ISBN: 978-628-96613-1-6. ISSN: 2414-6390. Digital Object Identifier: https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2025.1.1.1520

Proposal for a continuous improvement system in a chemistry plant using Lean Manufacturing tools. Case Study in the Chemistry Industry

J. C. Veliz Chapoñan, Magister, M. León Perfecto, Magister, S. Paz Collado, Doctor
Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, j.veliz@pucp.edu.pe, , mleonp@pucp.edu.pe, spaz@pucp.edu.pe

Abstract– This research aims to evaluate the implementation of a new continuous improvement system based on Lean Manufacturing tools in the flash drying system of a dicalcium phosphate plant in a chemical manufacturing company, with the aim of improving the overall plant efficiency. The diagnosis shows that the main problem in the flash drying system is the failure of the equipment, resulting in annual losses of $841,274 due to frequent unplanned and corrective maintenance. For this reason, the implementation of a new continuous improvement system based on the pillars of tools such as 5S, Total Productive Maintenance (TPM) and Autonomy (JIDOKA) is proposed.

Keywords— Lean Manufacturing, losses, maintenance, 5S, TPM, JIDOKA.

Propuesta de un sistema de mejora continua en una planta química usando herramientas de Manufactura Esbelta. Caso de estudio en la industria química

J. C. Veliz Chapoñan, Magister, M. León Perfecto, Magister, S. Paz Collado, Doctor
Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, j.veliz@pucp.edu.pe, , mleonp@pucp.edu.pe, spaz@pucp.edu.pe

***Resumen*– La presente investigación tiene como objetivo evaluar la implementación de un nuevo sistema de mejora continua en base a herramientas de Manufactura Esbelta en el sistema de secado flash de una planta de fosfato bicálcico en una empresa de manufactura química, con el objetivo de mejorar la eficacia global de planta. El diagnóstico muestra que el principal problema en el sistema de secado flash es la falla de los equipos, esto generaba perdidas de $ 841274 por año, debido a una alta frecuencia de mantenimientos no planificados y correctivos. Es por ello que, se propone la implementación de un nuevo sistema de mejora continua en base a los pilares de herramientas como 5S, Mantenimiento Productivo Total (TPM) y Autonomación (JIDOKA).**

***Palabras Clave*— Manufactura Esbelta, pérdidas, mantenimiento, 5S, TPM, JIDOKA.**

I. INTRODUCCIÓN.

La maximización de la eficacia global es fundamental para las plantas de manufactura química que operan en régimen continuo o discontinuo. La optimización de la eficacia global de planta permite alcanzar condiciones óptimas de operación, reducir costos y mejorar la calidad de los productos. Sin embargo, las pérdidas asociadas a paradas programadas o no programadas parciales o totales, fallas de equipos, procesos y defectos de calidad pueden afectar significativamente la disponibilidad, eficiencia o calidad de la planta.

En este trabajo, se presenta un análisis y descripción y la propuesta de un nuevo sistema de mejora continua para aumentar la eficacia global de planta, basado en las herramientas de Manufactura Esbelta, tales como 5S, TPM y JIDOKA.

La metodología de implementación del nuevo sistema de mejora se basa en la identificación de las mayores pérdidas mediante el análisis de los indicadores de gestión de planta, y luego, la reducción y eliminación de estas pérdidas.

Los beneficios del nuevo sistema de mejora son la reducción de los tiempos de parada, el aumento de la eficiencia de planta y la estandarización de los controles de los parámetros críticos de operación de planta. De esta manera, se logrará tener un proceso más esbelto y libre de desperdicios, lo que permitirá mejorar la competitividad y la sostenibilidad de la planta

II. ASPECTOS GENERALES

A. Procesos industriales de fabricación

Los procesos industriales dedicados a la fabricación se pueden clasificar en dos grupos: fabricación de ensamblajes y fabricación de la industria de procesos. La fabricación de ensamblajes generalmente consiste en la fabricación de piezas y componentes individuales que los operadores y las máquinas sueldan, atornillan o fijan de otro modo en un producto terminado mientras las industrias de procesos se caracterizan por procesos que incluyen reacciones químicas, mezcla, extrusión, formación de hojas, corte, etc. [1].

B. Características especiales de la industria de procesos

La industria de procesos se caracteriza por su diversidad de sistemas productivos [2]. Este tipo de plantas, son unidades complejas en relación a su variedad de equipos y operaciones [3], en donde pueden ocurrir cambios físicos y/o químicos ordenadas para la transformación de materias primas en productos finales diferentes [4] y asociadas a un conjunto de corrientes de proceso de entrada y salida [5]. En este tipo de plantas se requiere operaciones de preparación de las materias primas y de separación y purificación del producto principal y secundarios [6], operando normalmente de forma continua o discontinua y, logrando un estado estacionario durante su funcionamiento [7], sin embargo, requieren paradas parciales o totales de sus instalaciones para mantenimiento [2].

C. Eficacia global de la planta en la industria de procesos

La eficacia global de planta relaciona la tasa de disponibilidad, eficiencia y calidad de planta y debe maximizarse para lograr condiciones óptimas de operación [2]. Para lograrlo se debe "eliminar todo tipo de actividades que no aumenten el valor del producto en proceso", [8] y se puede considerar las siguientes ocho pérdidas en planta [2].

- ✓ Paradas programadas
- ✓ Ajustes de la producción
- ✓ Fallas de los equipos
- ✓ Fallos de proceso
- ✓ Pérdidas de producción normales
- ✓ Pérdidas de producción anormales
- ✓ Defectos de calidad
- ✓ Reprocesamiento

D. Estructura de las pérdidas

La estructura de las pérdidas que ocurren en una planta de manufactura química se muestra en la figura 1: [2]

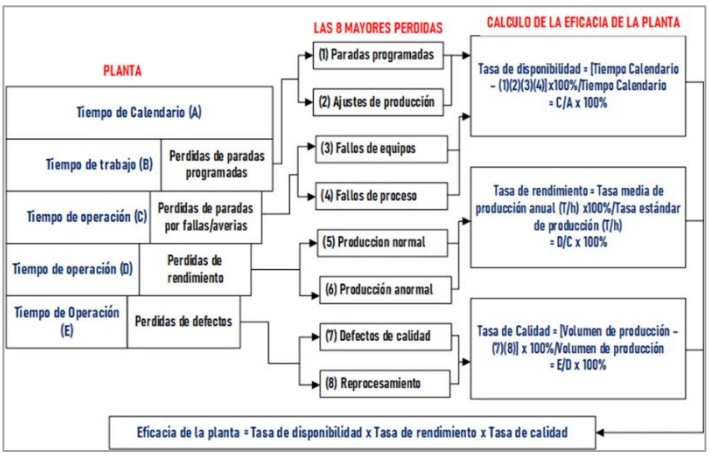

Fig. 1 Eficacia global de la planta y estructura de pérdidas.

E. Fundamentos generales de la Manufactura Esbelta

Es un sistema de producción basado en la eliminación del desperdicio [9] orientado a mejorar el potencial del recurso humano, con la finalidad de lograr la adaptación al cambio y fomentar la mejora continua [10].

El desperdicio o Muda (despilfarro) es toda actividad humana que absorbe recursos, pero no crea valor [11] tales como defectos, sobreproducción, exceso de inventario, sobreprocesamiento, movimientos y transporte innecesario, y esperas [9]. Se considera un octavo desperdicio al diseño de bienes y servicios que no responden a las necesidades de los usuarios [11].

