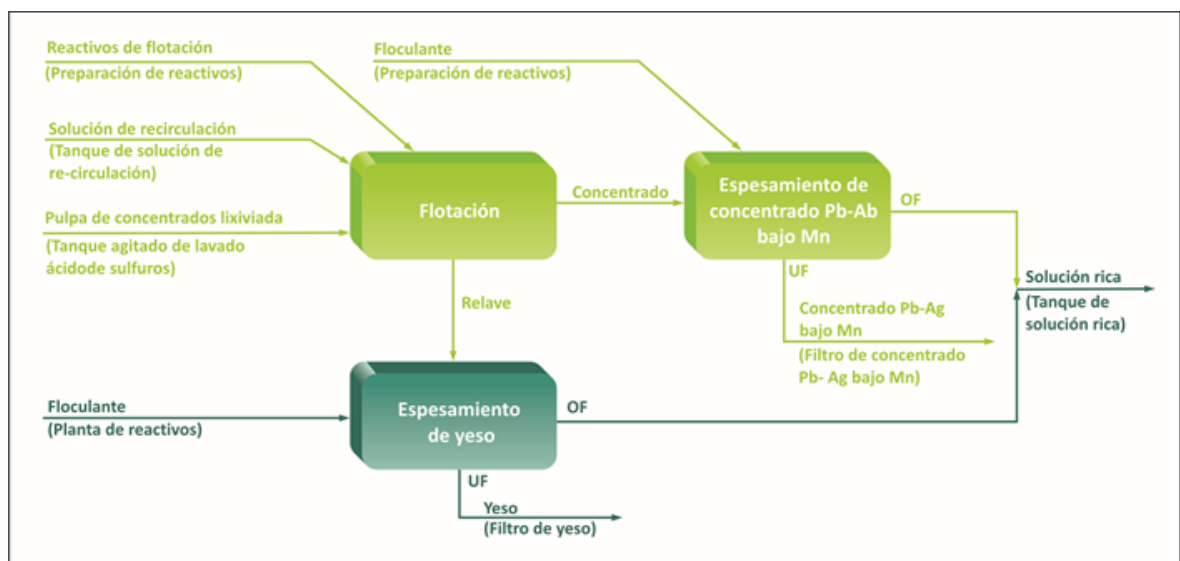


Figura 15. Diagrama de bloques del área de flotación y espesamiento del manual de Operaciones Río Seco

El espesador high rate (de alta capacidad) de concentrado Pb-Ag bajo Mn auto-soportado (320-TH-001) es un equipo que tiene por finalidad incrementar la densidad del flujo de pulpa. Consiste de un tanque cilíndrico de fondo inclinado, alimentado por la parte central. Este equipo disminuye la energía cinética de pulpa, permite la dispersión homogénea del material y la sedimentación del sólido. Presenta un mecanismo de brazos (rastras) que giran y centralizan la pulpa de concentrados depositada en el fondo del tanque (underflow) la cual es descargada en la parte central del espesador. Un rebose periférico



ubicado en la parte superior del tanque (canaletas de rebose) permite evacuar la solución clarificada (overflow).

#### **3.2.2.4. Producción de ácido sulfúrico con tecnología WSA**

El proceso de la WSA (wet sulfuric acid) es un proceso para la conversión de corrientes sulfurosas en ácido sulfúrico desarrollado por Haldor Topsoe A/S, Dinamarca. Desde su introducción en la década de 1980, el proceso de la WSA ha sido reconocido como un proceso eficiente para recuperar azufre de diversas fuentes en la forma de ácido sulfúrico de calidad comercial. El proceso de la WSA ha encontrado una amplia aplicación en las refinerías, petróleo e industrias basadas en el carbón, la industria metalúrgica, la industria del acero (coquización), la industria de la energía y la industria de la celulosa. Más de 60 plantas se han licenciado en todo el mundo para el tratamiento del proceso de gases en una amplia gama de industrias de proceso de solicitud.

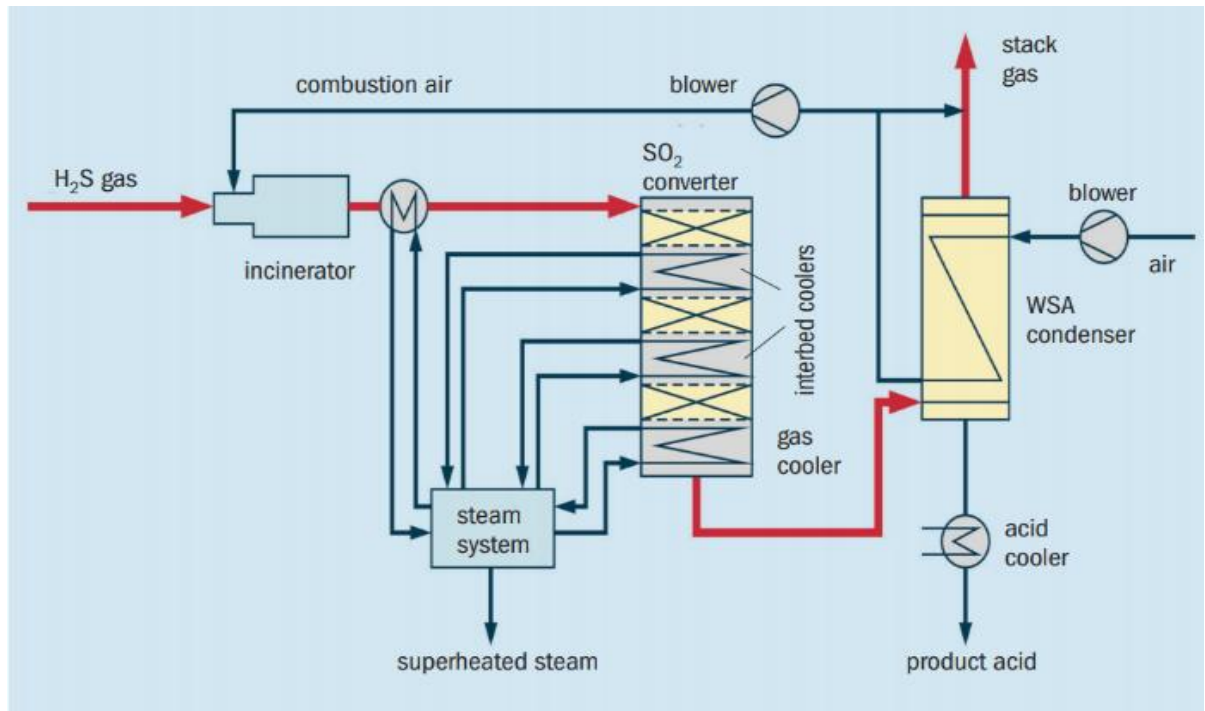


Figura 16. Proceso WSA para gas  $\text{H}_2\text{S}$ .

La figura 16 muestra el diagrama de flujos del recorrido del gas ácido (líneas rojas), el vapor sobrecalentado y saturado (líneas celestes) y el aire de combustión y de enfriamiento (líneas azules).

El gas de alimentación contiene en promedio 25%  $\text{H}_2\text{S}$ . El gas incinerado normalmente contiene 5-6%  $\text{SO}_2$  y toda el agua de la combustión del  $\text{H}_2\text{S}$  y otros combustibles. El gas que sale de la caldera de calor residual a una temperatura de aproximadamente 400 ° C.

Luego, el gas ingresa al reactor de  $\text{SO}_2$  que contiene tres lechos catalíticos por las condiciones del proceso y el grado de conversión deseado. Como la reacción en el reactor es exotérmica, el gas se enfría entre los lechos para optimizar el equilibrio  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ . El calor de reacción se recupera en forma de vapor. El vapor saturado a 50-60 barg se genera

típicamente en la caldera de calor residual y en el enfriador de gas aguas debajo del reactor de SO<sub>2</sub>. El vapor saturado extraído del tambor de vapor se utiliza luego para enfriar entre las etapas del reactor catalítico y es exportado como vapor sobrecalentado, típicamente más de 400 ° C, y es enviado al generador de energía eléctrica.

Tabla 1.

*Reacción en plantas WSA y SNOX*

<b>Combustion</b>	$H_2S + \frac{3}{2} O_2 \rightarrow H_2O + SO_2$	+ 518 kJ/mole
<b>Oxidation</b>	$SO_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow SO_3$	+ 99 kJ/mole
<b>Hydration</b>	$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 (gas)$	+ 101 kJ/mole
<b>Condensation</b>	$H_2SO_4 (gas) + 0.17 H_2O (gas) \rightarrow H_2SO_4 (liq)$	+ 69 kJ/mole

Después en la última etapa de conversión, el gas se enfría y la mayor parte del SO<sub>3</sub> reacciona con el agua-vapor y forma ácido sulfúrico en fase gaseosa (Tabla 1).

La presión de vapor requerida está determinada por el contenido de SO<sub>3</sub> y agua en el proceso del gas de tal manera que todas las temperaturas superficiales están muy por encima del punto de rocío ácido. Los materiales de construcción de la planta WSA son generalmente de acero al carbono, excepto donde la temperatura de diseño necesita acero resistente al calor (inoxidable). La cámara de combustión del quemador de H<sub>2</sub>S y la entrada de la caldera de calor residual está protegida por revestimiento refractario.

Las partes del condensador WSA en contacto con el ácido de condensación estarán protegidas por un revestimiento de polímero-fluorados (PTFE) y la parte inferior del condensador está revestida con ladrillos resistentes a los ácidos. El gas de proceso ingresa al condensador WSA donde se da la hidratación final y da lugar a la condensación de ácido. El condensador WSA (Fig.17) es una cámara que en su interior se encuentran tubos

de vidrio de borosilicato resistente al choque de calor y ácido. El enfriador de ácido es típicamente hecho de Hastelloy C (aleación de níquel, molibdeno, cromo). La bomba ácida está forrada y tiene acoplamiento magnético.

Es en el condensador donde se van a presentar los problemas de rotura de los tubos de vidrio y es donde se implementará la mejora operativa para su correcto cuidado.

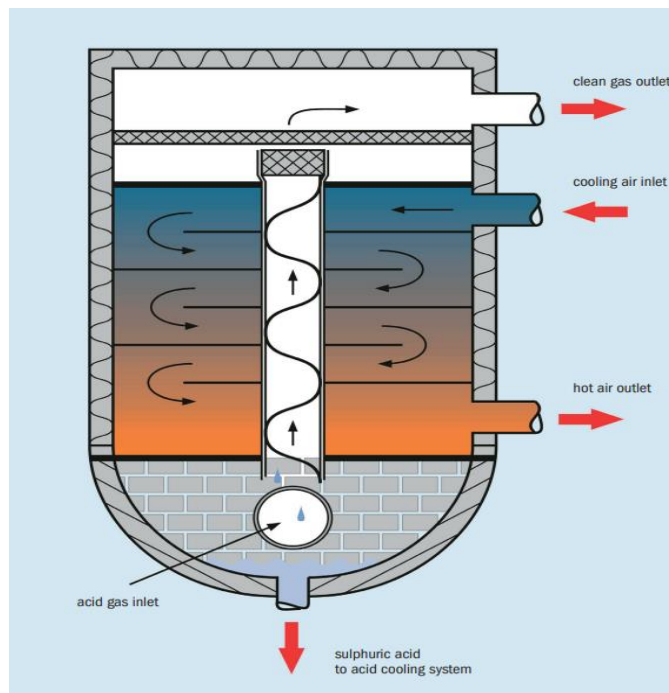


Figura 17. Condensador WSA

### 3.2.2.5. Producción de Sulfato de Mn

El sulfato de manganeso monohidratado producido en la Procesadora industrial Río Seco tiene como características las de ser un polvo blanco con ligera coloración rosa, y olor propio característico del producto, como se puede apreciar en la tabla 2.



Tabla 2.

*Composición e ingredientes de sulfato de manganeso monohidratado*

COMPONENTES DEL MATERIAL	NÚMERO CAS (Chemical Abstracts Service)	EC N°	PORCENTAJE APROXIMADO EN PESO	ACGIH TLV	OHSAS PEL	OTROS LÍMITES
Sulfato de Manganeso Monohidratado	10034-96-5	600-072-9	≥ 95	TWA: 0.2 mg/m <sup>3</sup> [Elemental y comp. inorg., como Mn]	TWA- Ceiling: 5mg/m <sup>3</sup> [Compuestos de Mn]	TWA: 0.2 mg/m <sup>3</sup> [Elemental y comp. inorg., como Mn].  [Normativa Nacional]

No es inflamable o combustible en condiciones normales de transporte y almacenamiento. Sin embargo, se generan óxidos de azufre y manganeso, productos peligrosos que se liberan de la combustión. La inhalación o ingestión de polvo puede producir efectos agudos y crónicos a la salud.

Tabla 3.

*Propiedades físicas y químicas de sulfato de manganeso monohidratado*

<p><b>APARIENCIA:</b> Polvo blanco con ligera coloración rosa, Higroscópico. Olor característico del producto.</p> <p><b>TEMPERATURA DE EBULLICIÓN:</b> Indeterminado.</p> <p><b>TEMPERATURA DE FUSIÓN:</b> 700°C</p> <p><b>TEMPERATURA DE INFLAMACIÓN:</b> No es inflamable.</p> <p><b>DENSIDAD DE VAPOR (aire=1) --</b></p> <p><b>DENSIDAD RELATIVA (agua=1): --</b></p>	<p><b>SOLUBILIDAD EN AGUA:</b> soluble</p> <p><b>PUNTO DE FLUIDEZ:</b> --</p> <p><b>LÍMITES DE INFLAMABILIDAD:</b> --</p> <p><b>VELOCIDAD DE EVAPORACIÓN (BU A/C=1):</b> --</p> <p><b>VISCOSIDAD:</b> NA</p> <p><b>VOLATILIDAD:</b> --</p> <p><b>PESO MOLECULAR:</b> 168.94 g/mol</p> <p><b>PH:</b> 5-7</p> <p><b>DENSIDAD A 20°C:</b> 2.95 g/cm<sup>3</sup></p>
--	--

### 3.3. Diagnóstico de los procesos de la planta

#### 3.3.1. Análisis de la situación problemática

Para realizar un mejor análisis a la situación problemática se realiza un diagrama de operaciones (figura 18) para entender la relación que tiene el condensador de la planta con los distintos equipos y las diferentes corrientes que entran en contacto en el proceso de la condensación.

