

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



**“IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE SELLADO EN BOMBAS DE
PROCESO EN INGENIO AZUCARERO”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL
TÍTULO DE INGENIERA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

ALICIA CONSUELO SANTIVÁÑEZ ARIAS

LIMA - PERÚ

2023

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 - Reglamento de Propiedad Intelectual)**

Document Information

Analyzed document	TSP_Alicia Santivañez Arias_final 03.11.Revisado sin comentarios.docx (D126968558)
Submitted	2022-02-03T18:05:00.0000000
Submitted by	Julio Vidaurre Ruiz
Submitter email	vidaurrejm@lamolina.edu.pe
Similarity	0%
Analysis address	vidaurrejm.unalm@analysis.orkund.com

Sources included in the report

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

**“IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE SELLADO EN BOMBAS
DE PROCESO EN INGENIO AZUCARERO”**

Presentado por:

ALICIA CONSUELO SANTIVAÑEZ ARIAS

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO
DE INGENIERA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

**M. Sc. Walter F. Salas Valerio
PRESIDENTE**

**Dr. Edwin O. Baldeón Chamorro
MIEMBRO**

**Dra. Indira M. Betalleluz Pallardel
MIEMBRO**

**Dr. Julio M. Vidaurre Ruiz
ASESOR**

**Lima – Perú
2023**

A mi madre que ha sido mi mejor ejemplo de esfuerzo y dedicación, a mis hijos a quienes amo muchísimo y espero también ser ejemplo e inspiración para ellos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todos y cada una de las personas que me ayudaron y aportaron con sus experiencias y conocimientos para ganar la experiencia con la que hoy cuento. Ha sido un largo camino de aprendizaje que ha sido enriquecido con cada uno de sus consejos, comentarios y también críticas. Guardo gratos recuerdos de cada uno de ellos y el olor de la caña siempre me los evocará.

Agradecer también a mi familia, madre, hermanas, amigos e hijos que siempre me apoyaron, ayudaron y me dieron el ánimo e impulso necesario para terminar esta etapa de mi vida y a Dios por todas las bendiciones que siempre ha tenido para mí.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. DEFINICIÓN DE AZÚCAR DE CAÑA.....	3
2.1.1. MATERIAS PRIMAS.....	4
2.1.2. TIPOS DE AZÚCAR.....	4
2.2. PROCESAMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCAR DE CAÑA.....	5
2.2.1. EXTRACCIÓN DE JUGO CRUDO POR DIFUSIÓN.....	7
2.2.2. BALANCE DE MASA EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE AZÚCAR...9	
2.2.3. SISTEMAS DE BOMBEO PARA TRANSPORTE DE FLUIDOS EN EL PROCESO DE AZÚCAR DE CAÑA.....	14
a. BOMBAS CENTRIFUGAS.....	14
a.1. SISTEMAS DE SELLADO EN BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	16
b. SELLOS MECÁNICOS.....	21
b.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SELLOS MECÁNICOS.....	22
b.1.1. SELLOS MECÁNICOS BALANCEADOS Y NO BALANCEADOS.....	23
b.1.2. OPERACIÓN DE SELLOS MECÁNICOS.....	23
b.1.3. PLANES DE CONTROL AMBIENTAL API PARA SELLOS MECÁNICOS....	27
III. METODOLOGÍA	31
3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN.....	31
3.2. MATERIA PRIMA E INSUMOS.....	31
3.2.1. BOMBA DE JUGO CRUDO DIFUSOR.....	31
3.2.2. BOMBA DE JUGO CLARIFICADO.....	31
3.3. MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS.....	32
3.3.1. MATERIALES.....	32
3.3.2. EQUIPOS.....	33
3.4. METODOLOGIA DE INVESTIGACIÓN.....	33
3.4.1. ENTREVISTAS CON JEFES, SUPERVISORES Y OPERARIOS.....	33
3.4.2. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	35
3.4.3. DIAGNÓSTICO.....	38
3.4.4. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE MEJORA.....	40

3.4.5. PROPUESTAS DE MEJORA.....	40
3.4.6. IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE NUEVOS SISTEMAS DE SELLADO EN BOMBAS DE PROCESO.....	40
3.4.7. AUMENTO DE LOS VOLÚMENES DE EXTRACCIÓN DE JUGO CRUDO EN EL DIFUSOR Y DE AZÚCAR CRUDO PRODUCIDO.....	42
3.4.8. ESTIMACIÓN DEL RETORNO DE INVERSIÓN PARA CADA APLICACIÓN.....	42
3.5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	43
3.5.1. ENTREVISTAS CON JEFES, SUPERVISORES Y OPERARIOS.....	43
3.5.2. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	44
3.5.3. DIAGNÓSTICO.....	46
3.5.4. PROPUESTAS DE MEJORA.....	47
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
4.1. ENTREVISTAS CON JEFES DE AREA.....	49
4.2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN Y DIAGNÓSTICO.....	49
4.3. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE PRODUCCIÓN ANUAL DE AZÚCAR.....	50
4.4. OBSERVACIÓN IN SITU Y ENTREVISTAS.....	52
4.5. BALANCE DE MASA EN EL DIFUSOR.....	55
4.6. ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE JUGO CRUDO.....	59
4.6.1. BOMBAS DE DIFUSOR EN LA ETAPA DE EXTRACCIÓN.....	59
4.6.2. BOMBAS DE CLARIFICACIÓN EN ÁREA DE ELABORACIÓN.....	63
4.7. ESTIMACIÓN DE LA DURACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SELLADO ACTUALES.....	64
4.8. PROPUESTAS DE MEJORA.....	67
4.9. IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE NUEVOS SISTEMAS DE SELLADO EN BOMBAS DE PROCESO.....	68
4.9.1 PROPUESTA DE SELLADO PARA CADA APLICACIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES MÍNIMAS PARA SU INSTALACIÓN.....	79
4.9.2 EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD Y DURACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SELLADO PROPUESTOS.....	93
4.10. AUMENTO DE LOS VOLUMENES DE EXTRACCIÓN DE JUGO EN EL DIFUSOR Y DE AZUCAR CRUDO PRODUCIDO.....	96
4.11. RETORNO DE LA INVERSIÓN DE LOS SISTEMAS DE SELLADO PROPUESTOS.....	98
4.11.1. COSTO DE INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE SELLADO PROPUESTOS.....	98
4.11.2. CÁLCULO DEL RETORNO DE LA INVERSIÓN.....	100