F. Bases de la Manufactura Esbelta para la industria de procesos

La esencia de la Manufactura Esbelta se basa en [12]:

- ✓ La eliminación implacable de todos los residuos.
- ✓ Mejora continua (Kaizen)
- ✓ Fabricación a una tasa igual a la demanda real del cliente, justo cuando el cliente lo desea (JIT)
- ✓ Asegurar la calidad al detectar defectos y detener la producción hasta que se encuentren y corrijan las causas (Jidoka)

G. Herramientas de Manufactura Esbelta

A continuación, Se presentan herramientas clave de Manufactura Esbelta para optimizar la eficacia global de la planta.

1) 5 S: Es un proceso de cinco pasos para la organización en el lugar de trabajo y proviene de 5 palabras japonesas: Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu y Shitsuke [12] o en español: Clasificar, ordenar, limpiar, estandarizar y disciplinar [13]. Las 5S conducen a tener una mayor eficiencia en el trabajo, basándose en el control visual y en la producción esbelta [12].

2) Jidoka: Es uno de los dos pilares de la casa de TPS y se basa en la calidad de la fuente al proporcionar equipos con inteligencia para detenerse automáticamente cuando detecta que está produciendo material de mala calidad [12]. Esta técnica se basa en la automatización que consiste en que el proceso tenga un autocontrol [13], para prevenir los errores humanos y de las máquinas con la finalidad de garantizar una alta calidad del producto y del proceso [8].

3) TPM (Total productive maintenance): Se refiere a un conjunto de prácticas destinadas a mejorar el rendimiento de la fabricación al mejorar la forma en que se opera y se mantiene el equipo. Algunos elementos claves del TPM para procesos industriales son: [12].

- ✓ Mantenimiento preventivo: mantenimiento basado en el tiempo, mantenimiento realizado según un programa diseñado para evitar averías antes de que puedan ocurrir.
- ✓ Mantenimiento predictivo: mantenimiento basado en condiciones, utilizando instrumentos y sensores para tratar de anticipar cuándo el equipo está a punto de descomponerse para que pueda repararse antes de fallar.
- ✓ Mantenimiento de averías: reparación del equipo después de una avería.
- ✓ Mantenimiento correctivo: modificaciones continuas al equipo para reducir la frecuencia de averías y facilitar su reparación.
- ✓ Prevención de mantenimiento: diseñar equipos que rara vez se rompen y son fáciles de reparar cuando fallan.
- ✓ Mantenimiento autónomo: mantenimiento en equipo realizado principalmente por operadores de planta.

III. METODOLOGÍA

Implementaremos mejoras en la planta de fosfato bicálcico mediante una metodología de tres fases: Diagnóstico, Propuesta de Mejora y Evaluación Económica financiera.

Fase Diagnóstico: Durante esta fase, se definirá el objeto de estudio, luego, se realizará el diagnóstico e identificación de problemas y se propondrán las contramedidas correspondientes.

La planta de fosfato bicálcico, con sistemas complejos, requiere un diagnóstico efectivo del proceso, establecido a través de un diagrama de bloques.

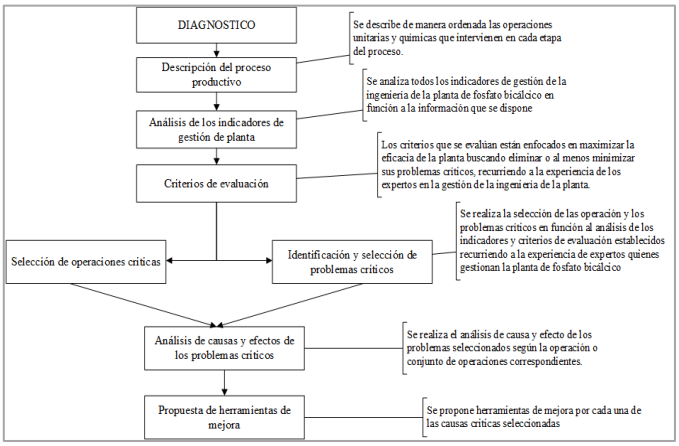

Fig. 2 Ruta para el diagnóstico del proceso productivo de fosfato bicálcico

A. Descripción del proceso productivo de la planta de fosfato bicálcico

La planta de fosfato bicálcico está diseñada para una capacidad de 310 T/día produciendo un fosfato bicálcico al 18.5% P, a partir de Roca fosfórica al 32% P2O5, Suspensión de caliza a 1.45g/mL y ácido clorhídrico al 6%, cuyas operaciones físicas y químicas del proceso productivo se muestran en el siguiente diagrama en bloques.

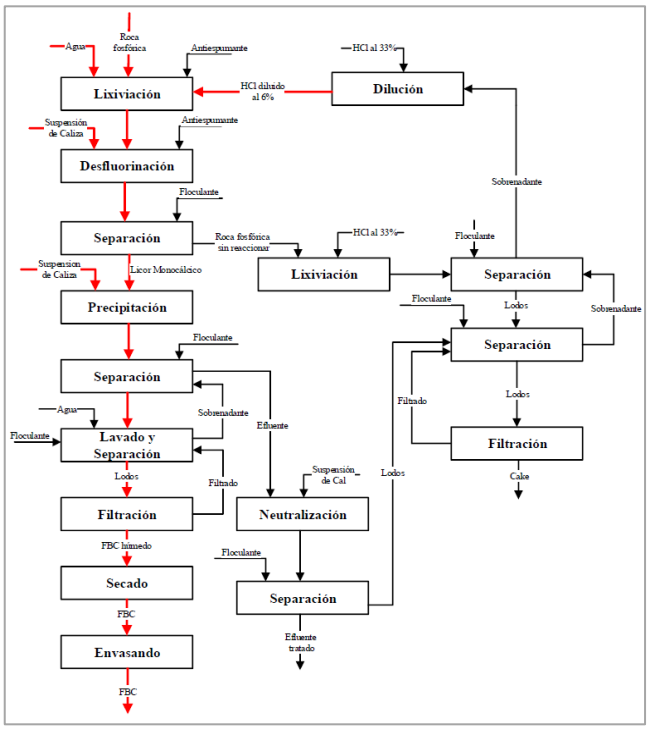

Fig. 3 Diagrama de flujo en bloques del proceso productivo de fosfato bicálcico.

B. *Análisis de los indicadores de gestión de planta*

En las plantas de fosfato bicálcico, el producto se fabrica mediante la operación continua de equipos complejos tales como, reactores, espesadores, etc., todas ellas conectadas por tuberías, etc. El análisis se basa en un ciclo normal de producción del periodo 2017 al 2019.

1) Gestión de paradas de planta u operaciones: Este indicador evalúa los tiempos de inoperatividad por arranques, paradas programadas y fallas de equipos. Entre 2017 y 2019, más del 40% del tiempo de parada se concentró en la operación de secado.