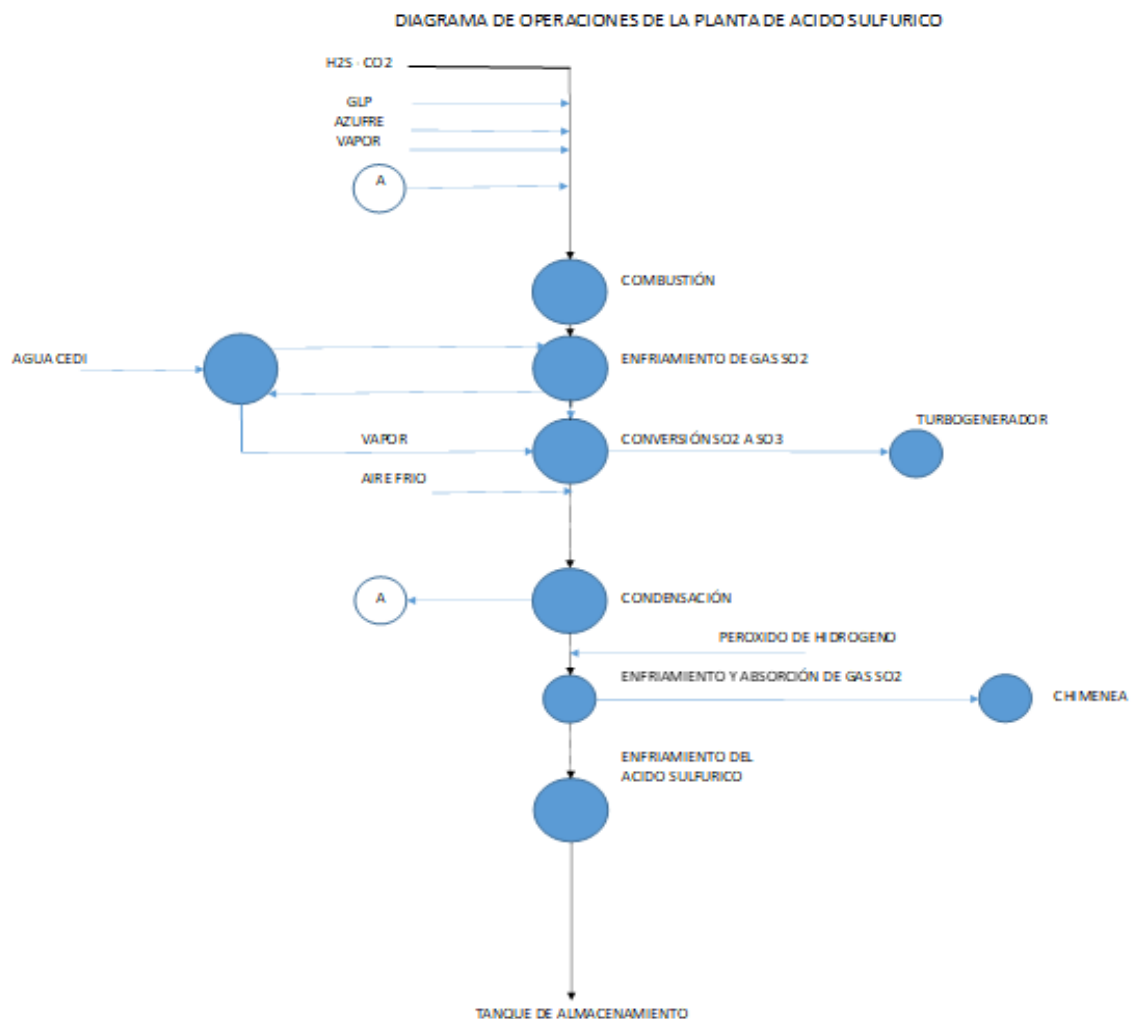


Figura 18. Diagrama de Operaciones de la Planta de ácido sulfúrico. Creación propia.



El Condensador de la Planta WSA, cuenta con dos válvulas que liberan el exceso de aire caliente del sistema, las válvulas son la PDV 36 y PDV 36-B.

La válvula PDV 36, que se muestra resaltado (círculo rojo) en la figura 19, trabaja automáticamente con un lazo de control del diferencial de presión PDT 36, que es la que mantiene un exceso de 4.5 mbar, entre la presión del aire frío con respecto a la del gas de proceso.

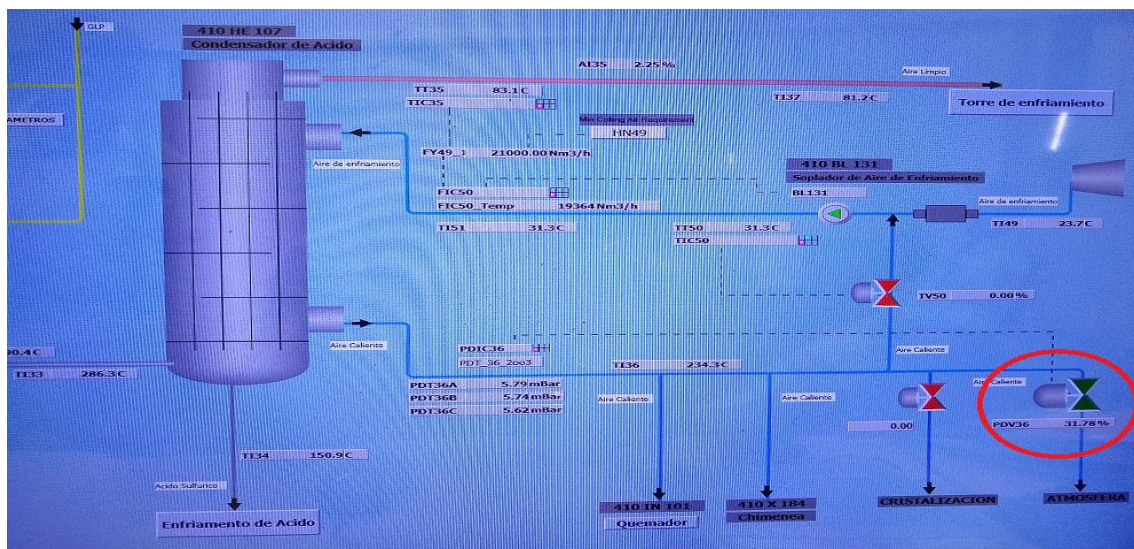


Figura 19. Se resalta la válvula PDV 36 que trabaja en automático.

La válvula PDV 36-B ,marcado en la figura 20, trabaja en manual entre una apertura de 20% a 70% según criterio del Operador, para liberar de manera “más rápida” la temperatura de salida del Condensador (TT35), pero se observa que cuando se apaga la Planta WSA por cualquier motivo (excepto al corte de energía), esta válvula se queda abierta pudiendo provocar problemas en la puesta en marcha de la planta al realizar la

secuencia de arranque incorrecta de los blowers, encendiendo el Blower de aire limpio (BL- 183) primero.

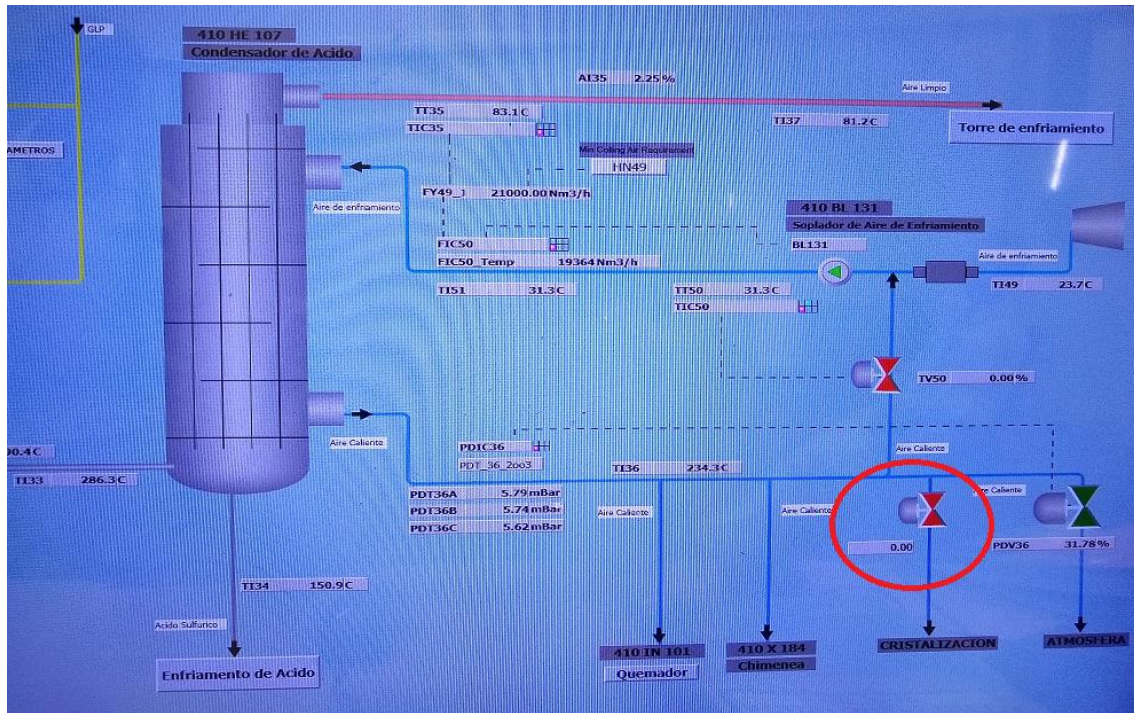


Figura 20. Se resalta la válvula PDV 36-B, que trabaja en manual.

### 3.3.2. Definición de las necesidades de los clientes

La Gerencia de Planta alineado a la Política de mejora continua de la empresa, solicita anualmente a los jefes de turno la elaboración de un proyecto de mejora que ayude a reducir costos, tiempos de parada de planta, reprocesos y que aumente la producción, manteniendo o mejorando la calidad de nuestro producto. Todo esto enfocado a nuestros clientes que se ven satisfechos con la organización y nuestro producto, manteniendo así la buena relación con el mercado nacional y extranjero, siendo el mercado europeo el más exigentes en estándares de calidad.



El superintendente de planta es el que organiza las reuniones para plantear diversas mejoras que se pueden dar en el proceso, distribuyendo a los jefes de turno y supervisores proyectos de mejora según afinidad profesional. En este grupo de trabajo se encuentran profesionales de las carreras de ingeniería química, metalurgia e ingenieros industriales haciendo sinergia para que cada uno de los profesionales logre el proyecto encargado.

### **3.3.3. Identificación de los procesos claves**

El trabajo de mejora propuesto al superintendente de planta es el de reducción de costos en el mantenimiento del condensador de la planta de ácido sulfúrico, encontrando la causa raíz de la fractura de los tubos de vidrio que se encuentran en el interior del condensador, puesto que el mantenimiento de este equipo genera tiempos de parada de planta prolongada, gastos en los repuestos y en personal calificado para la tarea.

Enfocándonos en el condensador de planta de ácido sulfúrico iniciamos el estudio de este equipo para encontrar la falla de la rotura de los tubos de vidrio, revisamos la presión de aire que hay en el proceso, las temperaturas, el comportamiento de las válvulas de liberación de exceso de aire caliente del sistema (tanto en operación como en apagado de planta intempestivo), las características de los tubos de vidrio, el historial de la ubicación de los tubos de vidrio que se encontraron rotos en los mantenimientos programados.



#### **3.3.4. Estrategias de solución**

Se realiza una reunión con personal de mantenimiento y operaciones para elaborar un diagrama de Ishikawa y encontrar las causas de la rotura de los tubos de vidrio de borosilicato. Se detallan las causas encontradas en el diagrama de la figura 21.