4.12. APLICACIÓN DE LAS COMPETENCIAS PROFESIONALES.....	102
V. CONCLUSIONES.....	105
VI. RECOMENDACIONES.....	107
VII.BIBLIOGRAFÍA.....	108
VIII. ANEXOS.....	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Condición de Bomba según desgaste del sistema de sellado	37
Tabla 2: Resumen de molienda y producción de azúcar en un ingenio azucarero	50
Tabla 3: Rendimientos de caña cosechada	52
Tabla 4: Balance de Masa en Difusor.....	56
Tabla 5: Cálculos del Balance de masa	58
Tabla 6: Registro de pérdidas en bombas del difusor.....	61
Tabla 7: Volumen total de fugas en bombas de difusor	61
Tabla 8: Duración de sistemas de sellado actuales.....	66
Tabla 9: Comparativo entre empaques y sello mecánico	81
Tabla 10: Comparativo de sello mecánicos	88
Tabla 11: Comparativo Económico Propuesta de sellado 01 vs sellado anterior.....	99
Tabla 12: Comparativo propuesta sellado 02 vs sellado anterior.....	100
Tabla 13: Cursos y conocimientos adquiridos y aplicados en el desempeño laboral.....	103
Tabla 14: Cursos y conocimientos adquiridos y aplicados en la implementación de mejoras en los sistemas de sellado en equipos rotativos.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de operaciones del proceso de elaboración de azúcar de caña.....	6
Figura 2: Diagrama de funcionamiento de un difusor.....	8
Figura 3: Curvas características de bombas.....	17
Figura 4: Punto de máxima eficiencia en una bomba.....	17
Figura 5: Empaquetadura en caja estopera.....	18
Figura 6: Sello mecánico instalado en bomba.....	20
Figura 7: Distorsiones en las caras de sello mecánico por acción de la temperatura y la presión.....	26
Figura 8: Diagrama de la secuencia metodológica seguida en la presente investigación ...	34
Figura 9: Diagrama de proceso del ingenio azucarero en estudio.....	53
Figura 10: Balance de masa en el difusor del ingenio azucarero en estudio.....	56
Figura 11: Bombas de difusor con fugas de jugo crudo.....	59
Figura 12: Bomba de jugo clarificado con fuga de jugo.....	64
Figura 13: Fugas de jugo en bomba del difusor durante el ciclo de vida del sistema de sellado.....	65
Figura 14: Bagacillo en caja estopera de bombas zona de extracción.....	70
Figura 15: Ciclo de vida de una empaquetadura.....	71
Figura 16: Empaques usados de bombas de circulación.....	71
Figura 17: Bocina desgastada de bomba de circulación.....	72
Figura 18: Desgaste de bocina por deformación de empaques.....	72
Figura 19: Flujograma de decisión para selección de sistemas de sellado en bombas.....	74
Figura 20: Esquema del plan API 32.....	85
Figura 21: Esquema del plan ambiental API 53A.....	89
Figura 22: Tanque auxiliar - instalación con 2 bombas.....	91
Figura 23: Esquema del plan ambiental API 52.....	96
Figura 24: Retorno de inversión propuesta de sellado 01.....	101
Figura 25: Retorno de inversión propuesta de sellado 02.....	102

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LAS PÉRDIDAS DE JUGO CRUDO EN BOMBAS DE CIRCULACIÓN.....	112
ANEXO 2: TABLA DE DENSIDADES EN SOLUCIONES AZUCARADAS EN FUNCIÓN DEL °BRIX Y LA TEMPERATURA.....	113
ANEXO 3: HOJA TÉCNICA DEL SELLO MECÁNICO CHESTERTON 150.....	114
ANEXO 4: HOJA TECNICA DE BUJE RESTRICTIVO 14K.....	117
ANEXO 5: HOJA TÉCNICA DE SELLO CHESTERTON 250.....	118
ANEXO 6: HOJA TÉCNICA DE TANQUE AUXILIAR DE BARRERA	121
ANEXO 7: INSTRUCCIONES DE INSTALACIÓN SELLO MECÁNICO 150	124
ANEXO 8: INSTRUCCIONES DE INSTALACIÓN DE SELLO MECÁNICO 250	127
ANEXO 9: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA EVOLUCIÓN DEL DESEMPEÑO PROPUESTA DE SELLADO 150 + 14K.....	129
ANEXO 10: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA EVOLUCIÓN DEL DESEMPEÑO PROPUESTA DE SELLADO 250 + TANQUE AUXILIAR DE FLUIDO DE BARRERA	131
ANEXO 11: FORMATO DE SEGUIMIENTO PROPUESTA DE SELLADO 150 + 14K	133
ANEXO 12: FORMATO DE SEGUIMIENTO PROPUESTA DE SELLADO 250 + TANQUE AUXILIAR	134