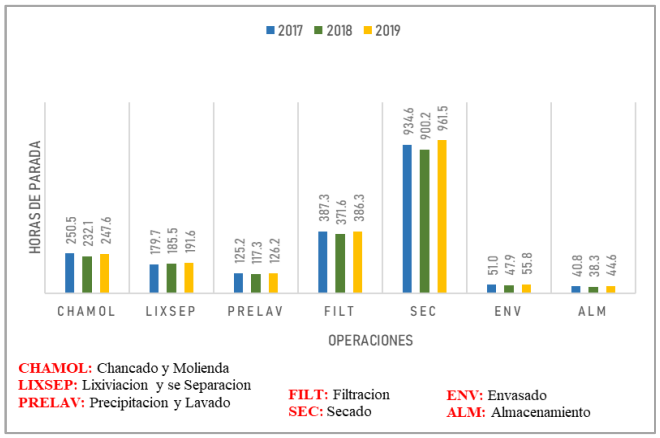

Fig. 4 Tiempo total de parada por cada operación durante el periodo 2017 – 2019

2) Gestión de la capacidad de planta: En la gestión de capacidad de planta, medimos el rendimiento, la eficiencia y la utilización. En 2018, la producción real promedio fue de 280 TM/día; en 2017 y 2019, fue de 275 TM/día. El rendimiento más alto en 2019 alcanzó el 84.1%, mientras que el más bajo fue del 81.4% en 2018. La eficiencia más alta se registró en 2018 con un 94.9%, mientras que el mínimo fue del 91.3% en 2019. En cuanto a la utilización, 2018 mostró el mejor rendimiento con un 92.4%, y 2017 tuvo el más bajo con 89.1%.

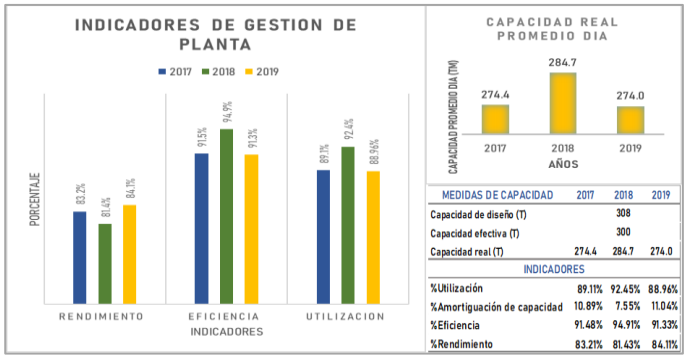

Fig. 5 Indicadores de gestión de planta durante los años 2017 al 2019

3) Gestión de la calidad de planta: La gestión de calidad de la planta se centra en medir defectos, producción reprocesada y reclamos de clientes. Estos defectos, a menudo causados por fallas en el proceso, afectan el control de condiciones operativas, resultando en productos fuera de especificación en %F, %P, %H, ppm As y ppm Pb.

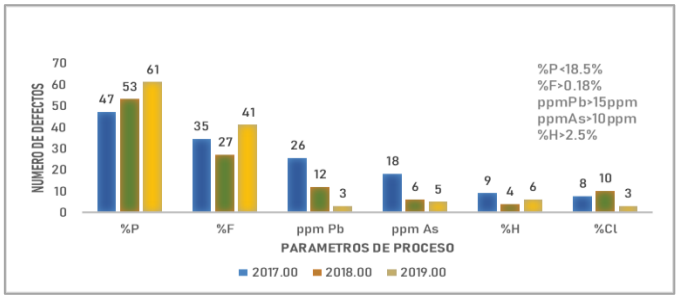

Fig. 6 Defectos de calidad registrados durante los años 2017 al 2019

Durante el año 2019 se reprocesó 2611.6TM, siendo la mayor cantidad reprocesada durante el periodo 2017 al 219.

Fig. 7 Producción reprocesada registrada durante los años 2017 al 2019

4) Eficacia global de planta de fosfato bicálcico: La planta enfrenta fallas en procesos y equipos, incluyendo fugas, obstrucciones y contaminación que afectan su rendimiento. Estas fallas, junto con pérdidas durante arranques y paradas, generan bajos rendimientos en operaciones físicas y químicas. Los defectos de calidad y el reproceso limitan la eficacia global. Entre 2017 y 2019, el OPE de la planta de fosfato bicálcico osciló entre

79% y 84%, un nivel aceptable, pero con significativas oportunidades de mejora para optimizar la producción y reducir pérdidas.

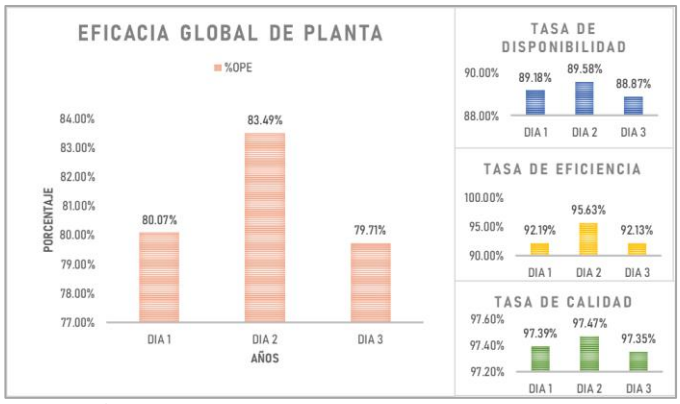

Fig. 8 Eficacia global de planta registrada durante los años 2017 al 2019

C. *Criterios de evaluación*

En vista de la complejidad del proceso, es relevante recurrir a la experiencia de los expertos en la gestión de la ingeniería de la planta, que ayudarán a la selección de los problemas críticos, así como la relación entre estos y las operaciones críticas. Para tal fin es necesario establecer los siguientes criterios técnicos de evaluación:

1) *Desempeño:* Se evalúa en función a la confiabilidad de cada operación.
2) *Frecuencia:* Evalúa el número de veces con que ocurren las fallas en cada operación
3) *Impacto en el cliente:* Evalúa la influencia que se puede tener directamente con la calidad del producto final y por ende con la satisfacción del cliente.
4) *Impacto en la empresa:* Evalúa el impacto en el costo de producción en función a los consumos unitarios de los principales materiales.
5) *Importancia:* Evalúa la relevancia que se tiene en la gestión de la planta.
6) *Susceptibilidad al cambio:* Evalúa la probabilidad con la que se pueda en el corto o largo plazo realizar mejoras.

D. *Selección de operaciones criticas*

La selección de operaciones críticas para la eficacia de la planta se basó en un diagrama de priorización, elaborado por un equipo de expertos. Se determinó que la operación de secado es la más crítica, influyendo significativamente en la eficacia global de la planta de fosfato bicálcico.

TABLA I
DIAGRAMA DE PRIORIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE LAS OPERACIONES CRITICAS

Operación	CRITERIOS						TOTAL
	DP	FC	IC	IE	IP	SC	
Chancado y Molienda	6.59	7.50	4.67	8.26	1.01	1.09	29.12
Lixiviación y Separación	9.17	5.95	7.61	11.41	1.50	2.37	38.01
Precipitación y Lavado	12.90	3.62	6.54	9.05	1.45	1.58	35.14
Filtración	3.15	12.15	6.14	9.84	1.19	2.07	34.55
Secado	2.58	15.26	6.94	10.62	0.72	2.17	38.30
Envasado	12.61	3.10	2.54	2.75	0.49	1.38	22.88
Almacenamiento	16.05	2.84	1.74	2.56	0.31	0.99	24.49

Leyenda: DP: Desempeño; FC: Frecuencia; IC: Impacto en el cliente; IE: Impacto en la empresa; IP: Importancia; SC: Susceptibilidad al cambio

E. *Identificación y selección de problemas críticos*

Los problemas críticos fueron identificados mediante el análisis de los indicadores de gestión de planta tomando como base el diagrama de priorización concluyendo que las fallas de los equipos, es el problema crítico más influyente en la eficacia global de la planta (Véase TABLA II y III)