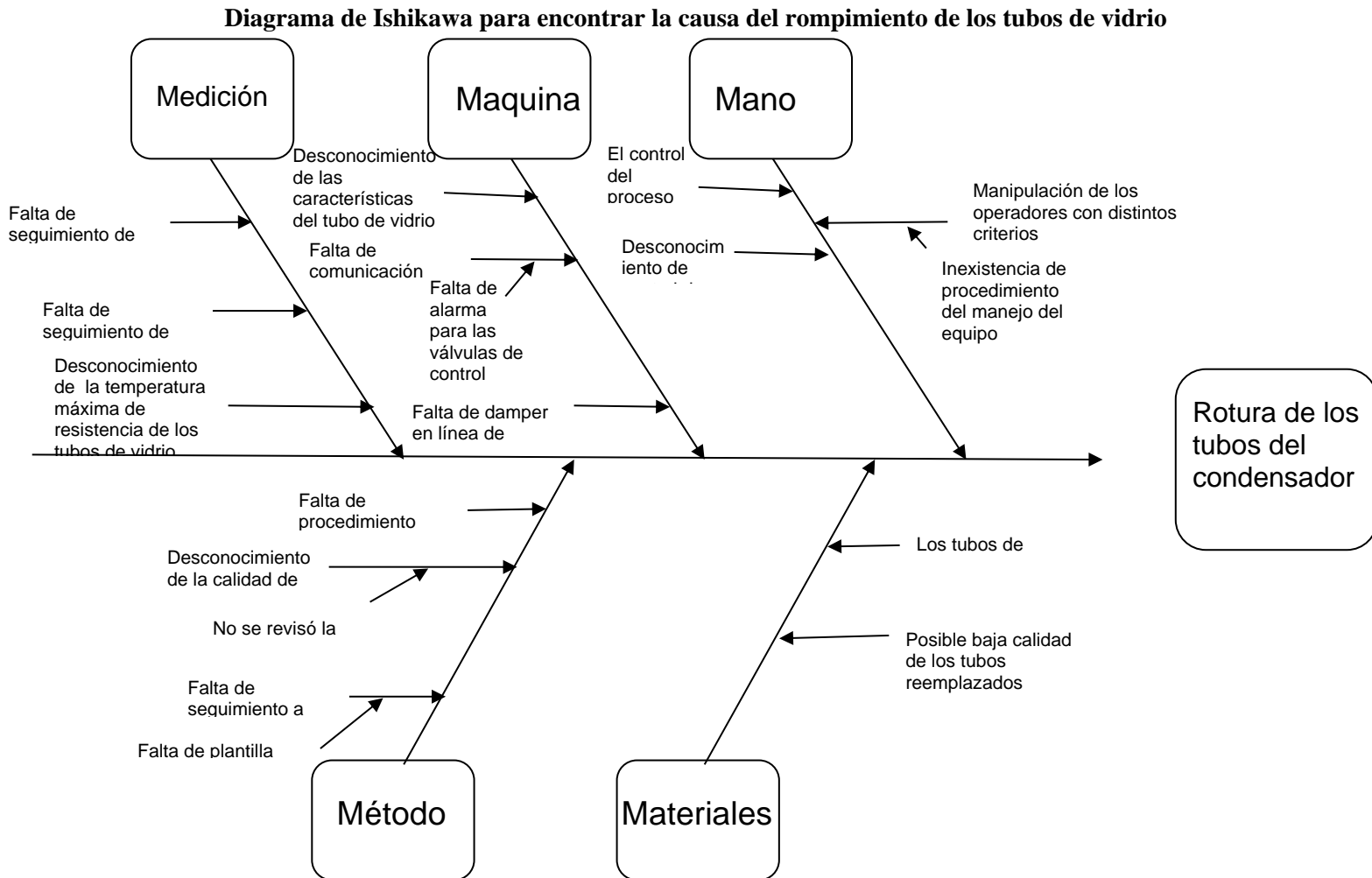


Figura 21. Diagrama de Ishikawa



## Mano de Obra

El control no es estándar: En la tabla 4, se muestra el porcentaje de apertura de las válvulas según el turno de operación. El control de la Planta de ácido sulfúrico no es el mismo para cada operador. Se encuentran operadores que trabajan las válvulas de liberación de calor en el condensador, una en automático y otra en manual de la siguiente manera como muestra el cuadro.

Tabla 4.

*Turno de operación y control de válvula manual de liberación de calor.*

Turno de Operación	Apertura de válvula manual
T1	15 %
T2	25%
T3	70%

## Materiales

Posible baja calidad de los tubos reemplazados: Personal de mantenimiento menciona que los tubos de vidrio reemplazados podrían ser de una baja calidad y que por ello se fracturan. Es por ello que se realiza la revisión de la ficha de datos de los tubos de vidrio, para conocer sus características y propiedades.



## **Métodos**

Falta de seguimiento a los tubos rotos: No se cuenta con una plantilla para identificar la ubicación de los tubos reemplazados, para poder llevar un registro y seguimiento del cambio.

## **Máquina**

Desconocimiento de las características de los tubos de vidrio: Personal de operaciones y de mantenimiento no conocían las características y propiedades de los tubos de borosilicato.

## **Medición**

Mayor observación de la presión y comportamiento de las válvulas de liberación de calor: Se realiza mayor seguimiento al comportamiento de las válvulas de liberación de calor en el condensador, en los diferentes porcentajes de apertura en la válvula manual (PDV 36-B).

### 3.4. ETAPAS DE APLICACIÓN

#### 3.4.1. Etapa de Pre - Definición

La Metodología de las 5W y 1H es una herramienta usada para la identificación de problemas en el proceso productivo, el nombre vienen de las palabras en inglés: Who (Quién), What (Qué), Where (Dónde), When (Cuándo), Why (Por qué) y, por último, H, "How" (Cómo). Usamos esta metodología para poder encontrar el problema de la ruptura de los tubos de vidrio. En la reunión realizada con el personal de mantenimiento y de operaciones, se resalta la deficiencia que se tiene en el registro del cambio de los tubos de vidrio.

Nro	ACTIVIDAD	CAUSA	¿Qué?	¿POR QUÉ?	¿CÓMO?	¿QUIÉN?	¿DÓNDE?	¿CUÁNDO?
			CONTRAMEDIDA					
1	Medición	Falta de seguimiento de las válvulas de liberación del aire caliente del sistema	Cada turno de operación reportará el porcentaje de apertura de las válvulas.	Se requiere uniformizar el porcentaje de apertura de las válvulas en los tres turnos de trabajo.	Reportando en el cuaderno de cambio de turno.	Producción	Sala de Control	3 - enero
2		Falta de seguimiento de las presiones en el condensador.	Cada turno de operación reportará la presión del condensador.	Para que los operadores relacionen la apertura de las válvulas del condensador con la presión del sistema.	Reportando en el cuaderno de cambio de turno.	Producción	Sala de Control	3 - enero
3		Desconocimiento de la temperatura máxima de resistencia de los tubos de vidrio.	Busqueda y lectura de la ficha de datos de los tubos de vidrio.	Es necesario conocer las temperaturas de trabajo de los tubos de vidrio.	Busqueda en manuales y en internet.	Producción	Sala de Control	24 - enero
4	Maquinaria	Desconocimiento de las características del tubo de vidrio	Busqueda y lectura de la ficha de datos de los tubos de vidrio.	Es necesario conocer las propiedades físicas y químicas de los tubos de vidrio.	Busqueda en manuales y en internet.	Producción Mantenimiento	Sala de Control - Taller de Mantenimiento	24 - enero
5		Falta de comunicación para redundante de señal en las válvulas del condensador	Realizar proyecto de mejora para la instalación de redundante.	Mejorar las señales de comunicación entre las mediciones en campo y el valor que indica en sala de control.	Coordinar la instalación del redundante.	Mantenimiento Instrumentación	Planta de Ácido Sulfúrico	Aprobación pendiente
6		Falta de damper en línea de descarga exceso de aire caliente.	Realizar proyecto de mejora para la instalación de damper.	Evitar el ingreso de aire al condensador (a temperatura ambiente), por contracorriente cuando se apaga la planta.	Coordinar con personal de mantenimiento la instalación de damper.	Mantenimiento Mecánico	Planta de Ácido Sulfúrico	Aprobación pendiente

Figura 22. Cuadro de 5W y 1H.

Ishikawa, se realiza la creación de una plantilla para poder identificar, contabilizar y generar un historial del cambio de los tubos en el condensador en el mantenimiento programado de planta. En la figura 22 se muestra la plantilla de la metodología 5W y 1H



que se brinda al personal de mantenimiento para registrar la ubicación de cada tubo reemplazado.

Nro	ACTIVIDAD	CAUSA	¿Qué?	¿POR QUÉ?	¿CÓMO?	¿QUIÉN?	¿DÓNDE?	¿CUÁNDO?
			CONTRAMEDIDA					
7	Mano de Obra	El control del proceso no es estándar	Capacitación de personal de operaciones	Explicar el porque, el control debe ser estándar.	Programa de capacitación	Producción	Sala de Reuniones	14 - mayo
8		Desconocimiento de control de las válvulas del condensador	Capacitación de personal de operaciones	Transmitir las consecuencias de una mala operación del control de las válvulas del condensador.	Programa de capacitación	Producción	Sala de Reuniones	21 - mayo
9		Manipulación de los operadores con distintos criterios	Capacitación de personal de operaciones	Para uniformisar los criterios con los que se debe de controlar el proceso.	Programa de capacitación	Producción	Sala de Reuniones	21 - mayo
10	Método	Falta de procedimiento para control de válvulas del condensador.	Creación de procedimiento de operación del condensador de planta.	Para la capacitación del personal	Creación de procedimiento	Producción	Oficina de Supervisión	2 - mayo
11		Desconocimiento de la calidad de los tubos de vidrio de borosilicato.	Busqueda y lectura de la ficha de datos de los tubos de vidrio.	Para el conocimiento de la Supervisión y Operadores.	Busqueda en manuales y en internet.	Producción	Oficina de Supervisión	20 - febrero
12		Falta de seguimiento a los tubos encontrados rotos.	Creación de plantilla para seguimiento de la ubicación de los tubos rotos.	Generar reporte e historial de cambio de tubos de vidrio y su ubicación en el condensador.	Dibujo de la disposición de los tubos del condensador.	Producción Mantenimiento	Oficina de Supervisión	17 - enero

Figura 23. Cuadro de 5W y 1H.

Nro	ACTIVIDAD	CAUSA	¿Qué?	¿POR QUÉ?	¿CÓMO?	¿QUIÉN?	¿DÓNDE?	¿CUÁNDO?
			CONTRAMEDIDA					
13	Materiales	Los tubos de vidrio de borosilicato son frágiles.	Cuidado del choque térmico	Predomina la ruptura de los tubos de vidrio por esta causa.	Identificando los rangos de temperatura en la cual debe trabajar.	Producción	Oficina de Supervisión	18 - abril
14		Posible baja calidad de los tubos reemplazados	Lectura de la ficha de datos de los tubos de vidrio y la revisión de los reportes de cambios de tubos.	Conocer si la calidad de los repuestos es la adecuada con el reporte de la ubicación de tubos rotos vs tubos cambiados.	Identificar y contabilizar los tubos que fueron cambiados y se volvieron a romper.	Producción	Oficina de Supervisión	12 - abril

Figura 24. Cuadro de 5W y 1H.

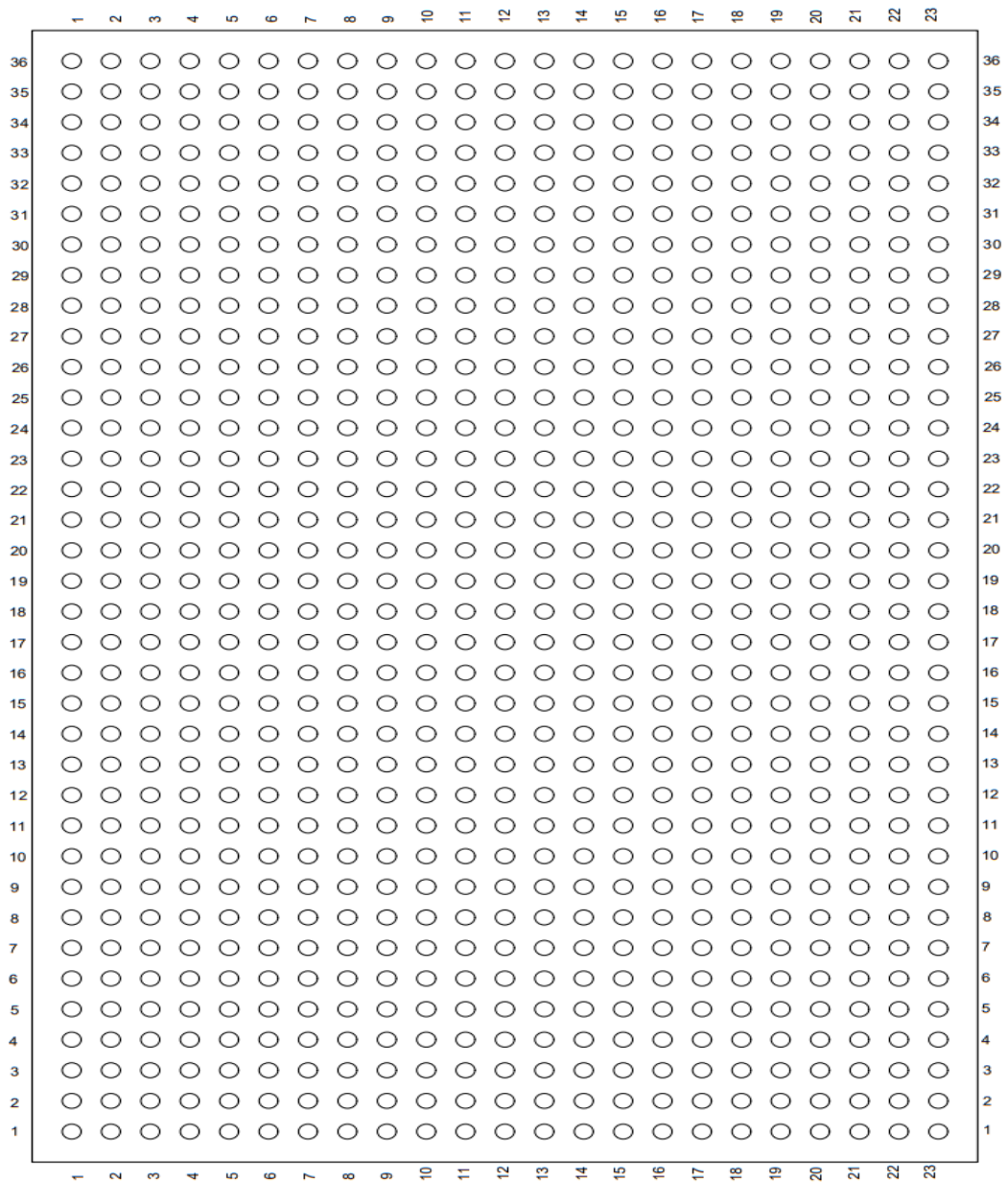


Figura 25. Plantilla de la disposición de los tubos de vidrio de borosilicato en el Condensador de la Planta de ácido sulfúrico.