RESUMEN

La eficiencia en la producción de azúcar se mide a través del porcentaje de recuperación de sacarosa extraído a partir del jugo de caña. Durante el proceso de producción se presentan pérdidas de jugo determinadas y medidas a través de sacarosa remanente en subproductos del proceso, pero también otras pérdidas indeterminadas no contabilizadas que se dan en su mayoría por pérdidas físicas durante el transporte de fluidos o por inversión y degradación de la sacarosa. Se observó que en el área de extracción no se contabilizaban las pérdidas físicas de jugo crudo por deficiente sellado de las bombas de recirculación del difusor, por ello se propuso medir las pérdidas físicas de jugo crudo en dicha zona, reemplazar el sistema de sellado actual de corta vida útil por un sistema que incluía un sello mecánico para eliminar fugas y aumentar la cantidad de jugo ingresado a fábrica. Por otro lado, en bombas de jugo clarificado el sello mecánico instalado duraba ocho meses, se propuso mejorar la vida útil del sello mecánico y reducir los gastos de mantenimiento por reparaciones. Para este tipo de aplicaciones, los sellos mecánicos requieren de planes ambientales de apoyo con recirculación de agua que generalmente ingresa al proceso, esto reduce la eficiencia del proceso en la recuperación de sacarosa. Se propusieron planes ambientales sin ingreso de agua al proceso. Se implementaron las propuestas de sellado, se monitorearon el tiempo de trabajo en las bombas sin fuga. El sello en la bomba del difusor trabajó 20 meses y la eliminación de fugas permitió procesar 439kg adicionales de azúcar anual, reducir los costos de mantenimiento con ahorro de \$ 2 786,60 anuales por bomba. El sello instalado en la bomba de jugo clarificado trabajó 26 meses sin fuga que representó ahorros de \$ 3 677,29 anual en costos de mantenimiento.

Palabras clave: Difusor, balance materia, azúcar, pérdidas, mieles, sello mecánico

ABSTRACT

Efficiency in sugar cane production can be measured from the Recovery percentage of sucrose obtained since the raw juice. In all the process there are losses of cane juice called determinate losses that are measured in the remain sucrose of the sub products like molasses, but there is also another loss that cannot be accurately determinate because of the physical losses during the fluid transportation in rotary equipment, sucrose inversion and degradation. In the extraction area there were a great amount of losses that were not considered nor measured. In all the recirculation pumps of the diffuser there were losses of raw juice because of a poor sealing system in the pumps, so we proposed measurements of raw juice loss, replace for a better sealing system in the pumps which included a mechanical seal to eliminate the juice loss and to increment the amount of raw juice entrance to the sugar plant. By the other hand in clarifying juice pumps the mechanical seals installed go on by 8 months so we proposed to increase the life time of the mechanical seal and to reduce the maintenance costs. To sealing this type of fluids the mechanical seals needs of an auxiliary environmental plans with water recirculating which enter to the process and reducing the Recovery efficiency of the plant. We proposed environmental controls without entering water to the process. Implementing improvements were made and monitored the new life time for the new mechanical seals. The mechanical seal in the diffuser pump work out for 21 months and the sugar recovered from the loss were 469 kg of additional sugar, the maintenance costs were reduced and there were \$ 3 202,46 in savings per year. The mechanical seal in the clarifying juice work out 26 months without losses and there were savings of \$ 3 677,29 per year.

Key words: Diffuser, mass balance, sugar, losses, molasses, mechanical seals

I. INTRODUCCIÓN

Luego de la reforma agraria en 1969 los ingenios azucareros atravesaron una aguda crisis debido a la falta de mantenimiento y renovación de equipos. El estado promulgó en marzo de 1996 el D.S. 802 para reactivar y sanear económicamente estas empresas convirtiéndolas en sociedades anónimas, lo que permitió el ingreso de capitales frescos de nuevos accionistas mayoritarios (Inga, 2003). Esto trajo mejoras en la producción de caña y la modernización de fábricas orientadas a elevar la eficiencia de los procesos de producción. Se incrementaron las hectáreas de caña cultivadas de 47 628Ha en 1993 a 80 069Ha en 2011 (OEEE, 2011) y 184 000Ha en 2019. La producción de azúcar pasó de 400 186TN en 1993 a 855 503TN en 2009 y 1 293 600TN en 2019 (Apoyo & Asociados, 2020). Según APAAD (2020), por primera vez en el 2019 la industria azucarera logró satisfacer totalmente la demanda interna de azúcar en el Perú y realizó exportaciones por 86 391 TN. Al 2019 este sector aporta el 3 por ciento del valor bruto de producción (VBP) agrícola y ha tenido un crecimiento sostenido a un ritmo promedio de 2,8 por ciento anual. Apoyo & Asociados (2020), refiere una mejora en los índices de extracción, recobrado, retención y coeficiente de eficiencia en el procesamiento de azúcar en los últimos años.

En la recuperación de azúcar juega un papel muy importante el control de pérdidas en cada etapa del proceso. Según Sandoval (2002) existen pérdidas indeterminadas debido, por un lado, a la eficiencia del proceso físico-químico (inversión y descomposición de la sacarosa) y por otro lado a pérdidas mecánicas por fugas en tuberías, tanques y bombas; estas últimas pérdidas generalmente no se contabilizan y no son recuperables.

Es prioridad en todo ingenio azucarero llevar al mínimo posible estas pérdidas. Según indica Rein (2007) es aconsejable contar con información confiable sobre los balances de materia para poder estimar cuanta azúcar se está perdiendo, identificar donde se pierde y así poder medir los cambios en estas pérdidas cuando se realicen las mejoras o controles más efectivos.

Las fugas en los equipos rotativos de transporte de jugos y mieles son uno de los principales causantes de las pérdidas mecánicas de sacarosa. Es por ello que resulta importante asegurar un sellado efectivo en estos equipos para que realicen no solo el transporte seguro de los fluidos sino también que minimicen sus pérdidas sobretodo de mieles de alto °Brix en todo el proceso.

Los sellos mecánicos en bombas centrifugas son los sistemas de sellado más confiables. Dadas las características abrasivas y no lubricantes de los jugos y mieles de caña éstos no ofrecen condiciones adecuadas para la operación y duración de sellos mecánicos. Es por ello que deben apoyarse de sistemas auxiliares de lubricación que ofrecen ambientes adecuados para su funcionamiento y duración. La mayoría de veces se utiliza algún fluido compatible con el proceso y que provea un ambiente favorable para la lubricación y control de temperatura pero que no signifique alteraciones en el proceso productivo.