TABLA II
DIAGRAMA DE PRIORIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE LOS PROBLEMAS CRÍTICOS

PROBLEMAS	CRITERIOS				TOTAL
	FC	IC	IE	SC	
Arranque de planta	3.49	3.06	16.73	2.89	26.17
Bajo rendimiento de las operaciones	12.58	11.99	16.73	6.67	47.96
Defectos de Calidad	10.25	13.63	17.04	6.44	47.37
Devolución de los clientes	2.56	5.64	17.35	6.22	31.78
Fallas de los equipos	12.11	11.28	17.35	10.22	50.96
Fallas de proceso	11.88	12.69	15.80	10.00	50.37
Parada no programada	2.79	6.58	16.42	6.89	32.69
Paradas programada	3.49	2.12	16.42	6.67	28.70

Leyenda: DP: Desempeño; FC: Frecuencia; IC: Impacto en el cliente; IE: Impacto en la empresa; IP: Importancia; SC: Susceptibilidad al cambio

TABLA III
NIVEL DE PRIORIZACIÓN DE LOS PROBLEMAS CRÍTICOS

PROBLEMAS	PUNTUACION	PORCENTAJE
Fallas de los equipos	50.96	16.13%
Fallas de proceso	50.37	15.94%
Bajo rendimiento de las operaciones	47.96	15.18%
Defectos de Calidad	47.37	14.99%
Parada no programada	32.69	10.34%
Devolución de los clientes	31.78	10.06%
Paradas programadas	28.70	9.08%
Arranque de planta	26.17	8.28%
Total	316.00	100.00%

F. *Análisis de causas y efecto*

Se desarrolla el análisis de causa – efecto de las cusas posibles que influyen en las fallas de los equipos de la operación de secado, identificadas en varias categorías en conjunto con el personal técnico de la planta de fosfato bicálcico.

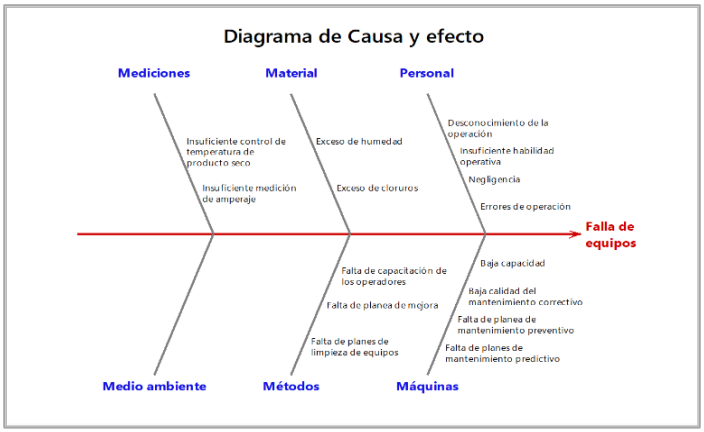

Fig. 9 Diagrama de causa y efecto para el análisis de las fallas de equipos en la operación de secado

Se analizarán las causas de fallas en los equipos de secado del 2019 mediante el análisis de Pareto para identificar las críticas.

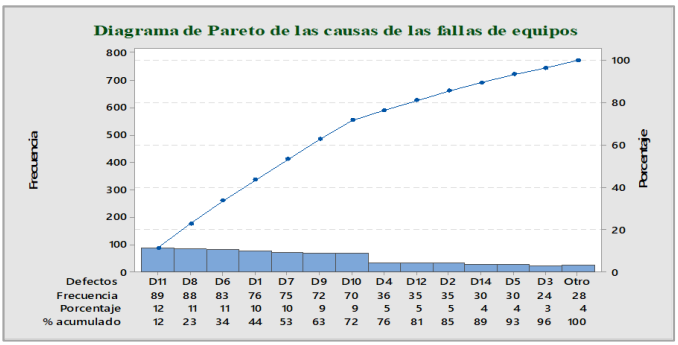

Fig. 10 Diagrama de Pareto para la determinación de causas de las fallas de los equipos en la operación de secado

El análisis de Pareto en la Fig. 10 revela que el 72% de las fallas en equipos de secado se deben a alto mantenimiento correctivo, falta de mantenimiento preventivo, capacitación insuficiente, y ausencia de planes de mejora y limpieza.

TABLA IV.
LISTA DE CAUSAS INFLUYENTES EN LAS FALLAS DE LOS EQUIPOS DE LA OPERACIÓN DE SECADO

Código	Defectos
D11	Falta de planes de mantenimiento predictivo
D8	Falta de planes de mantenimiento preventivo
D6	Exceso de humedad
D1	Baja calidad del mantenimiento correctivo
D7	Falta de capacitación de los operadores
D9	Falta de planea de mejora
D10	Falta de planes de limpieza de equipos

Fase Propuesta de Mejora: En la fase de mejora, se propone un sistema de mejora continua (*continuous improvement system for overall plant effectiveness*, CISOPE) para la planta de fosfato bicálcico, basado en la Manufactura Esbelta, considerando el estado operativo y las causas de los problemas identificados.

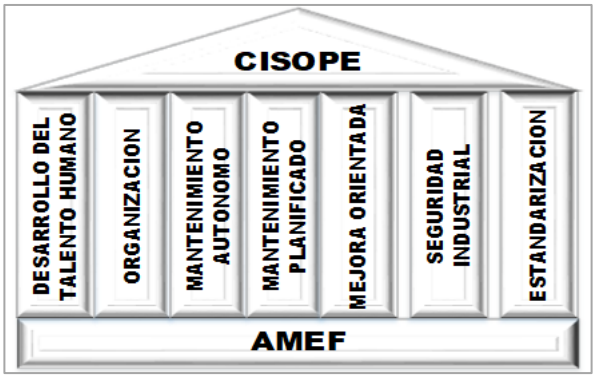

Fig. 11 Sistema de mejora continua de la eficacia global de una planta

A) Metodología de implementación CISOPE

El sistema CISOPE, fundamentado en la Manufactura Esbelta, integra herramientas como las 5S, mantenimiento autónomo y planificado, desarrollo del talento humano y seguridad industrial mediante TPM. Su implementación en la planta de fosfato bicálcico es gradual y se realiza en 14 pasos distribuidos en tres fases, como se detalla en la Fig. 12.

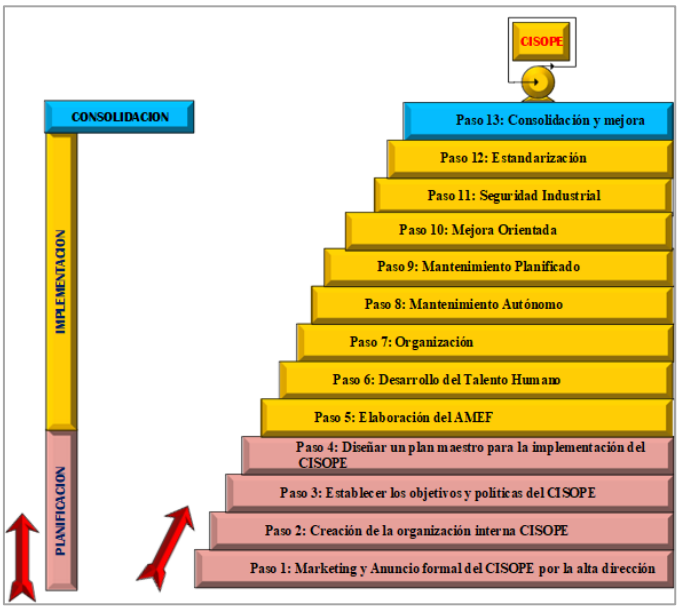

Fig. 12 Metodología CISOPE para la planta de fosfato bicálcico

1) Fase 1: Planificación: Esta primera fase, previa a la fase de implementación del CISOPE, se inicia con el compromiso de la alta dirección y finalmente concluye con el diseño del plan maestro de implementación.