### 3.4.2. Etapa de Definición

El centro de la investigación es la de encontrar la razón por la cual se rompen los tubos de vidrio, que se encuentran en el interior del condensador de la planta de ácido sulfúrico.

Tabla 5.

*Cuadro de la Definición del Proyecto de mejora operativa.*

Título del Proyecto: Reducción de costos por mejora operativa en el Condensador	
Jefe de Proyecto	Miembros del equipo
Giovani Loayza - Superintendente de Planta	-Jorge Escalante Chacón. -Erik Félix Huallpa -Marco Atencio. -Joel Pinazo Huamán. -Edson Yataco - Supervisor de Taller Electrónico
Caso de negocio:	
La Procesadora Industrial Río Seco reporta en cada parada de planta por mantenimiento un promedio de 140 tubos de vidrio roto en el Condensador de Planta de manera anual.	
Declaración del problema / Oportunidad	Declaración del Objetivo
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los constantes reportes de la ruptura de tubos de vidrio en el condensador.</li> <li>- Alto costo de repuestos.</li> <li>- Retraso en la producción.</li> <li>- Alto costo por mano de obra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducir la cantidad de tubos rotos en el condensador.</li> <li>- Reducir los costos operativos por el cambio de tubos rotos en el condensador.</li> <li>- Validar que los tubos cambiados sean de buena calidad.</li> </ul>
Alcance del Proyecto, riesgos,supuestos:	Partes Interesadas
Este proyecto se realizará en la Procesadora Industrial Río Seco.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operaciones</li> <li>- Mantenimiento</li> </ul>



Riesgos:  Falta de stock en almacén para una mayor cantidad de tubos rotos que no se han previsto.	<ul style="list-style-type: none"><li>- Logística</li><li>- Seguridad</li><li>- Planificación</li></ul>
Planificación Preliminar	Fecha Objetivo
Fecha de comienzo	03/01/2019
FASE DE DEFINIR	10/01/2019
FASE DE MEDIR	24/01/2019
FASE DE ANALIZAR	28/02/2019
FASE DE MEJORAR	11/04/2019
FASE DE CONTROLAR	02/05/2019
Fecha de finalización	30/05/2019

### 3.4.3. Etapa de Medir

Identificando la problemática de la rotura de los tubos de vidrio, investigamos acerca de sus características con sus propiedades físicas y químicas como se muestran en las tablas 6 y 7.

Tabla 6.

*Propiedades físicas de los tubos de borosilicato*

Coeficiente medio de dilatación lineal térmica $\alpha$ (20 °C;300 °C) según ISO 7991	$3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Temperatura de transformación $\bar{T}_g$	525 °C
Temperaturas del vidrio para las viscosidades $\eta$ en dPa · s:	
$10^{13}$ temperatura de enfriamiento superior	560 °C
$10^{7,6}$ temperatura de reblandecimiento	825 °C
$10^4$ temperatura de trabajo	1260 °C
Temperatura máxima admisible para uso de corta duración	500 °C
Densidad $\rho$ a 25 °C	$2,23 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Módulo de elasticidad E (Young's modulus)	$63 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$
Índice de Poisson $\mu$	0,20
Conductividad térmica $\lambda_w$ a 90 °C	$1,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Temp. para la resistencia eléctrica específica de $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ (DIN 52 326) $t_{k100}$	250 °C
Logaritmo de la resistencia eléctrica volumétrica ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	
a 250 °C	8
a 350 °C	6,5
Propiedades dieléctricas (1 MHz, 25 °C)	
Constante dieléctrica $\epsilon$	4,6
Factor de pérdida dieléctrica $\tan \delta$	$37 \cdot 10^{-4}$
Índice de refracción ( $\lambda = 587,6 \text{ nm}$ ) $n_d$	1,473
Coeficiente de tensión óptica (DIN 52 314)	$4,0 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2 \cdot \text{N}^{-1}$

Tabla 7.

*Composición química (componentes principales en aprox. %-peso)*

SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
81	13	4	2

### Resistencia de los tubos de vidrio de borosilicato a los cambios de temperatura

La resistencia a los cambios de temperatura en base a la norma DIN ISO 718 es la temperatura diferencial a la que al sumergir, por ejemplo, la probeta muy caliente en un



baño de agua fría (temperatura ambiente), un 50 % de las probetas muestran indicios de fisuras cuando la inmersión en agua se efectúa de forma rápida. La resistencia a los cambios de temperatura de tubos, capilares y varillas depende del espesor de la pared, de la forma y tamaño de la superficie enfriada repentinamente, del estado de la superficie, de las tensiones existentes y del acabado de los extremos. El calentamiento o enfriamiento irregular y rápido provoca fácilmente la rotura a causa de las tensiones de tracción generadas. Por ello se recomienda que la temperatura diferencial no sea superior a 120 °C. Para espesores de pared grandes esta temperatura diferencial está limitada a valores más pequeños. (Catálogo Vidrasa, 2017, p.13)

El choque térmico es el cambio brusco de un material, este material podría ser un vidrio refractario, que después de salir del horno se pone en contacto con agua fría. En este escenario se da la fractura del vidrio. Se llama choque térmico porque se están enfrentando dos temperaturas diferentes, lo cual provoca que el material se destruya. (Lopez, 1995, p.19)

#### **3.4.4. Etapa de Analizar**

Personal de mantenimiento en la parada de Planta del 09/01/19, con la ayuda de la plantilla creada (figura 25), registra la siguiente disposición de los tubos de vidrio.

Tubos sanos (721 und), y tubos rotos 107 de los cuales se realizó el cambio de 58 und y los que quedan por cambiar 49 und (figura 26). No se logra el cambio total de las tuberías del condensador de planta por falta de stock en el almacén, por tal motivo queda programada una segunda intervención para el reemplazo de los tubos que quedan pendientes para su cambio cuando llegue la importación de los tubos que será para el mes de abril del 2019.



Al ingresar al interior del condensador se observa que la totalidad de los tubos rotos se producen en la zona más caliente del condensador. La zona más caliente del condensador es la parte inferior del equipo y donde ingresa el gas de proceso a una temperatura de 290°C. Esto nos da un indicio de que la rotura de los tubos de vidrio podría ser por choque térmico.

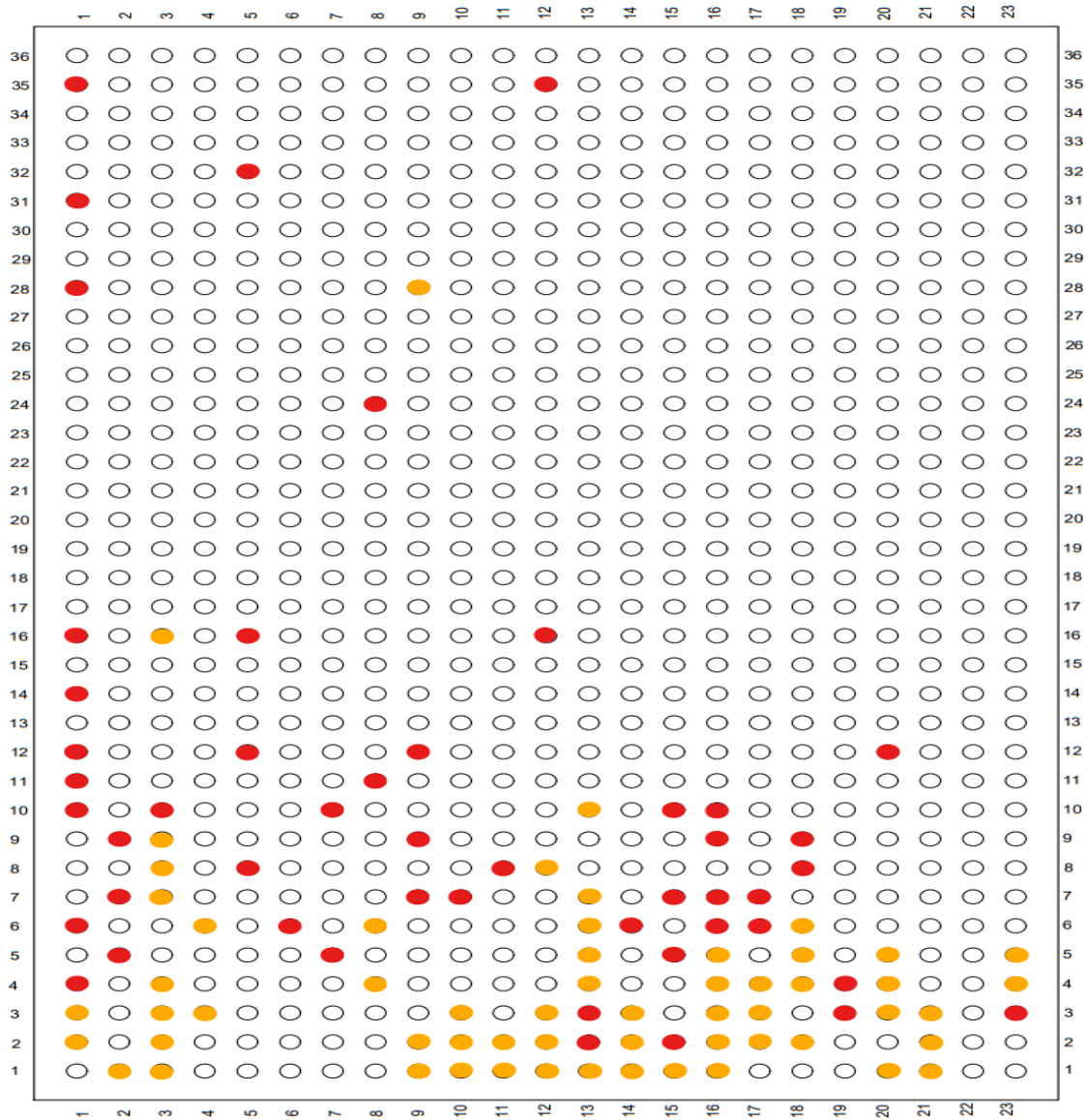
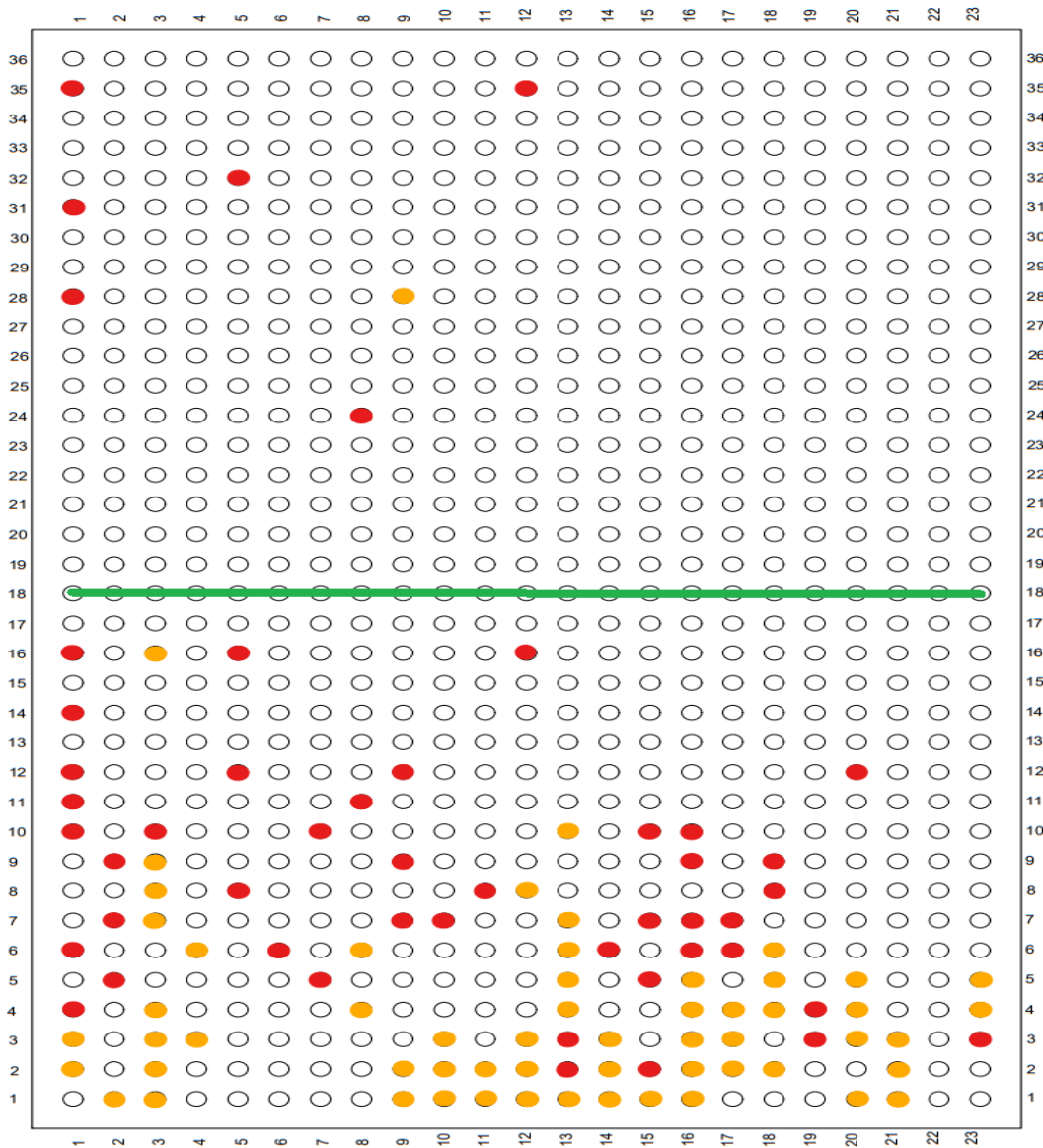


Figura 26. Ubicación de las tuberías de vidrio en la parada de planta de enero 2019

DESCRIPCIÓN
<b>O 721 Tubos sanos</b>
<b>O 49 tubos rotos (pendiente por cambiar)</b>
<b>O 58 Tubos Cambiados</b>



Analizando el registro del personal de mantenimiento en la parada de planta se traza una línea por la mitad del condensador (línea verde) donde podemos apreciar que existe una zona donde es más probable la rotura de los tubos del condensador, como se muestra en la figura 27. Esta zona la identificamos como la más sensible o propensa a roturas de los tubos y es la que se encuentra más cerca a las válvulas de liberación del exceso de aire caliente del condensador, las válvulas PDV 36 y PDV 36-B.