El presente trabajo tuvo como objetivo implementar sistemas de sellado confiables en bombas de proceso en un ingenio azucarero que reduzcan las pérdidas de fluido durante el proceso y aseguren una duración prolongada del sistema de sellado y del equipo de bombeo.

Para ello fue necesario:

- Estimar el balance de materia en el proceso de elaboración de azúcar e identificar las pérdidas durante la etapa de extracción.
- Cuantificar las pérdidas de fluido durante el funcionamiento de los equipos de bombeo en proceso y determinar el tiempo de duración de los sistemas de sellado utilizados en los equipos de bombeo.
- Proponer un modelo de sello mecánico y plan auxiliar adecuado para los sistemas de bombeo y especificar las condiciones mínimas necesarias para su instalación.
- Evaluar la efectividad de los sistemas de sellado propuestos durante el funcionamiento de los equipos de bombeo.
- Determinar la duración de los sistemas de sellado propuestos y estimar el retorno de inversión para cada aplicación.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. DEFINICIÓN DE AZÚCAR DE CAÑA

El azúcar es un endulzante natural constituido por cristales sueltos de sacarosa y obtenido mediante procesamiento de los jugos extraídos de diferentes materias primas como la caña de azúcar, la remolacha azucarera, el sorgo azucarero o el arce de Canadá. La principal materia prima para la producción de azúcar a nivel mundiales la caña de azúcar seguida de la remolacha azucarera (Romero, 2010).

Rein (2007) indica que el azúcar de caña está compuesto de sacarosa, un disacárido que se forma mediante un proceso complejo producido por la fotosíntesis en el tallo de la caña de azúcar a partir de la unión de dos monosacáridos o azúcares simples: la glucosa y la fructosa. Los tallos de caña contienen un jugo rico en sacarosa el cual es extraído y cristalizado en los ingenios azucareros formando el azúcar granulado que se consume ampliamente a nivel mundial.

Además, Rein (2007) explica que la inversión de la sacarosa sucede por hidrólisis, que bajo las condiciones adecuadas y junto con una molécula de agua separa la sacarosa en sus 2 azúcares simples: glucosa y fructosa lo cuales no son cristalizables. Estos azúcares se encuentran en solución junto con otros componentes como la fibra que le brinda la rigidez a la caña de azúcar y es lo que comúnmente se llama jugo crudo.

Chen (1993) explica que la producción de azúcar se basa en la habilidad de la sacarosa de cristalizarse a partir de la sobresaturación en un jarabe muy espeso mientras que la glucosa y fructosa permanecen disueltos en el jarabe, a estos azúcares se les llama azúcares invertidos. Existen otros azúcares en la caña que conforman ceras y gomas de la pared celular.

2.1.1. MATERIAS PRIMAS

Según Rein (2007) la caña de azúcar es la materia prima utilizada para la obtención del azúcar de caña. Los tallos maduros contienen nódulos cada 150 a 200mm y es en ese espacio entre esos nódulos donde se concentra la mayor parte del jugo de caña. Este jugo está compuesto por los azúcares en disolución (10 – 16%), la fibra de caña (11 – 16%) y agua (73 – 76%).

Romero (2010) indica que la caña de azúcar se desarrolla bien en climas tropicales y sub tropicales hasta los 25° del Ecuador. En el Perú existen microclimas muy favorables para la producción de caña de azúcar, sobre todo en los valles del norte del país.

Existen una gran variedad de especies de caña algunas mucho más productivas que otras, la productividad de las especies depende también de los factores climáticos, disponibilidad de agua, prácticas de cultivo y duración de la temporada de cultivo. Las temporadas de cultivo pueden ir desde los 8 meses (Louisiana) hasta los 2 años (Hawái) (Rein, 2007).

Los cultivos de caña no se agotan una vez cosechados, se cortan retoños de caña los cuales rebrotan y producen nuevas cosechas de caña de azúcar. Se pueden dar varios rebrotes antes de decidir cortar definitivamente la planta. La caña generalmente es cultivada durante el invierno y la extensión de la temporada de molienda está condicionada por las condiciones del clima. Dadas las condiciones climáticas excepcionales en los países de Perú, Colombia y Hawái se puede cultivar y cosechar caña de azúcar durante todo el año (Rein, 2007).

2.1.2. TIPOS DE AZÚCAR

En la industria nacional se elaboran los siguientes tipos de azúcar (Romero, 2010):

- Azúcar rubia o morena: Es un azúcar obtenido de la cristalización de la sacarosa constituido por cristales sueltos cubiertos con restos de melaza, de color caramelo o rubio. Es el que contiene mayor humedad debido a la característica higroscópica de la melaza (máximo 1% m/m) y una polarización mínima de 96 (°S a 20°C).
- Azúcar blanca: Es un producto obtenido del cocimiento del jugo de caña, constituido por cristales sueltos de sacarosa, de color blanco, que no han sido sometidos a

proceso de refinación. Tiene una polarización mínima de 99.4 (°S a 0°C) y una humedad máxima de 0.075% m/m.

- Azúcar blanca especial: Es un producto obtenido del cocimiento del jugo de caña, constituido por cristales sueltos de sacarosa, de color blanco, que no han sido sometidos a proceso de refinación. Tiene una polarización mínima de 99.6 (°S a 0°C) y una humedad máxima de 0.07% m/m.
- Azúcar refinada: Es un producto obtenido del cocimiento del jugo de caña, constituido por cristales sueltos de sacarosa, de color blanco y que han sido sometidos a proceso de refinación. Tiene una polarización mínima de 99.8 (°S a 0°C) y una humedad máxima de 0.05% m/m.