✓ *Paso 1 Marketing y Anuncio formal del CISOPE por la alta dirección:* La alta dirección comunicará la implementación del CISOPE en la planta de fosfato bicálcico, asegurando que todos comprendan las razones estratégicas. Se fomentará un ambiente propicio y se ofrecerá formación, promoviendo la filosofía japonesa de las 3Y (Yakuki, Yaruude, Yaruba).

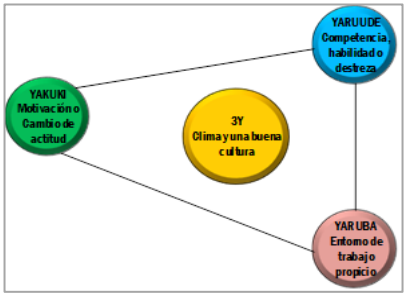

Fig. 13 Filosofía para el marketing del CISOPE

✓ *Paso 2 Creación de la organización interna CISOPE:* La alta dirección, incluyendo al gerente de producción y superintendentes, liderará la implementación del CISOPE. Se formarán comités para crear soporte organizacional, reconocer funciones jerárquicas y evaluar el desempeño y eficacia de cada comité en el proceso de implementación.

✓ *Paso 3 Establecer los objetivos y políticas del CISOPE:* La incorporación del CISOPE en la política de la compañía debe definir objetivos concretos y directrices a medio y largo plazo, alineados con el plan estratégico. Estos objetivos, consultados con las partes interesadas, deben ser desafiantes, alcanzables y expresarse numéricamente para medir la eficacia de la planta de fosfato bicálcico.

✓ *Paso 4 Diseñar un plan maestro para la implementación del CISOPE:* En el diseño del plan maestro de implementación

del CISOPE, se debe establecer las acciones necesarias para lograr los objetivos de la implementación, reflexionando y decidiendo sobre las formas más eficientes para descubrir las diferencias entre la situación actual y la situación futura en base a los objetivos buscados.

2) Fase 2 Implementación: En esta fase del CISOPE, se desarrolla la implementación de las diferentes herramientas que sustentan el sistema de mejora propuesto, basándose en el AMEF y finalizando con la estandarización del sistema de mejora.

✓ *Paso 5 AMEF:* Es la base del sistema de mejora propuesta para aumentar el OPE de la planta de fosfato bicálcico. Esta herramienta de análisis permite sustentar la aplicación de las herramientas del CISOPE y para ejecutarlo se debe contar con el equipo liderado por el superintendente de mantenimiento, quien guíe las reuniones y documente el análisis, contando con profundo conocimiento en la metodología.

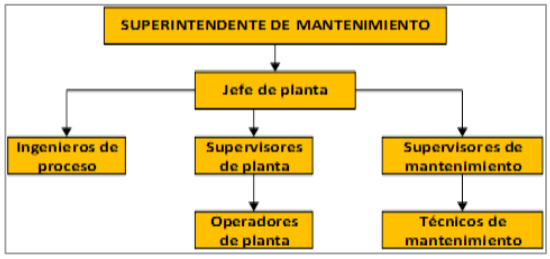

Fig. 14 Organigrama del equipo de la oficina técnica AMEF

El AMEF mide el número de prioridad de riesgo (NPR) de cada falla, según la formula y la escala.

$$NPR = (severidad)\,(ocurrencia)(detección)$$

TABLA V
VALORACIÓN DEL NPR

Numero de prioridad de riesgos (NPR)	Valor
Alto riesgo de falla	500-1000
Probabilidad media de riesgo	125-499
Bajo riesgo de falla	1-134
No existe riesgo	0

✓ *Paso 6 Desarrollo del talento humano:* El desarrollo del talento humano en la implementación del CISOPE mejora la rentabilidad y la satisfacción laboral. Los líderes deben capacitar al personal según sus niveles de capacidad para asegurar el éxito.

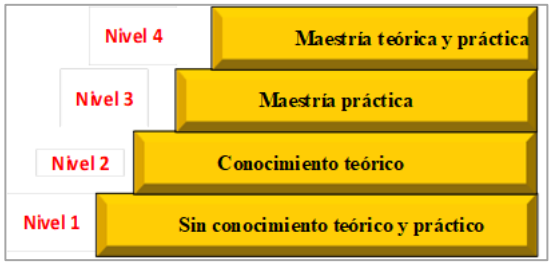

Fig. 15 Niveles de capacidad

✓ *Paso 7 Organización:* La organización se enfoca en la clasificación y orden de las mermas y desperdicios del producto, para ser recuperados mediante recursos disponibles en la planta.

TABLA VI
ESCALA DE COLORES DE CLASIFICACIÓN.

Colores	Clasificación
	Producto Recuperado
	Producto Recuperable
	Producto para Reproceso
	Producto inservible

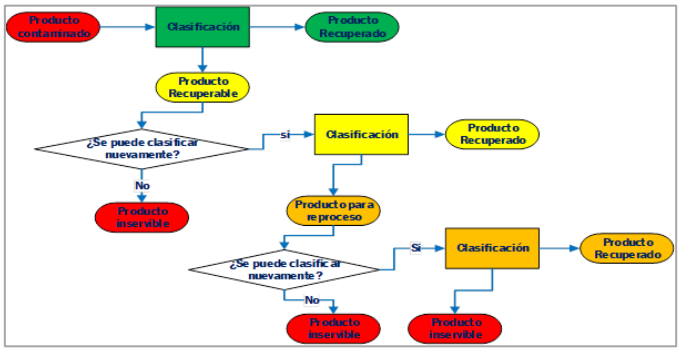

Fig. 16 Diagrama de flujo para la clasificación de producto

✓ *Paso 8 Mantenimiento Autónomo:*

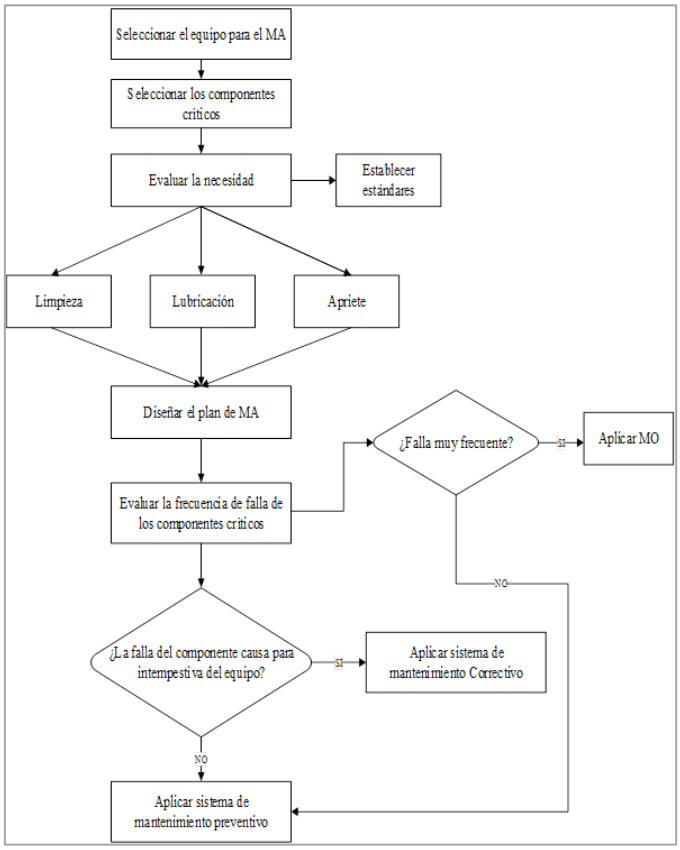

Fig. 17 Diagrama de flujo del sistema de mantenimiento autónomo

✓ *Paso 9 Mantenimiento planificado:* Se debe garantizar una relación estrecha entre las áreas de producción,

mantenimiento y logística, es la clave para garantizar que el mantenimiento planificado se realice con eficiencia. La implementación del mantenimiento planificado, se procede según las etapas siguientes

Etapa 1: Evaluar las condiciones iniciales del equipo.