**LADO VÁLVULAS PDV 36, PDV 36-B**

Figura 27. Reconocimiento del área más propensa a la rotura de los tubos

En la parada de mayo del 2019, se aprecian los siguientes tubos rotos (82 und),  
distribuidos de la forma como se aprecia en la figura 28.

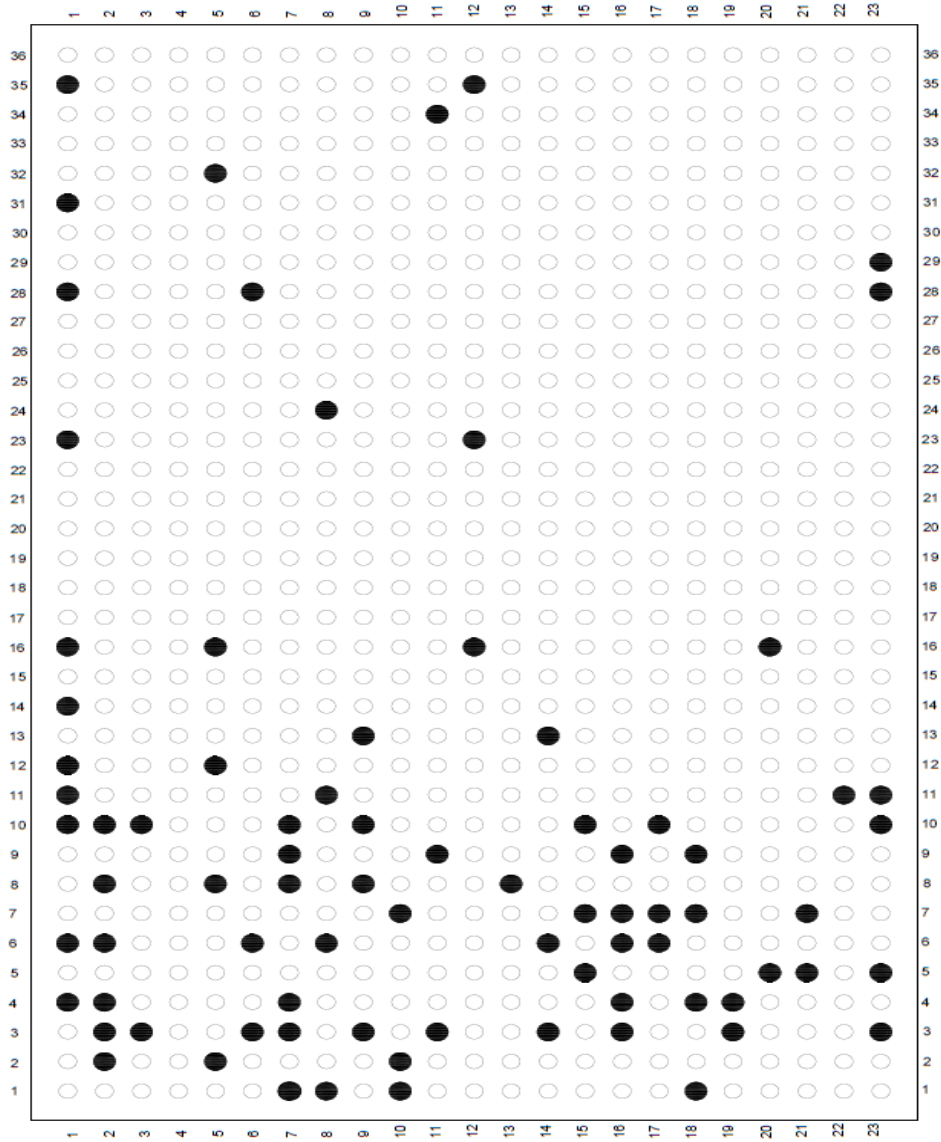


Figura 28. Ubicación de las tuberías de vidrio en la parada de planta de mayo 2019

DESCRIPCIÓN	
	746 Tubos sanos
	82 Tubos fraccionados

Haciendo la comparación del reporte de los tubos rotos en la parada de planta de enero (figura 26) y el reporte de los tubos rotos del mes de mayo (figura 28), se realiza la plantilla de la figura 29, en ella nos muestra 37 nuevos tubos rotos entre los meses de enero y mayo.

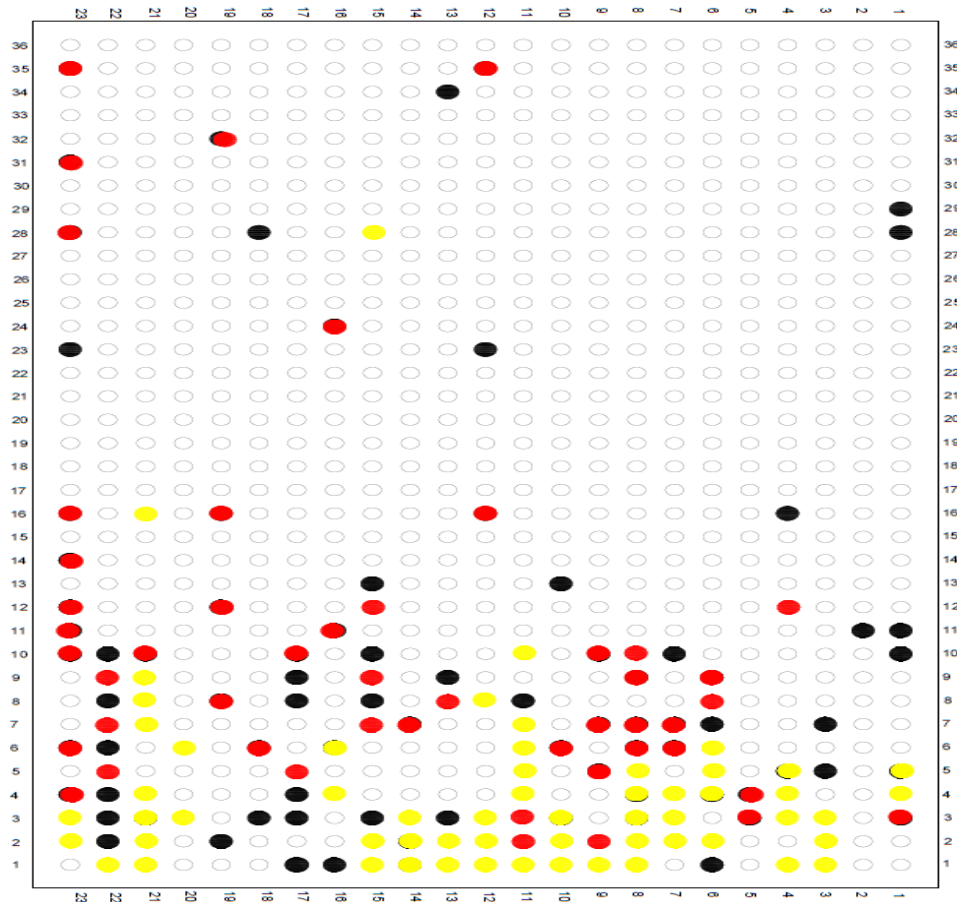


Figura 29. Análisis de la ubicación de los tubos en la parada de planta de enero y mayo

### LADO VÁLVULAS PDV 36, PDV 36-B

DESCRIPCIÓN
● 37 Nuevos Tubos rotos parada de mayo 2019
● 49 Saldo de Tubos rotos en Parada enero - 19
● 58 Tubos cambiados en Parada enero - 19



Culminado el mantenimiento del Condensador en la fecha 17/01/19, y luego de entrar en operación, se tuvo una parada de la planta intempestiva por corte de energía el día 26/01/19 observando en pantalla el funcionamiento de las válvulas PDV 36 y PDV 36-B.

Se observó que, al momento del apagado de la Planta, la válvula PDV 36-B se mantenía abierta en manual.

Los blowers de la planta, al encontrarse apagados, no generan presión en el Sistema y con la válvula PDV 36-B abierta, expone a los tubos del condensador al ingreso de aire del medio ambiente a presión atmosférica.

Ante esta observación y la problemática de la operación de las válvulas de liberación de calor, nos concentramos en poder sustentar que con una sola válvula de liberación es suficiente para el trabajo del condensador y que con el trabajo de la válvula PDV 36 (la válvula automática) el proceso se mantendrá estable, sin la necesidad de aperturar la válvula PDV 36-B (la válvula manual).

Se realiza el seguimiento del comportamiento del proceso en la posición de la válvula manual a una apertura del 15%, tal como lo trabaja el turno 1 de operaciones (tabla N° 4).

Progresivamente se va cerrando hasta el 0% la válvula manual (PDV 36-B) y podemos observar que la válvula automática trabaja entre 30% y 32%, sin afectar el proceso y sin ninguna restricción de la liberación de aire caliente del condensador.

El seguimiento duró 44 días, en los cuales no observamos la necesidad de aperturar la válvula PDV 36-B y en este tiempo pudimos observar que en cada parada de planta

intempestiva los tubos del condensador no se veían expuestos al ingreso de aire del medio ambiente causando la fractura de los mismos.

La temperatura ambiente medida en la planta con el sensor de temperatura TT 50, se mantiene entre 18°C y 23 ° C. En el interior del Condensador en promedio la temperatura está en 290 °C. Al ingresar el aire con temperatura ambiente por contracorriente produce el choque térmico que conlleva a la fractura de los tubos de vidrio del condensador de planta.

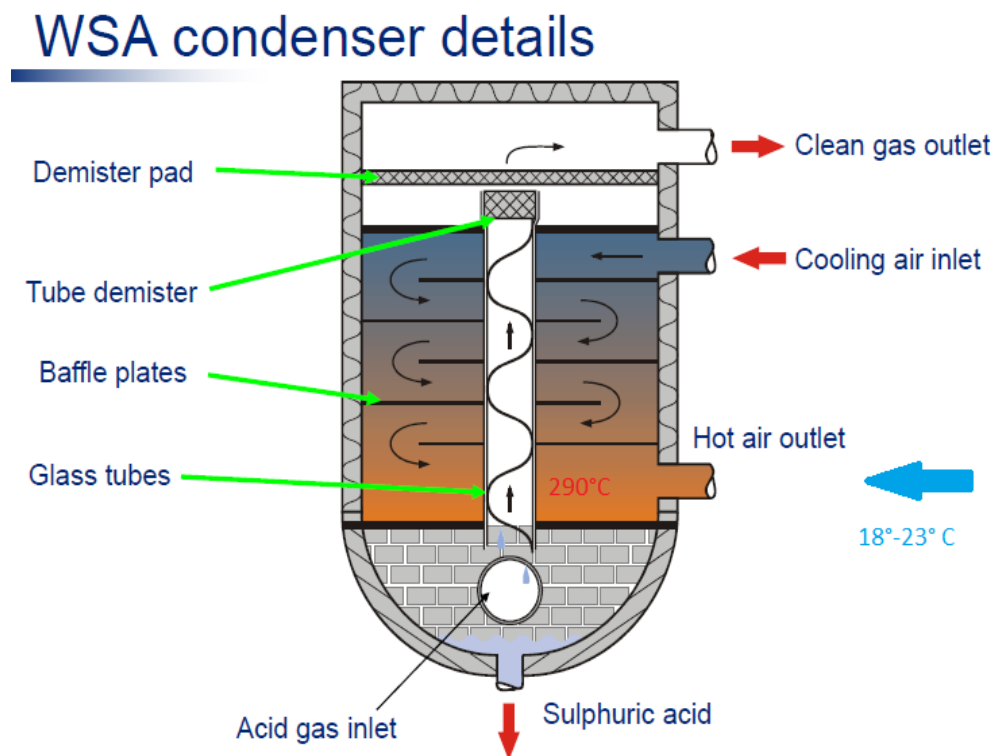


Figura 30. Ingreso de aire del medio ambiente por contracorriente

Los datos técnicos de los tubos de vidrio de Borosilicato 3.3, recomiendan que, para evitar el choque térmico, la temperatura diferencial no debe superar los  $120^{\circ}\text{C}$ . Teniendo nosotros entre la temperatura del Condensador ( $290^{\circ}\text{C}$ ) y la del medio ambiente ( $23^{\circ}\text{C}$ ), brinda como resultado un diferencial de temperaturas de  $267^{\circ}\text{C}$ . Esto nos asegura que la rotura de los tubos de vidrio es por choque térmico.

Los tubos rotos encontrados, presentan la fractura en la zona resaltada de la figura 31, que coincide con el área de mayor temperatura del Condensador (parte inferior).