2.2. PROCESAMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE AZÚCAR DE CAÑA

El proceso de elaboración de azúcar consiste en extraer la sacarosa líquida presente en la caña de azúcar y transformarla en cristales para facilitar su almacenaje, transporte y consumo (Sandoval, 2002).

En la

Figura 1 se muestra en detalle el diagrama de procesos para la obtención de azúcar (sacarosa) a partir de la caña de azúcar como método que incluye el proceso de difusión como método de extracción de jugo crudo.

El proceso de elaboración de azúcar se inicia con la recepción y pesaje de la caña de azúcar dentro de las instalaciones del ingenio. Luego del pesado de la caña se realiza su lavado y preparación que consiste en el corte y desfibrado para lograr una máxima rotura y exposición de las fibras de caña que faciliten la extracción (Sandoval, 2002). En la mayoría de ingenios azucareros ubicados en el Perú la extracción del jugo de caña se realiza a través de molinos en serie que estrujan la caña para obtener jugo de caña. El jugo obtenido en la primera extracción se envía directamente a fábrica ya que contiene un alto porcentaje de sólidos totales (°Brix). En las siguientes extracciones se añade agua de imbibición a 60 – 80 °C que ayuda a extraer más jugo al bagazo de caña. Muchas veces se utiliza el jugo obtenido desde

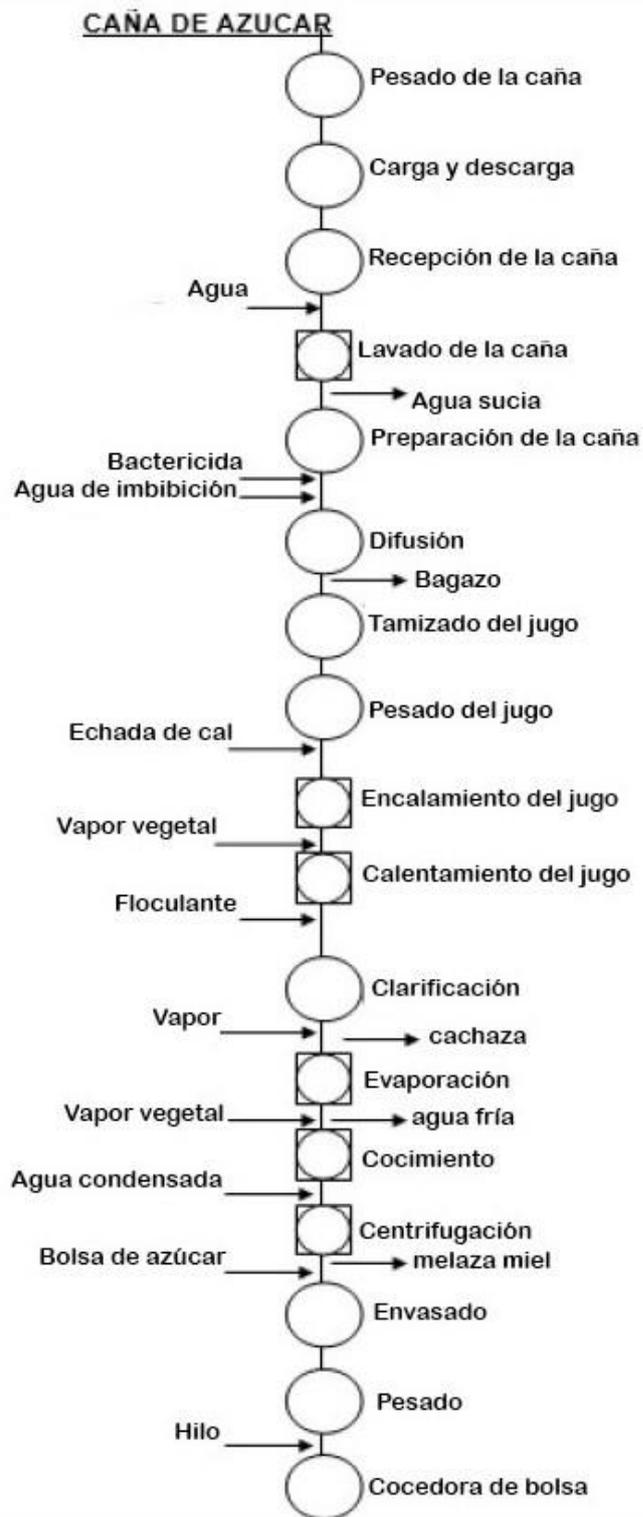


Figura 1: Diagrama de operaciones del proceso de elaboración de azúcar de caña

la segunda extracción como imbibición de la siguiente molienda y solo en el último molino se agrega agua caliente (Chacón, 2014).

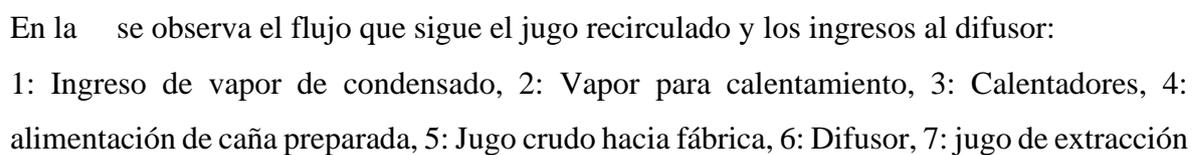
Sandoval (2002) refiere, sin embargo, que el tándem de molinos no es el único método utilizado para la extracción. En algunos ingenios se utiliza también la difusión como método de extracción ya que permite obtener un jugo con mayor °Brix y menos turbios, las inversiones en equipos son menores y requieren menor mantenimiento lo que permite una mayor continuidad de las operaciones (Rein, 2007).