- Preparar el histórico de los equipos y finalmente establecer las metas.
- Preparar o actualizar los registros del equipo.
- Formular e implantar estándares de evaluación del equipo.

Etapa 2: Diseñar un sistema de restauración de la disponibilidad del equipo

- Diseñar un sistema de mantenimiento correctivo
- Establecer acciones inmediatas para reducir las fallas del equipo

Etapa 3: Diseñar un sistema de información del mantenimiento

- Diseñar un sistema de mantenimiento planificado del equipo
- Diseñar un sistema de gestión del presupuesto del equipo
- Diseñar un sistema para controlar equipos de reserva y componentes de repuesto

Etapa 4: Diseñar un sistema de mantenimiento preventivo

- Diseñar un sistema de mantenimiento preventivo del equipo
- Diseñar un sistema de mantenimiento con parada general
- Diseñar un sistema de mantenimiento subcontratado

Etapa 5: Diseñar un sistema de mantenimiento predictivo

- Diseñar un sistema de mantenimiento predictivo del equipo
- Seleccionar equipos y herramientas para mantenimiento predictivo

Etapa 6: Evaluar el sistema de mantenimiento planificado

- Evaluar la disponibilidad y eficiencia de los equipos
- Evaluar la confiabilidad y mantenibilidad de los equipos como un sistema
- Evaluar los costos globales de mantenimiento.

✓ *Paso 10 Mejora Orientada:* Las mejoras orientadas se basan en la automatización del proceso y el cambio de materiales. La metodología se explica en la Fig. 18

✓ *Paso 11 Seguridad industrial:* Los controles administrativos al inicio de cada actividad, son trascendentales y deben ser firmados y autorizados por las partes interesadas. (Véase la Fig. 19).

✓ *Paso 12 Estandarización:* La estandarización es fundamental para mejorar el CISOPE, estableciendo criterios basados en procedimientos e indicadores, con información de los supervisores de planta.

Objetivos y Alcance: Se redactarán objetivos claros, iniciando con verbos infinitivos, y se considerarán factores de impacto como recursos y limitaciones regulatorias.

Términos y Responsabilidades: Se definirán términos relevantes y se describirán responsabilidades según el organigrama de la planta.

Descripción del Procedimiento: Se detallará el procedimiento para el inicio, desarrollo y cierre de actividades, mencionando documentos y registros asociados.

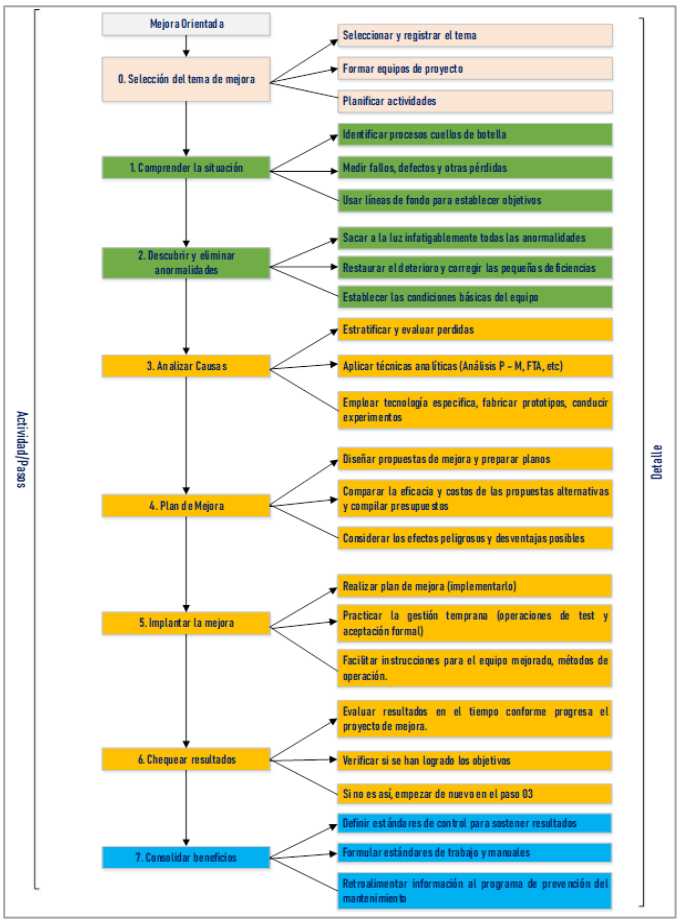

Fig. 18 Metodología de implementación de mejoras orientadas

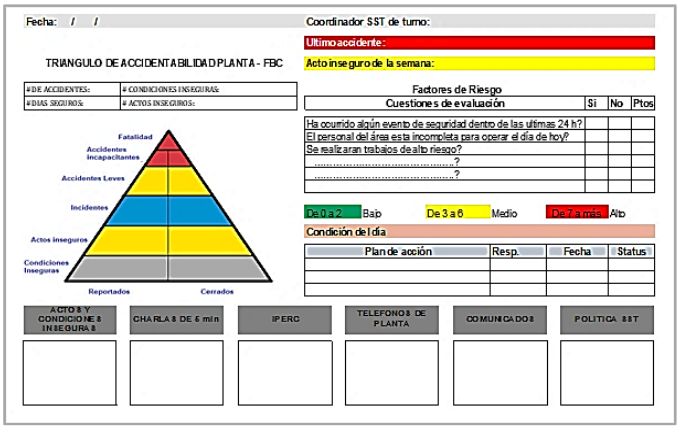

Fig. 19 Tablero de control SST de uso en campo de la planta de fosfato bicálcico.

Manual CISOPE: La planta de fosfato bicálcico debe mantener un manual que incluya objetivos, formatos de documentos, y funciones del personal involucrado. La documentación aprobada se difundirá en capacitaciones, con cada documento codificado y versionado. Se realizarán auditorías semestrales o anuales para evaluar indicadores y asegurar la mejora del CISOPE, estableciendo un benchmark e identificando desviaciones para acciones correctivas.

Metodología de Auditoría: Incluirá reuniones de apertura y cierre, encuestas a diferentes niveles, análisis de indicadores y un reporte con resultados y recomendaciones para la mejora continua del CISOPE.

3) Fase 03: Consolidación: La Fig. 20 ilustra la integración de herramientas CISOPE en el sistema de secado 01, fundamentada en AMEF y estandarización. La implementación se apoya en el desarrollo del talento humano y la seguridad industrial para asegurar el éxito del sistema.