## WSA condenser details

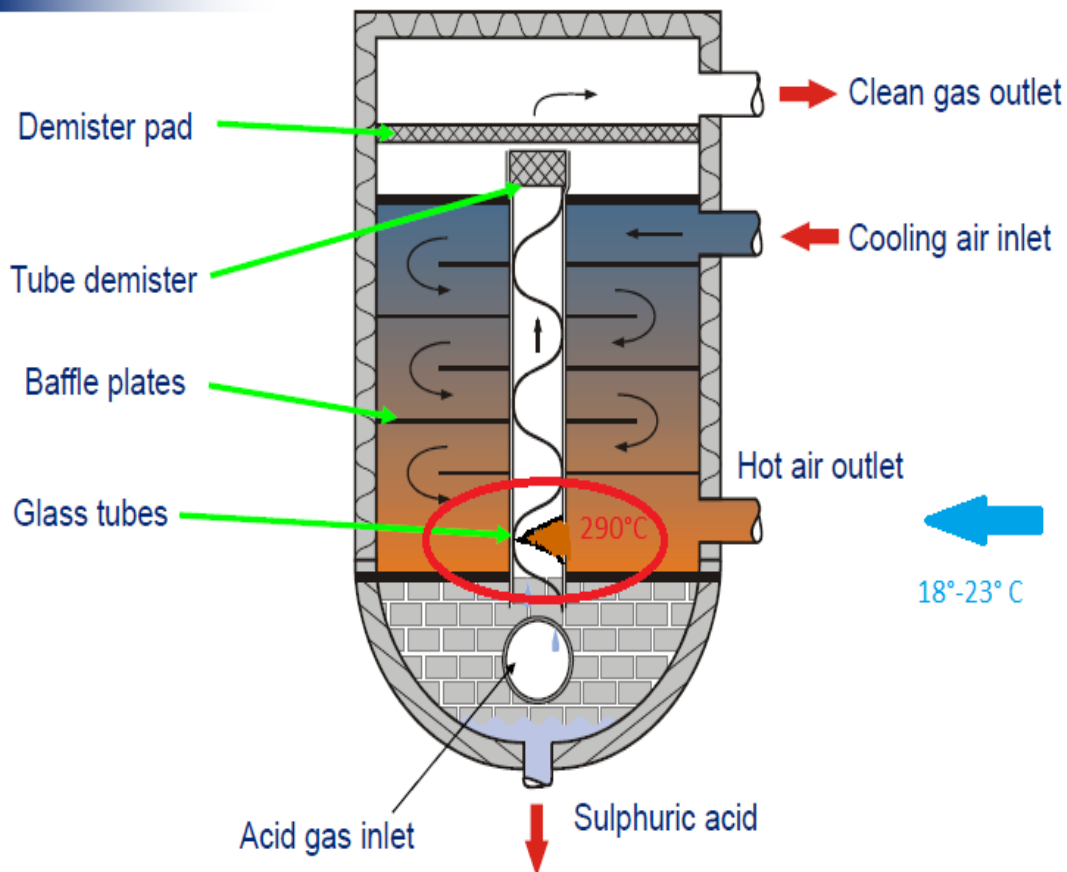


Figura 31. Zona resaltada de la ubicación de la rotura de los tubos del condensador

En la figura 32, se resalta la válvula PDV 36-B trabajando totalmente cerrada, para evitar un choque brusco de temperatura al momento que se apague la Planta WSA.

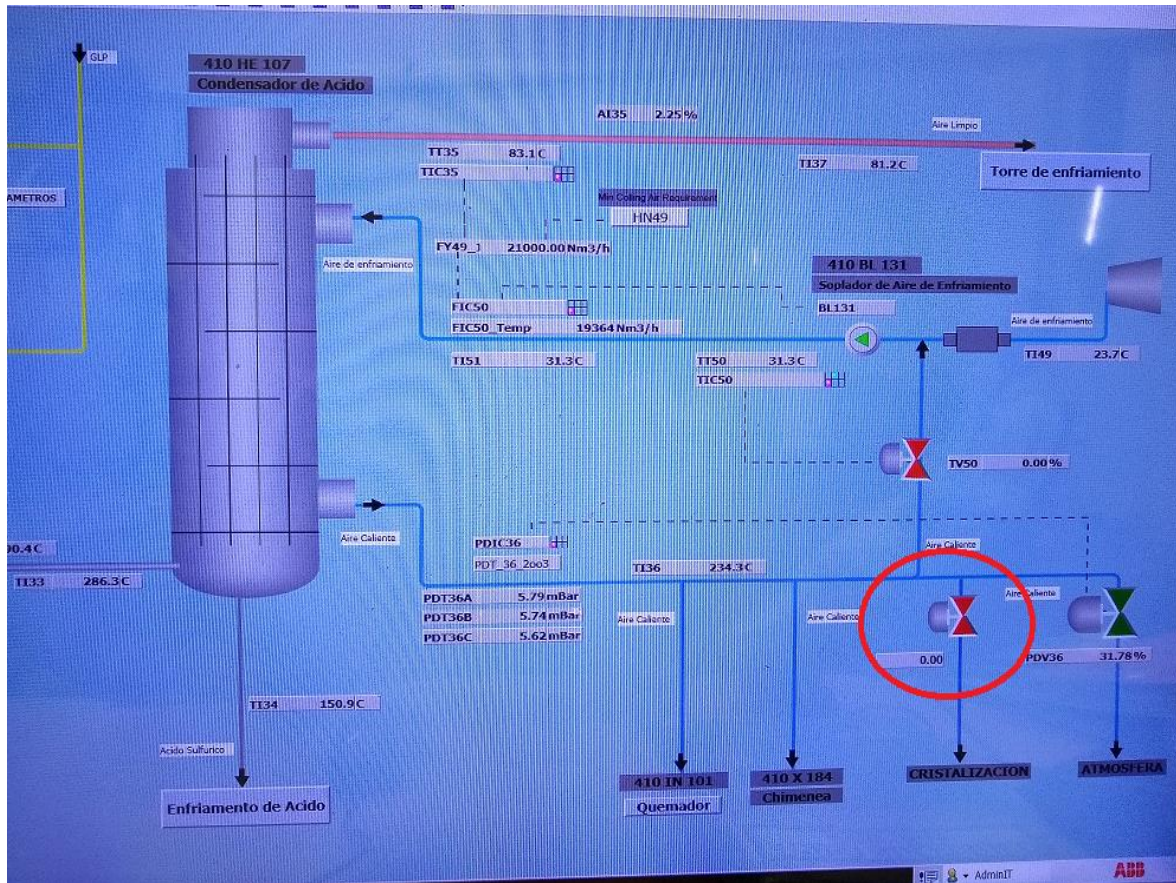


Figura 32. Válvula manual PDV 36-B totalmente cerrada.

Con el reporte de la disposición de los tubos rotos en la parada de enero y mayo se crea la figura 33, en ella se observa la rotura de 10 tubos nuevos, que fueron cambiados en la parada de enero y que en mayo se volvieron a encontrar rotos. Estos 10 tubos tienen la característica de ubicarse en la zona de “mayor probabilidad a romperse” del condensador.

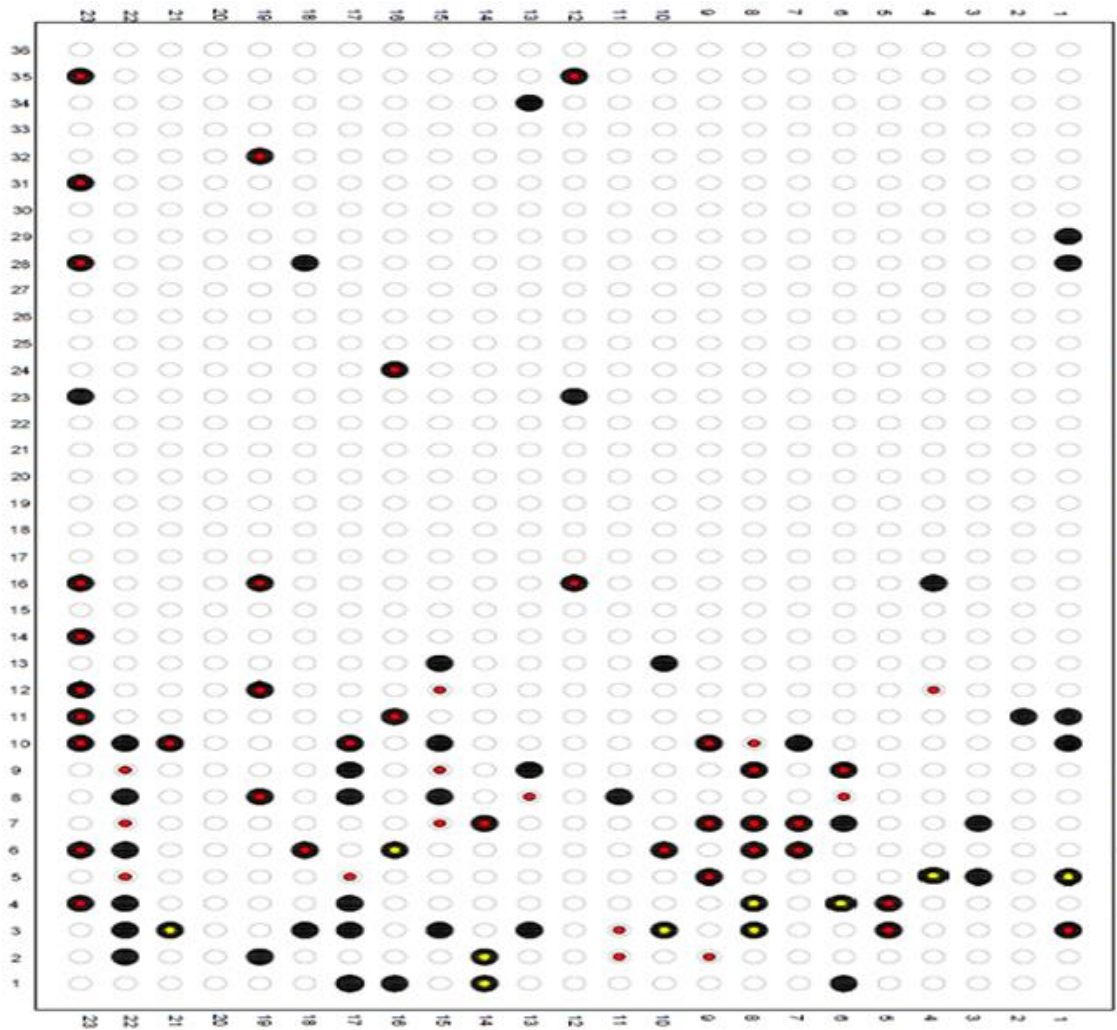


Figura 33. Ubicación de tubos reemplazados en enero y encontrados roto en mayo

DESCRIPCIÓN	
	Saldo que coinciden con parada Enero : 35
	Nuevos Tubos rotos : 37
	Saldo que no coincide parada Enero : 14
	Reemplazado en Enero, roto en Junio : 10



De los 58 tubos cambiados en enero, un 17% se rompió hasta la parada de mayo, habiéndose roto, no por la calidad de los tubos reemplazos sino por el lugar en donde se ubican dichos tubos, que es una zona propensa a romperse, como se muestra la proporción en la figura 28.

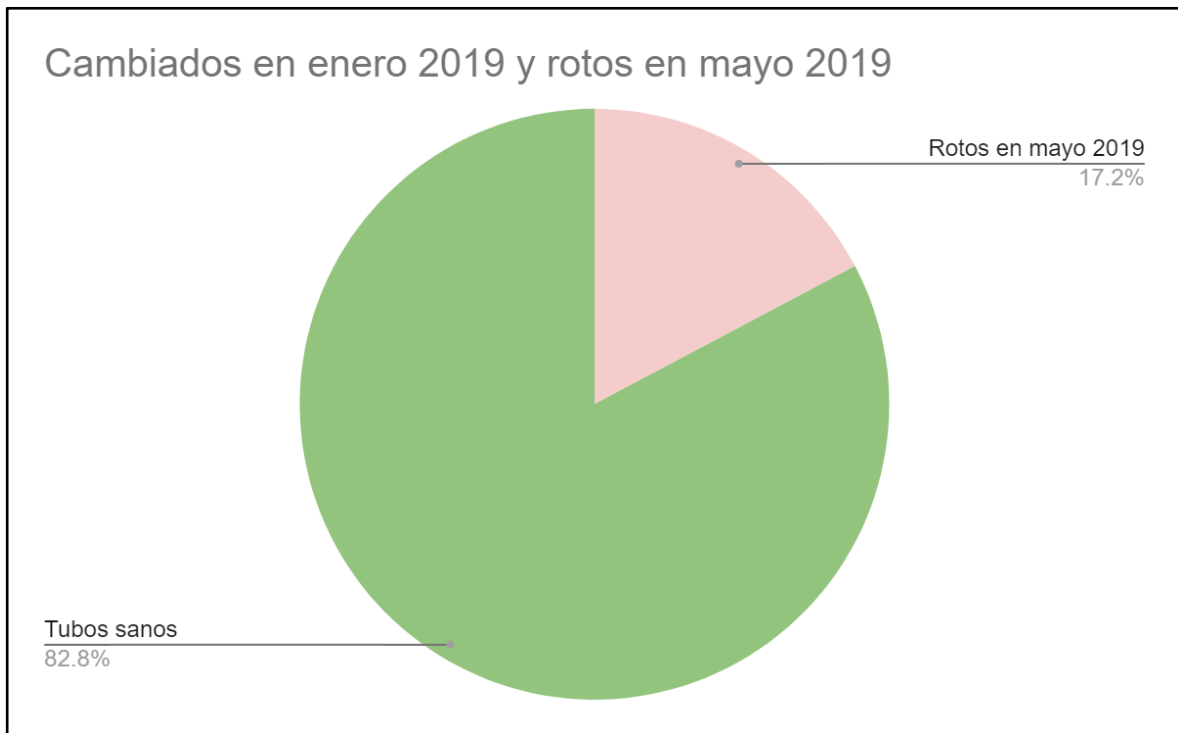


Figura 34. Porcentaje de tubos encontrados rotos en mayo

### 3.4.5. Etapa de Mejorar

La cantidad de tubos rotos se ve reducida con la implementación del correcto control operacional de las válvulas de liberación de aire caliente. En la figura 35 podemos apreciar un descenso en la cantidad de tubos rotos del 85.4% con respecto al mes de mayo del 2019.