El jugo crudo que llega a la planta se somete al proceso de encalado para estabilizar el pH y detener la inversión de sacarosa, luego a la clarificación para limpiar impurezas y restos de bagacillo presentes en el jugo crudo. El jugo clarificado es sometido a sucesivas etapas de evaporación al vacío hasta lograr un jarabe de 65 a 66 °Brix. Esta miel rica es enviada a los cristalizadores donde se forman los cristales de azúcar. Las mieles ricas en grano de azúcar son enviadas a las centrifugadoras las cuales separan los granos de azúcar de las mieles.

El azúcar en grano se envasa y almacena mientras que las mieles no cristalizadas son enviadas nuevamente a evaporación para reproceso (Delgado, 2018).

2.2.1. EXTRACCIÓN DE JUGO CRUDO POR DIFUSIÓN

Los difusores son equipos de extracción a contracorriente que trabajan con el principio de celdas o etapas. El equipo es alimentado con caña desfibrada para formar una cama uniforme en la mesa del difusor. El jugo es bombeado sobre esta cama movable a través de las celdas o pasos que pueden ser desde 10 hasta 18. El jugo de una celda es bombeado a la celda siguiente recirculando el jugo a través del difusor. El líquido bombeado trabaja como agua de imbibición para extraer la sacarosa de la caña. El jugo crudo recolectado es enviado a fábrica y el bagazo es enviado a un molino para extraer el jugo remanente. El jugo de esta extracción es ingresado nuevamente al difusor como agua de imbibición. El difusor además es alimentado con agua de imbibición caliente y vapor de condensado directamente a la mesa de caña para aumentar la temperatura en el proceso y facilitar la extracción del jugo de caña (Rein, 2007).

En la  se observa el flujo que sigue el jugo recirculado y los ingresos al difusor:

1: Ingreso de vapor de condensado, 2: Vapor para calentamiento, 3: Calentadores, 4: alimentación de caña preparada, 5: Jugo crudo hacia fábrica, 6: Difusor, 7: jugo de extracción

del molino, 8: tornillo fijador, 9: Agua de imbibición, 10: Bagazo, 11: molino 12: celdas, 13: rodillo de presión, 14: bagazo.

Moya (2000) refiere que la extracción de jugo en el difusor se da de tres maneras: lixiviación, difusión y presión. El difusor trabaja bajo el principio de extracción contra corriente; la caña desfibrada es sometida a corrientes de jugo caliente y agua de imbibición que extraen el jugo por lixiviación de las fibras rotas (lavadas sucesivas de la caña). Las temperaturas de 75 °C del jugo y el agua de imbibición vuelven la pared celular de la caña permeable lo que hace salir al jugo por difusión y por último en la etapa final para extraer el jugo saturado en el bagazo se utiliza un molino. Para producir los flujos de corrientes y contracorrientes es necesario recircular el jugo y agua de imbibición con bombas que se encuentran instaladas alrededor del difusor.

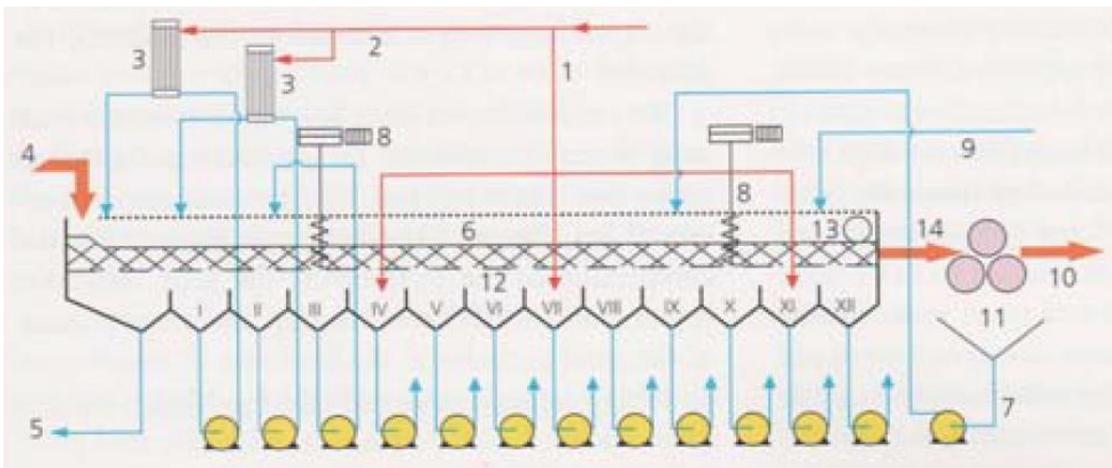


Figura 2: Diagrama de funcionamiento de un difusor

FUENTE: Rein (2007)

Según Rein (2007) la difusión es un proceso en el cual moléculas disueltas en soluciones a diferentes concentraciones se difunden hacia soluciones con menores concentraciones hasta lograr el equilibrio. El proceso de extracción por difusión puede explicarse como dos procesos de transferencia de masa en paralelo: uno es rápido que realiza la extracción de la sacarosa de las células rotas en la superficie de la caña preparada. Esta tasa de transferencia es influenciada por la velocidad del flujo de agua inyectada. El otro es un proceso más lento y representa la transferencia de la sacarosa desde las células en el interior de la caña. En este

segundo proceso la tasa de extracción o transferencia depende de la temperatura que afecta al índice de difusión.

Chen (1993) indica que una mejor preparación de caña logra que la sacarosa contenida en el jugo sea fácilmente extraída y reduce la cantidad de sacarosa restante que debe extraerse por el mecanismo de la difusión.

La relación entre la cantidad de caña y la cantidad de agua de imbibición adicionada es también importante. El proceso de transferencia de masa involucra gradientes de concentraciones conforme avanza el proceso, por lo que utilizar grandes cantidades de agua genera grandes diferencias de concentraciones lo que beneficia a la velocidad de extracción. Adicionalmente la velocidad del flujo del agua de imbibición también beneficia la extracción (Rein, 2007).