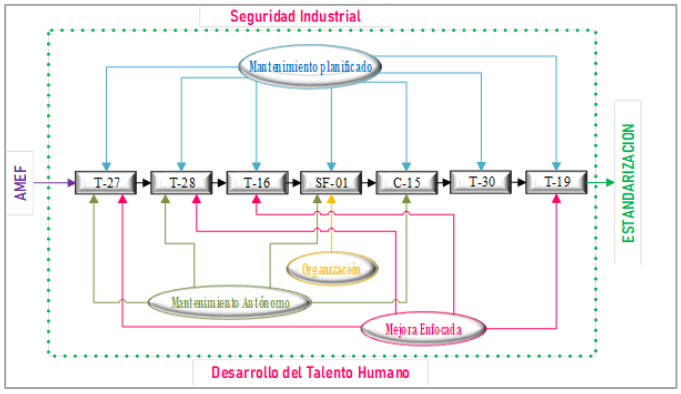

Fig. 20 Integración de las herramientas del CISOPE en el sistema de secado 01

Fase Evaluación Económica y Financiera: En esta fase, se evaluará la viabilidad económica y financiera y el riesgo del proyecto de mejora implementado en el sistema de secado flash 01, en un periodo de 3 años

A. Evaluación Económica y Financiera

1) Ingresos: La planta de fosfato bicálcico pierde $875 por hora de inactividad, habiendo parado 961 horas en 2019, principalmente por fallas de equipos y procesos. Con el CISOPE, se espera reducir las horas perdidas en un 64.65%, optimizando costos de mantenimiento correctivo.

TABLA VII
INGRESOS POR LA IMPLEMENTACIÓN DEL CISOPE

Costos	Actual	CISOPE
Costo de mantenimiento	$ 2,687,940.00	$ 2,260,386.24
Pérdida por paradas	$ 841,274.20	$ 695,586.70
Costo total anual	**$ 3,529,214.20**	**$ 2,955,972.94**
Ahorro	**$ 573,241.26**	

2) Egresos: Los egresos del CISOPE se destinarán a capacitaciones, mano de obra calificada y equipamiento para el mantenimiento y mejoras del sistema de secado 01 y se detallan en la TABLA IX.

3) Financiamiento: Puesto que el monto de inversión superar los $250000, por política de la empresa, el monto de la inversión será financiado, en un 70% por entidades financieras, a una tasa del 12%.

TABLA VIII
ESTRUCTURA DE INVERSIÓN

Denominación	Préstamo ($)	Accionistas ($)	Total ($)
Inversión Total	$ -343,639.30	$ -147,273.98	$ -490,913.28
%	70%	30%	100%

4) *Estructura de Pagos:* La inversión financiada, será amortizada en los 3 años del tiempo del proyecto de mejora, a una tasa del 12% anual y una cuota de $143074

TABLA IX
EGRESOS POR LA IMPLEMENTACIÓN DEL CISOPE

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
Inversión	**-$453,869**	**-$1,386**	**-$1,386**	**-$3,414**
Capacitaciones	**-$11,830**			
5 S (externa)	-$4,770			
AMEF (Externa)	-$2,479			
Equipos de proceso (Interna)	-$154			
Equipos de control (Interna)	-$132			
TPM (Externa)	-$4,081			
Seguridad industrial (Interna)	-$214			
Oerganización	**-$2,736**	**-$1,236**	**-$1,236**	**-$1,236**
Armario con puerta y llave para herramientas, utiles diversos	-$778			
Insumos de Limpieza	-$972	-$972	-$972	-$972
Etiquetadora	-$722			
Papeles y avisos	-$264	-$264	-$264	-$264
Mantenimiento autonomo	**-$2,278**	**-$150**	**-$150**	**-$2,178**
Tarjetas de mantenimiento autonomo	-$150	-$150	-$150	-$150
Herramientas	-$1,528			-$1,528
Impresión de manuales de operación	-$100			
Accesorios de lubricación	-$500			-$500
Costo de mantenimiento Planificado	**-$310,000**			
Mano de obra para Mantenimiento programado (Preventivo, predictivo y correctivo)	-$60,000			
Herramientas y Equipos	-$250,000			
Mejoras enfocadas	**-$127,025**			
Costo FRP	-$9,025			
Sensor de humedad	-$16,000			
Sensor de amperaje	-$38,000			
PLC	-$50,000			
Sistema Andon	-$14,000			
Costos operativos	**-$36,944**	**-$97,927**	**-$97,927**	**-$97,927**
Instalación (sistema de mejora enfocada)	-$36,944			
Mantenimeinto de sistema de mejora enfocada		-$12,703	-$12,703	-$12,703
Mantenimiento Sistema de mejora enfocada (Mano de obra)		-$60,000	-$60,000	-$60,000
Mantenimiento de herramientas y equipos		-$25,225	-$25,225	-$25,225
Gastos administrativos	**-$100**	**-$100**	**-$100**	**-$100**
Material de escritorio	-$100	-$100	-$100	-$100
Total	**-$490,913**	**-$99,414**	**-$99,414**	**-$101,441**

TABLA X
ESTRUCTURA DE PAGOS

Años	Saldo inicial	Amortizac.	Intereses	Cuota	Saldo final
1	$343,639.30	$101,837.16	$41,236.72	$143,073.87	**$241,802.14**
2	$241,802.14	$114,057.61	$29,016.26	$143,073.87	**$127,744.53**
3	$127,744.53	$127,744.53	$15,329.34	$143,073.87	**$0.00**

5) *Costo Ponderado:* El COK manejado por la compañía es de 15%. Se calcula a continuación el WACC en base a la tasa del monto financiado, 12%

TABLA XI
COSTO PONDERADO DEL CAPITAL

	Monto	Pond (%)	Costo	Costo (d.i.)
Deuda	$343,639.30	70%	12.0%	8.4%
Capital propio	$147,273.98	30%	15.0%	4.5%
TOTAL	**$490,913.28**		**= WACC = CPC**	**12.90%**

6) *Flujo financiero neto:* En la siguiente tabla, se muestra el flujo de caja financiero, en base a las amortizaciones e intereses anuales

TABLA XII
FLUJO DE CAJA FINANCIERO NETO

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
Principal	$343,639.30			
Amortización		-$101,837.16	-$114,057.61	-$127,744.53
Intereses		-$41,236.72	-$29,016.26	-$15,329.34
Financiam. Neto	**$343,639.30**	**-$143,073.87**	**-$143,073.87**	**-$143,073.87**

7) Flujo de caja económico financiero: En la siguiente tabla. Se muestra el flujo económico financiero en base a los ingresos y egresos de la implementación del CISOPE.

TABLA XIII
FLUJO DE CAJA ECONÓMICO FINANCIERO NETO

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
Ingresos		$573,241.26	$573,241.26	$573,241.26
Egresos	-$490,913.28	-$99,413.61	-$99,413.61	-$101,441.39
FCE	**-$490,913.28**	**$473,827.65**	**$473,827.65**	**$471,799.87**
Financiam. Neto	$343,639.30	-$143,073.87	-$143,073.87	-$143,073.87
FCF	**-$147,273.98**	**$330,753.78**	**$330,753.78**	**$328,726.00**

8) Indicadores económico financieros: De acuerdo a los resultados hallados mostrados en la tabla 5.8, el Valor Neto Actual Económico es mayor a cero ($589,608.61>0), el TIR es mayor a la tasa de descuento (79.88%>15%). El ROI, nos indica que, por cada dólar invertido en el proyecto de mejora, se lograra una ganancia de $ 2.50, mientras que el indicador B/C, nos indica que por cada dólar que nos cuesta implementar el proyecto, se estaría ganando $ 1.20, por tanto, según el PR, lograríamos recuperar la inversión en 15 meses. Finalmente, se puede demostrar que el proyecto es económicamente rentable.