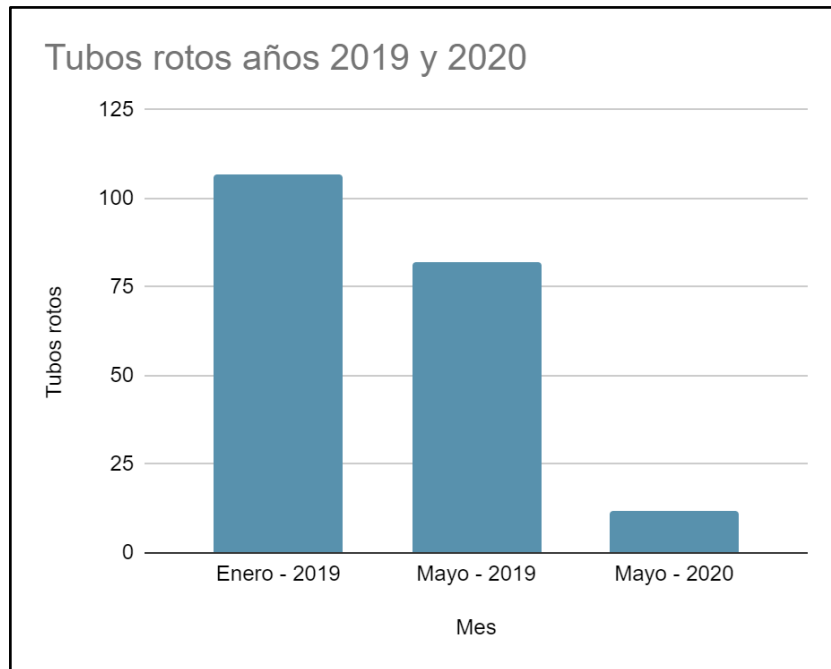


Figura 35. Reducción de la cantidad de tubos rotos aplicando la mejora operativa.

En la figura 36 podemos ver la notoria diferencia de tubos sanos que se encuentran tras la implementación de la mejora operativa a comparación de años anteriores que se encontraba menos tubos sanos. La ubicación en donde encontramos los tubos rotos son las que se muestran en la figura 37.

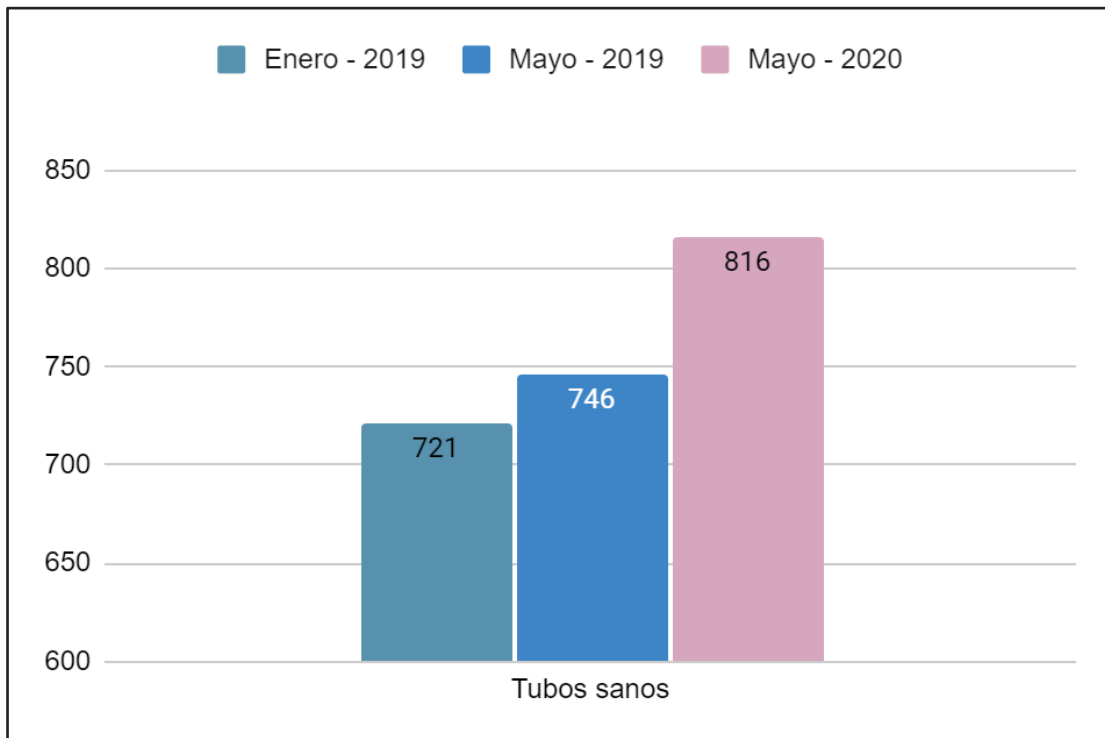


Figura 36. Ubicación de los tubos rotos encontrados después de la mejora operativa.

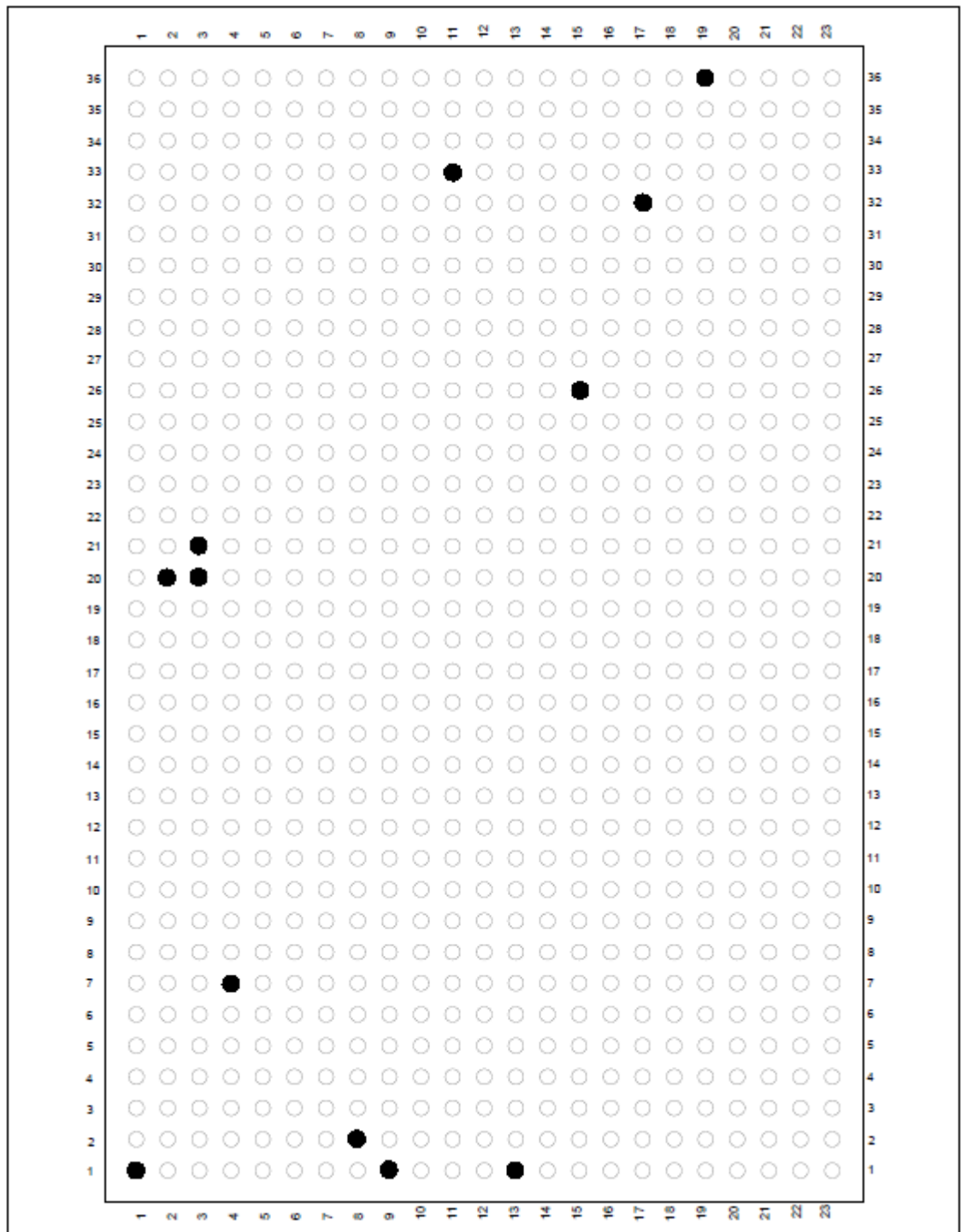


Figura 37. Ubicación de los tubos rotos encontrados después de la mejora operativa.




#### **3.4.6. Etapa de Controlar**

En la última etapa del six sigma, realizamos el procedimiento para la operación del condensador de planta, con el cual aseguramos la estandarización de la operación de las válvulas de liberación de aire caliente en el condensador de la Planta.

Con este procedimiento (figura 38) podemos capacitar al personal operativo para tener un correcto control de la Planta, explicando las consecuencias de la rotura de los tubos de vidrio de borosilicato en un incumplimiento en el procedimiento.

El cronograma de las actividades realizadas en el proyecto de mejora, se encuentra detallado por semana en la figura 39.

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO SEGURO		
	<b>INSPECCIÓN DE VÁLVULAS DE LIBERACIÓN DE CALOR DEL CONDENSADOR DE PLANTA WSA</b>	
	Área: <b>Planta de Ácido Sulfúrico</b>	Versión: 01
	Código: <b>PET-RSE-AS-03.01</b>	Página <b>1 de 1</b>
		PROCESADORA INDUSTRIAL RIO SECO S.A.

<p><b>1. PERSONAL</b></p> <p>1.1. Operador de Planta – Ácido sulfúrico. 1.2. Operador de Sala de Control - Ácido Sulfúrico 1.3. Jefe de Turno Planta</p> <p><b>2. EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL</b></p> <p>2.1. Casco de Seguridad. 2.2. Protector auditivo / Orejeras. 2.3. Ropa de trabajo con cinta reflectiva. 2.4. Respirador con filtro de polvo y gases. 2.5. Zapatos de seguridad de punta de acero. 2.6. Guantes con resistencia al calor. 2.7. Lentes de seguridad tipo Goggles.</p> <p><b>3. EQUIPOS / HERRAMIENTAS / MATERIALES</b></p> <p>3.1. <b>Equipos:</b> Condensador. 3.2. <b>Herramientas:</b> Radio de comunicación</p> <p><b>4. PROCEDIMIENTO</b></p> <p><b>INSPECCIÓN DE VÁLVULAS DEL CONDENSADOR</b></p> <p>4.1. El Operador de Sala de Control – Ácido Sulfúrico comunicará al Jefe de turno el porcentaje de apertura de las válvulas PDV-36 y PDV-36 B. Las cuales deben estar en automático y en manual al 0% respectivamente. 4.2. El Operador de Sala de control revisará la presión que indica el instrumento PDT 36, verificando que no se encuentre menor a 4.5 mbar. 4.3. El Operador de Planta – se dirigirá hacia el Condensador para revisar el porcentaje de apertura de las válvulas de PDV-36 y PDV-36 B en coordinación con el operador de Sala de Control verificando si la posición de las válvulas en las pantallas de Sala de Control coinciden con la posición en campo. 4.4. El Operador de Sala de Control - en comunicación con el Operador de Planta ratifican la correcta posición de las válvulas. En el caso que el Operador de Planta observara alguna anomalía en el trabajo de las válvulas PDV-36 y PDV-36 B se comunicará con el Operador de Sala de control y con el Jefe de turno Planta. 4.5. El Jefe de turno ante el aviso de anomalía reportará al Taller de Mantenimiento para su revisión. 4.6. El Operador de Sala de control reportará en su cuaderno de relevo, las condiciones en las cuales se encuentran las válvulas PDV-36 y PDV-36 B.</p>
---

*Figura 38.* Procedimiento para la inspección de las válvulas de control del Condensador.

<b>CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES</b>																									
Nº	ACTIVIDAD	RESPONSABLE	P/E	Año 2019																				PUNTO DE VERIFICACIÓN	RECURSOS
			MES	Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo					
			Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
1	Etapa de Pre-Definición	Jorge Escalante y Equipo de Operaciones	Prog																			Creación de Diagrama de Ishikawa. Identificación de causas a la rotura de los tubos de vidrio.	Laptop / pizarra / plumones		
			Ejec																						
2	Etapa de Definir	Jorge Escalante y Equipo de Operaciones	Prog																			Creación de plantilla para reconocer ubicación de los tubos de vidrio rotos.	Laptop / pizarra / plumones / hojas / impresora		
			Ejec																						
3	Etapa de Medir	Jorge Escalante	Prog																			Estudio de las características y las propiedades de los tubos de vidrio de borosilicato.	Laptop / pizarra / plumones / manuales		
			Ejec																						
4	Etapa de Analizar	Jorge Escalante	Prog																			Análisis de la ubicación de los tubos de vidrio que se rompen en el condensador con la ayuda de la plantilla.	Laptop / pizarra / plumones / manuales / hojas / impresora		
			Ejec																						
5	Etapa de Mejorar	Jorge Escalante	Prog																			Implementación y monitoreo del funcionamiento de las válvulas de liberación de aire caliente del condensador.	Laptop / pizarra / plumones / manuales / hojas / impresora		
			Ejec																						
6	Etapa de Controlar	Jorge Escalante y Equipo de Operaciones	Prog																			Se realiza la implementación del procedimiento de operación del Condensador de la Planta de Ácido Sulfúrico.	Laptop / Procedimientos / hojas / impresora		
			Ejec																						

Figura 39. Programación de actividades vs periodo de aplicación. Elaboración propia.



## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

### PERIODO PRE-MEJORA

#### 4.1 CÁLCULO DE LOS COSTOS POR RECURSO HUMANO.

En la tabla 8 apreciamos el salario mensual y el salario diario de cada trabajador que forma parte del equipo de trabajo que intervienen en el cambio de tubos del condensador.

Tabla 8.

*Cálculo de los costos por Recursos Humanos*

Ítem	CARGO	SALARIO MENSUAL (S/.)	COSTO POR DIA DE TRABAJO (S/.)
1	02 Técnico mecánico I	S/. 2,800.00	S/. 186.6
2	03 Técnico mecánico II	S/. 2,500.00	S/. 249.9
3	01 Supervisor de campo	S/. 4,700.00	S/. 156.70
4	01 Supervisor de seguridad	S/. 4,400.00	S/. 146.70
5	01 Supervisor de planta	S/. 3,500.00	S/. 116.70
6	04 Técnico operador de planta	S/. 2,500.00	S/. 332.20
		<b>SUB TOTAL</b>	<b>S/. 1,188.80</b>

En el cambio de los tubos de vidrio consideramos cinco días de trabajo, por ello realizamos la multiplicación de los días trabajados por el costo diario de recursos humanos.





Considerando cinco (5) días de trabajo:

$$S/. 1,188.80 \times 5 = S/. 5,944.00$$

En el año se realiza dos (2) paradas programadas de cinco (5) días por parada:

$$S/. 5,944.00 \times 2 = S/. 11,888.00$$

#### 4.2 CÁLCULO DE LOS COSTOS POR RECURSOS MATERIALES

Los tubos de vidrio de borosilicato tienen un costo de \$180.54 la unidad, que multiplicando por la cantidad de tubos cambiados en el año 2019 (140 und.) nos da como resultado \$25,275.6, tal como lo muestra la tabla 9.

Tabla 9.

*Cálculo de los costos por Recursos Humanos*

Ítem	Descripción	Precio por unidad (\$)	N <sup>o</sup> . Materiales Quebrados	Costo total (\$)
1	Tubo de borosilicato	S. 180.54	140	S. 25,275.60
			<b>SUB</b>	<b>S. 25,275.60</b>
			<b>TOTAL</b>	

El costo total del material cambiado es de \$. 25,275.60 Equivalente a nuevos soles:

Considerando (Cambio del dólar americano: US\$ 1 < > S/. 4.13 al 12/10/2022)

$$$. 25,275.60 \times S/. 4.13 = S/. 104,388.23 \text{ (en materiales perdidos).}$$

### 4.3 CÁLCULO DE LOS COSTOS POR PRODUCCIÓN

La tabla 10 muestra el precio promedio del ácido sulfúrico por tonelada y la capacidad de producción de la planta de ácido sulfúrico que es de 60 Tn/d. Las paradas de planta programadas toman en promedio 10 días, los cuales se dividen en 2.5 días para el enfriamiento de planta, 5 días para mantenimiento y otros 2.5 días para el calentamiento de planta, haciendo un total de 10 días. Al ser dos (2) paradas por año tendremos un total de 20 días sin producción.

Tabla 10.

*Costo diario de la producción de ácido sulfúrico*

Ítem	Descripción	Precio por tonelada (\$)	Producción por día (tn/día)	Costo total por día (\$)
1	1 tonelada de ácido sulfúrico	\$ 80.00	60	\$ 4,800.00
			<b>SUB TOTAL</b>	<b>\$ 4,800.00</b>

Tomando en cuenta veinte (20) días de parada de planta tenemos la siguiente cifra:

$$\$ 4,800.00 \text{ (tn/d)} \times 20 \text{ (días)} = \$ 96,000.00 \times S/. 4.13$$

$$\text{VALOR EN SOLES} = S/. 396,480.00$$

#### 4.4 CÁLCULO DEL COSTO TOTAL ANTES DE LA MEJORA

El costo total del mantenimiento programado de los cambios de tubos del condensador es de **S/. 512, 756.23** como lo describe la tabla 11.

Tabla 11.

*Costo anual de las paradas programadas antes de la implementación de la mejora*

Ítem	Descripción	Costo total (S/.)
1	Mano de obra	S/. 11,888.00
2	Tubos de condensador	S/. 104,388.23
3	Perdida de producción	S/. 396,480.00
<b>TOTAL</b>		<b>S/. 512, 756.23</b>

#### 4.5 CÁLCULO DEL COSTO TOTAL DESPUÉS DE LA MEJORA

Con la implementación de la mejora se redujeron los repuestos (12 tubos), los días para el cambio de tubos (1 día) y los días en los cuales se tendrá la parada de Planta (5 días), como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12.

*Reducción de días y repuestos en la parada de Planta del 2020*

Ítem	Descripción	Cantidad
1	Tubos rotos	12
2	Días de Mantenimiento	1
3	Días total de parada de planta	5



En la tabla 13 nos muestra el costo de la parada programada del 2020 que solo fue una única parada en el año, siendo el valor de S/. 109, 956.36 todo el costo de la parada programada del año.

Tabla 13.

*Costo anual de la parada programada del año 2020*

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo total (S/.)</b>
1	Mano de obra	S/. 1,888.80
2	Tubos de condensador	S/. 8,947.56
3	Perdida de producción	S/. 99,120.00
<b>TOTAL</b>		<b>S/. 109, 956.36</b>



#### 4.6 CÁLCULO DEL AHORRO DESPUÉS DE LA MEJORA

Haciendo la comparación entre el costo de las paradas de planta (2) en el año 2019 y la parada de planta (1) del año 2020, podemos apreciar un considerable ahorro de S/. 402, 799.87 que se muestra en la tabla 14.

Tabla 14.

*Monto ahorrado en el año 2020 después de la implementación de la mejora*

Item	Descripción	Costo por periodo
1	Costo antes de la implementación	S/. <b>512, 756.23</b>
2	Costo después de la implementación	S/. <b>S/. 109, 956.36</b>
		Ahorro S/ <b>402,799.87</b>



### **Resultado general**

Se realizó la reducción de los costos operativos en S/. 402, 799.87, determinando que la causa principal de la ruptura de los tubos de vidrio es por el choque térmico que se producía en el interior del condensador en la zona de mayor temperatura.

### **Resultado específico 1:**

La cantidad de los tubos reemplazados presentaron solo un 17% de ruptura, y toda la cantidad de estos tubos se encontraron en la zona más propensa a romperse por choque térmico.

### **Resultado específico 2:**

Con la creación de la plantilla del condensador, pudimos ubicar y analizar la zona donde era más propensa la ruptura de los tubos de vidrio, concluyendo que en la zona más caliente y la más cercana a las válvulas de liberación de calor era la zona donde se producía el choque térmico.



### Resultado específico 3:

Se detalla en la tabla 15 el ahorro por actividades y repuestos generados entre las paradas del año 2019 y la parada del año 2020.

Tabla 15.

*Reducción de costos periodo 2019 - 2020*

<b>Ítem</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>
1	Mano de Obra	S/. 9,999.20
2	Tubos de vidrio	S/. 95,440.67
3	Pérdida de producción	S/. 297,360.00



## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. CONCLUSIONES

Con este trabajo se logró reducir los costos operativos de la mano de obra, repuestos y los días de parada de planta programada con la suma de S/ 512,756.23 en el año 2019 y S/ 109,956.36 en el año 2020 luego de la implementación de la mejora operativa en el condensador de la planta de ácido sulfúrico WSA.

Con el uso de las herramientas de calidad se logró analizar el proceso en la que se determinó las causas del rompimiento de los tubos de vidrio de borosilicato. Logrando reducir en un 85.4 % la rotura de los tubos en la planta y descartando que los repuestos sean de baja calidad.

Se determinó que la rotura de los tubos de vidrio eran producidos por el choque térmico que se presentaba en momentos de apagado de planta intempestivo, y la falta de conocimiento de la correcta operación de la válvula manual de liberación de aire caliente del condensador.

Para la estandarización del proceso de producción de ácido sulfúrico se implementó el procedimiento de inspección de las válvulas de liberación de calor del condensador de la planta WSA, logrando la ejecución de las actividades del personal de manera uniforme y la creación de una plantilla de registro de tubos rotos, para analizar la ubicación y las causas de su rotura.





## 5.2. RECOMENDACIONES

No contamos con una check para restringir el ingreso de aire del medio ambiente a contracorriente, en caso fallaran las electroválvulas PDV 36 y PDV 36-B que por algún motivo se aperturará en el proceso.

Evaluar la colocación en automático de la válvula PDV 36-B o cerrarla por completo.

Implementar una alarma cuando no coincida la apertura en pantalla con la apertura en campo de la válvula PDV 36 y evitar que ingrese aire del medio ambiente cuando se apague la Planta.

Evitar abrir los manholes del Condensador, cuando entremos en parada de Planta, a una temperatura mayor a los 120°C.

El procedimiento de encendido de la planta de ácido sulfúrico, tiene que iniciarse con la puesta en marcha del Blower de aire frío (BL-131), pues si se inicia con el Blower de aire limpio, se corre el riesgo de deteriorar los Demister que se encuentran en la parte superior de los tubos del Condensador.



## BIBLIOGRAFIA

Laursen J, Jensen F. WSA-Meeting industry demands. Sulphur 312. 2007; 312:80–85.

Duran. Tubos, varillas y capilares de vidrioborosilicato 3.3. [Internet]. [Consultado el 07 de julio 2021]. p.18. Disponible en: [http://www.vidrasa.com/esp/catalog/vidrasa\\_duran.pdf](http://www.vidrasa.com/esp/catalog/vidrasa_duran.pdf)

Buenaventura. HDSM\_0716\_sulfato de manganeso monohidratado. [Internet]. 2018 [consultado 07 de julio 2021]. p.4. Disponible en: [https://www.buenaventura.com/assets/uploads/hoja\\_de\\_datos\\_de\\_seguridad\\_del\\_material\\_hdsm/2019/HDSM\\_0716\\_SULFATO%20DE%20MANGANESO%20MONOHIDRATADO\\_23.11.2018.pdf](https://www.buenaventura.com/assets/uploads/hoja_de_datos_de_seguridad_del_material_hdsm/2019/HDSM_0716_SULFATO%20DE%20MANGANESO%20MONOHIDRATADO_23.11.2018.pdf)

Serna, D. (2016). Propuesta de mejora para el control de inventarios en el área de almacén de una empresa de servicios [Postgrado, Universidad Militar Nueva Granada]. <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/14908>

Almeida Cruz, Wilson Giovanny. 2016. Optimización de procesos mediante la implementación de un sistema de planificación de recursos empresariales (ERP) enfocado en el mejoramiento logístico (Inventario, gestión de compras y ventas) para empresa comercializadora de equipos de protección personal. Quito : Universidad de las Américas, 2016.



White Alvarez, Kenneth Ronald Carlo. 2016. “Propuesta de mejora en la cadena de suministros para reducir los costos en el área logística de la empresa bermanlab S.A.C”. Trujillo : UPN, 2016.

Araujo Silva, Katia Janeth. 2017. Diseño de un sistema logístico basado en la gestión de compras, inventarios y almacenes para la reducción de costos en la empresa Anvip Perú S.R.L. – Lima. Trujillo : UPN, 2017.

Zapata Terrones, Andy Humberto. 2017. Mejora de un Sistema de Gestión Logística para la reducción de los costos en la Empresa EYSM Ingeniería SAC de Callao, 2017. Lima : UCV, 2017.

(Ochoa González (2016) Optimización de procesos mediante la implementación de un sistema de planificación de recursos empresariales (ERP) enfocado en el mejoramiento logístico (inventarios, gestión de compras y ventas) para empresa comercializadora de equipos de protección personal.  
<http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2789532>

Barrera, Cambra y González (2017) Implementation of six sigma methodology in measurement management. Universidad y Sociedad vol.9 no.2.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2218-36202017000200001](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202017000200001)



Bermúdez , J y Betancurt , L (2016) Six Sigma como Herramienta de Mejoramiento

Continuo: Caso de Estudio.espacios. Vol. 37 (N° 09)

<http://www.revistaespacios.com/a16v37n09/16370909.html>

Perez, I y Rojas, J (2019) Lean, Six Sigma and Quantitative Tools: A Real Experience in the Productive Improvement of Processes of th.

<https://www.upo.es/revistas/index.php/RevMetCuant/article/view/3218>

Julia Máxima Uriarte. (2019) Características del Six Sigma. Última edición: 18 de septiembre de 2019. Disponible en: <https://www.caracteristicas.co/six-sigma/>

[https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/Institucional/Estudios\\_Economicos/RAES/RAES-Mineria-diciembre-2019-GPAE-OS.pdf](https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/RAES/RAES-Mineria-diciembre-2019-GPAE-OS.pdf)

<https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/29754-minem-casi-el-10-del-pbi-y-el-61-de-las-exportaciones-del-2018-fueron-producto-de-la-mineria>

<http://revistamineria.com.pe/pageflipx/489/489-MINERIA-JUNIO.pdf>