2.2.2. BALANCE DE MASA EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE AZÚCAR

Según Rein (2007) el principal objetivo de procesar la caña es recobrar el azúcar contenido en ella. No es posible “fabricar” sacarosa sino solo recuperarla a partir de la caña de azúcar. Por ello es necesario realizar el balance de masa para llevar un control de las cantidades de materiales necesarios y su influencia en el proceso productivo, facilitar la comprensión integral del proceso y el máximo aprovechamiento de las materias primas utilizadas (Serrano et Al, 2017).

Sandoval (2002) refiere que mediante el balance de masa se lleva el control del proceso y se indica la eficiencia de la fábrica en la recuperación de sacarosa lo que incluye también evaluar las pérdidas por distintos conceptos implícitos en el proceso de extracción de azúcar.

El jugo de caña pesado debe contabilizarse y se toma como base para el inicio del control del balance de masa según la ecuación:

$$Tn \text{ caña} + Tn \text{ agua imbibición} = Tn \text{ jugo crudo} + Tn \text{ bagazo} \quad (01)$$

El porcentaje de extracción de jugo se estima de la siguiente manera:

$$\% \text{Extracción jugo crudo} = \frac{Tn \text{ jugo crudo}}{Tn \text{ caña}} \times 100 \quad (02)$$

En algunos ingenios la caña pasa por estaciones de lavado para quitarle, tierra, hojas y otras suciedades provenientes del campo. Según Rein (2007) este proceso puede hacer que el agua elimine hasta un 10% de la sacarosa presente en la caña especialmente si esta ha sido cortada y desfibrada. Las estimaciones son muy variadas e incluso no toman en cuenta la fermentación del azúcar en las estaciones de lavado. Si estas pérdidas no son medidas, no pueden ser controladas por lo que es preferible en lo posible evitar el lavado de caña preparada. Adicionalmente una mala calidad de agua aumenta las impurezas en la carga ingresada a fábrica (por mal lavado), reduce la eficiencia del proceso de imbibición y por lo tanto aumenta las pérdidas de azúcar en mieles finales.

Sandoval (2002) refiere una lista de áreas en fábrica que deben ser investigadas para establecer posibles pérdidas escondidas de azúcar y dentro de las cuales nombra los derrames o fugas por empaque de bombas. Estas pérdidas escondidas ocurren desde el proceso de corte, hasta antes del pesado de jugo diluido para ingreso a fábrica, están asociadas a saneamiento defectuoso, pérdida de caña en los molinos y pérdida de jugo en la recirculación. Escapan a la detección normal cuantitativa, pero es necesario tomarles atención y reducir las ya que más caña y jugo ingresado a fábrica significa más azúcar producida (Chen, 1993).

Es necesario llevar un control de la cantidad de sacarosa en todas las etapas del proceso y para ello se realizan diferentes medidas tanto al jugo como a las mieles y otros subproductos.

La medida más popular es el °Brix que se mide con un refractómetro azucarero. Este refractómetro indica los valores medidos como porcentaje de sacarosa, pero esto se cumple solo si es una solución pura, en realidad lo que mide en soluciones impuras como es el caso del jugo de caña es el porcentaje de azúcares totales (Sandoval, 2002).

Sandoval (2002) refiere también que el Pol es utilizado para medir la cantidad de sacarosa presente en una solución. Este mide la rotación óptica de una luz polarizada que pasa a través de una solución y es representada como porcentaje. Se mide con un polarímetro o sucrolaser. Para medir la sacarosa en jugo crudo y melaza se puede utilizar el % sólidos totales y la medida de POL es adecuado para medir sacarosa en bagazo y cachaza (Rein, 2007)

La pureza del azúcar se calcula con la siguiente formula:

$$Pureza = \frac{POL \times 100}{^{\circ}Brix} \quad (03)$$

Según Rein (2007) el balance de la sacarosa difiere del balance del POL dependiendo de la ratio POL/Sacarosa. Estos son determinados por el nivel de azúcares reductores presentes en función de la madurez de la caña, los métodos de clarificación del jugo y los análisis de POL.

La caña de azúcar puede presentar pérdidas en la cantidad de sacarosa durante su almacenaje, lavado y preparado para procesamiento, por ello lo más razonable para llevar un adecuado control del balance de materia es medir la cantidad de sacarosa desde la salida del jugo crudo de la planta de extracción hacia la fábrica (Rein, 2007).

Un buen control del proceso incluye la estimación de las pérdidas de sacarosa durante el proceso de producción. Se puede encontrar sacarosa remanente en el bagazo, en las melazas, y en la cachaza, estas pérdidas pueden ser cuantificadas con la medición del POL o porcentaje de sacarosa remanente y son denominadas pérdidas determinadas (Sandoval, 2002).

$$POL \text{ Total de caña} = POL \text{ Recobrado en azúcar} + POL \text{ Pérdida total} \quad (04)$$

Considerando las pérdidas totales:

$$POL \text{ Pérdida total} = POL \text{ Pérdida bagazo} + POL \text{ Pérdida fábrica} \quad (05)$$

Chen (1993) afirma que el bagazo resultante luego de la extracción puede contener de tres por ciento a más de sacarosa. La cachaza contiene impurezas y restos de fibra extraídas del jugo crudo a través de los filtros rotativos que contienen aun restos de sacarosa de uno a cuatro por ciento y una humedad del sesenta a ochenta por ciento.

La melaza es un subproducto de la producción de azúcar y consiste en las mieles que no llegaron a formar cristales o granos de azúcar. Generalmente contiene sacarosa invertida pero también contiene sacarosa arrastrada por ciertas condiciones en los procesos de cocimiento, centrifugación y secado (Chen, 1993).

Es importante contar con información confiable de las pérdidas de azúcar para estimar que cantidad se pierde, donde y medir el efecto de los cambios o mejoras que se realicen para reducir estas pérdidas. Ya que las pérdidas en el proceso de lavado son importantes se puede analizar el agua de desecho de esa zona para medir azúcares y fermentados que den una estimación de la cantidad de azúcar presente. Si no se miden las pérdidas no podrán ser controladas (Rein, 2007).