TABLA XIV
INDICADORES ECONÓMICO FINANCIEROS

Indicadores Económicos	Valores
COK	15.00%
VPNE	$589,608.61
TIRE	79.88%
PR	15 meses
ROI	2.50
B/C	1.20
Indicadores Financieros	
WACC	12.90%
VPNF	$633,605.04
TIRF	217.47%

B. Evaluación del Riesgo

Evaluaremos el riesgo financiero mediante un análisis de sensibilidad del VAN, considerando la inversión y la reducción de ingresos. También analizaremos dos escenarios, pesimista y optimista, enfocados en el incremento del OPE.

1) Análisis de Sensibilidad: Según lo evaluado en la TABLA XVI, el proyecto seguirá siendo rentable a menos que los ingresos caigan más del 40% o la inversión supere el 90%. Por lo tanto, la implementación del CISOPE es financieramente confiable incluso en escenarios extremos.

2) Análisis de escenarios del éxito operativo propuesto: En un escenario pesimista, la implementación del CISOPE no sería rentable si el OPE solo aumenta 0.9%. Sin embargo, con una inversión del 10% y un incremento del OPE del 3.65%, se lograría recuperar la inversión en 72 meses, alcanzando el 60% del beneficio esperado.

TABLA XV
ANÁLISIS DE ESCENARIOS

	CISOPE	PESIMISTA	OPTIMISTA
VARIABLES			
OPE	85.50%	80.60%	83.40%
Beneficio	$573,241.26	$102,360.78	$343,944.76
Inversión	-$490,913.28	-$981,826.56	-$540,004.61
INDICADORES ECONOMICOS			
VPNE	$589,608.61	-$976,265.10	$36,943.45
TIRE	79.88%	-89.09%	16.89%
PR	15 meses	***	72 meses
ROI	8.81	-0.69	0.91
B/C	6.25	-0.99	0.07

TABLA XVI
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD INVERSIÓN VS INGRESOS

VANE	Ingresos										
Inversión	$589,608.61	-10%	-20%	-30%	-40%	-50%	-60%	-70%	-80%	-90%	-100%
10%	$409,633.40	$278,749.51	$147,865.63	$16,981.75	-$113,902.14	-$244,786.02	-$375,669.91	-$506,553.79	-$637,437.67	-$768,321.56	
20%	$360,542.07	$229,658.19	$98,774.30	-$32,109.58	-$162,993.47	-$293,877.35	-$424,761.23	-$555,645.12	-$686,529.00	-$817,412.89	
30%	$311,450.74	$180,566.86	$49,682.97	-$81,200.91	-$212,084.79	-$342,968.68	-$473,852.56	-$604,736.45	-$735,620.33	-$866,504.21	
40%	$262,359.41	$131,475.53	$591.65	-$130,292.24	-$261,176.12	-$392,060.01	-$522,943.89	-$653,827.77	-$784,711.66	-$915,595.54	
50%	$213,268.09	$82,384.20	-$48,499.68	-$179,383.57	-$310,267.45	-$441,151.33	-$572,035.22	-$702,919.10	-$833,802.99	-$964,686.87	
60%	$164,176.76	$33,292.87	-$97,591.01	-$228,474.89	-$359,358.78	-$490,242.66	-$621,126.55	-$752,010.43	-$882,894.31	-$1,013,778.20	
70%	$115,085.43	-$15,798.45	-$146,682.34	-$277,566.22	-$408,450.11	-$539,333.99	-$670,217.87	-$801,101.76	-$931,985.64	-$1,062,869.53	
80%	$65,994.10	-$64,889.78	-$195,773.67	-$326,657.55	-$457,541.43	-$588,425.32	-$719,309.20	-$850,193.09	-$981,076.97	-$1,111,960.85	
90%	$16,902.77	-$113,981.11	-$244,864.99	-$375,748.88	-$506,632.76	-$637,516.65	-$768,400.53	-$899,284.41	-$1,030,168.30	-$1,161,052.18	
100%	-$32,188.55	-$163,072.44	-$293,956.32	-$424,840.21	-$555,724.09	-$686,607.97	-$817,491.86	-$948,375.74	-$1,079,259.63	-$1,210,143.51	

IV. CONCLUSIONES

- ✓ El problema más crítico que afecta el proceso de la planta de fosfato bicálcico, es la falla de sus equipos, siendo las tres causas más críticas; la falta de planes de mantenimiento preventivo y predictivo y exceso de humedad del producto antes del secado.
- ✓ Las herramientas de la Manufactura Esbelta, que permiten la mejora de la eficacia global de la planta de fosfato bicálcico, se agrupan en el CISOPE, basado en el AMEF, Desarrollo del talento humano, Organización, Mantenimiento Autónomo, Mantenimiento Planificado, Mejora Orientada, Seguridad Industrial y Estandarización.
- ✓ La implementación de la propuesta de mejora (CISOPE), es económicamente viable, sustentada en el análisis de sensibilidad, Inversión vs ingresos, de donde se concluye que el proyecto dejará de ser rentable solo si, los ingresos se reducen más de 40% o la inversión aumenta más de un 90% respecto a la inversión ($490,913.28) e ingresos ($573,241.26) objetivos del proyecto de mejora.
- ✓ Durante los años posteriores al 2023, se ha implementado las mejoras orientadas basadas en la automatización del proceso y el cambio de materiales
- ✓ La aplicación del CISOPE, se enfocó en la reducción de las pérdidas del sistema de secado 01, que al reducir el 64.65% del total de horas perdidas en el sistema de secado, se logra un incremento del OPE de 7.3% y un ahorro de $ 573,241.26

V. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda la implementación del CISOPE en la industria de procesos, ya que se ajusta a los problemas más comunes en una planta de procesos; las fallas de los equipos y fallas de proceso, en general, asociados a la falta de estrategias eficaces de mantenimiento y de automatización.
- ✓ La gestión del CISOPE, se recomienda basarla en la medición de indicadores claves de desempeño (KPI)

REFERENCIAS

[1] Rivera, L., (2008). Justificación Conceptual de un Modelo de Implementación de Lean Manufacturing. Heurística, 15.

[2] Suzuki, T., (1995). TPM en industrias de procesos. Madrid, España: TGP Hoshin.

[3] Arata, A., (2009). Ingeniería y Gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales. 1era ed. Chile: Ril Editores

[4] Kirkpatrick, S., (1956). The Chemical Process Industries. 2da Edición. New York. USA: International Student Edition

[5] Felder, R., y Rousseau, R., (2011). Principios Químicos de los Procesos Químicos. México, D.F.: Editorial Limusa.

[6] Sinnott, R., y Towler, G., (2012). Diseño en Ingeniería Químico. Barcelona, España: Editorial Reverté.

[7] Moran, M. y Shapiro, H., (2018). Fundamentos de Termodinámica Técnica. Barcelona, España: Editorial Reverté.

[8] Rajadell, M., y Sánchez, J., (2011). Lean Manufacturing. La evidencia de una necesidad. Madrid, España: Díaz de santos.

[9] Cuatrecasas, Ll., (2017). Ingeniería de procesos y de planta, Ingeniería Lean. Barcelona, España. Profir Editorial.

[10] Ohno, T., (1988). Toyota Production System. Beyond Large Scale Production. New York, USA: Productivity Press

[11] Womack, J., & Jones, D., (2005). Lean Thinking. Como utilizar el pensamiento lean para eliminar los despilfarros y crear valor en la empresa. Barcelona, España: Gestión 2000

[12] King, P., (2009). Lean for the process Industrial. Dealing with complexity. New York, USA: Taylor &Francis group.

[13] Villaseñor A., y Galindo E., (2008). Conceptos y reglas de Lean Manufacturing. Monterey, Mexico: Limusa.