La caña debe ser muestreada después de la preparación ya que en almacenamiento puede cambiar sus porcentajes de sacarosa por inversión. Los cálculos de balance de masa y recuperación pueden contener errores por las demoras entre el muestreo y la molienda (Rein, 2007).

Existen también otras pérdidas llamadas indeterminadas que se refieren a las pérdidas físicas y químicas dentro del proceso durante el lavado de la caña, derrames de material, fugas por tanques y tuberías, fugas por empaques de bombas, liquidaciones de tanques, arrastres en condensadores y filtros entre otros (Sandoval, 2002).

Sandoval (2002) refiere que estas pérdidas no son cuantificables ni recuperables ya que generalmente se pierden en el desagüe o pisos del ingenio por lo que son calculadas por defecto en el balance de masa.

$$POL \text{ Pérdida fábrica} = POL \text{ Pérdida melaza} + POL \text{ Pérdida cachaza} \quad (06) \\ + POL \text{ Pérdida indeterminados}$$

Por lo tanto:

$$POL \text{ Pérdida indeterminados} = POL \text{ Pérdida fábrica} - \quad (07) \\ POL \text{ Pérdida bagazo} - POL \text{ Pérdida melaza} - POL \text{ Pérdida cachaza}$$

Una de las ventajas de utilizar un difusor en la zona de extracción en un ingenio azucarero es la facilidad y bajo costo del mantenimiento del equipo ya que no es necesario detener ni el equipo ni la planta entera para intervenirlo. En el caso de extracción con el uso de molinos se requiere el paro general de la planta para intervención por mantenimiento lo que acarrea un costo mucho más elevado si se considera el costo de producción horaria y el ciclo de inicio de generación de energía (Chen, 1993).

Sandoval (2002) indica también que es necesario e importante conocer la cantidad de azúcar que trae la caña para en función de ello evaluar la eficiencia del ingenio en la extracción de la misma a partir del jugo diluido que ingresa al proceso. Este jugo es sometido a varios procesos y en cada uno de ellos pueden existir pérdidas de azúcar por distintas razones; el azúcar recuperado al final de todo el proceso representa solo un porcentaje del azúcar ingresado a fábrica como jugo diluido y que se denomina % Eficiencia o Recuperabilidad.

$$\% \text{ Recuperabilidad} = \frac{Tn \text{ Azúcar recuperado}}{Tn \text{ Sacarosa en caña}} \times 100 \quad (08)$$

Existe también una importante cantidad de sacarosa en fabrica que representa el stock de sacarosa en proceso. Para realizar un balance a conciencia es necesario estimar este stock al inicio del periodo a estimar y luego medirlo nuevamente hacia el final del periodo revisado. Para ello se calcula la cantidad de material en procesamiento en cada uno de los tanques y recipientes de la planta y se mide o estima la cantidad de sacarosa contenida en ellos. Ya que la cantidad de sacarosa en proceso es aproximada a tres veces la cantidad de sacarosa procesada en un día, no es viable realizar cálculos de balances diarios porque no serían confiables. Un periodo mínimo para un balance podría ser una semana y solo si los cambios de stock son muy pequeños (Rein, 2007).

Rein (2007) indica también que no solo la cantidad sino también la pureza del azúcar en stock puede variar del inicio de un periodo a otro. Para propósitos de balance de materia la porción de material en stock que será recuperable como sacarosa se deberá calcular teniendo en cuenta la pureza del azúcar producido y asumiendo una pureza determinada en la melaza. El estimado de azúcar recuperable en stock debe ser añadido a la cantidad de azúcar producido para tener un estimado real de la cantidad de azúcar producida.

Los balances de materia calculados en periodos entre las paradas programadas de mantenimiento suelen dar montos más reales ya que entre esos periodos el stock de material en proceso es reducido debido a que todos los tanques y recipientes son liquidados para realizar los mantenimientos correspondientes (Rein, 2007).

2.2.3. SISTEMAS DE BOMBEO PARA TRANSPORTE DE FLUIDOS EN EL PROCESO DE AZÚCAR DE CAÑA

Según Pump & Bombas (2021) para el transporte de fluidos en las diferentes operaciones de procesamiento de la caña de azúcar se utilizan bombas centrífugas y de tornillos. Conforme se avanza en las etapas de procesamiento el fluido aumenta el porcentaje de sacarosa y viscosidad, tiene una alta densidad y tiende a cristalizar cuando se enfría, lo que hace cada vez más difícil el transporte de fluido con equipos de bombeo centrífugos. En las etapas finales del proceso se utilizan bombas de tornillos para el transporte debido a la alta viscosidad y resistencia a fluir del producto.

a. BOMBAS CENTRIFUGAS

Las bombas centrífugas son máquinas roto dinámicas que convierten la energía mecánica en energía hidráulica. Se utilizan para transportar fluidos de un punto hacia otro, ya sea a puntos más elevados o a lugares distantes. Consta principalmente de dos partes (Cadena, 2011):

- Una parte rotatoria que incluye el impulsor, acople y el eje.
- Una parte estacionaria que incluye la carcasa o voluta, chumaceras y estoperos.

Existe una variedad de clasificaciones de tipos de bombas, pero principalmente hay dos grandes grupos (Chesterton Global Training, 2007a):

- Bombas cinéticas, que incluyen las bombas centrífugas, turbinas y de efectos.
- Bombas de desplazamiento positivo que pueden ser rotativas o reciprocantes.

Dentro de la industria azucarera se utilizan bombas centrífugas para el transporte de fluidos en la mayoría de procesos; las bombas de desplazamiento positivo se utilizan para el transporte de miel rica y fluidos con altos valores de °Brix (mayores a 70°Brix).

En la bomba centrífuga el fluido ingresa por la succión a una determinada presión llamada presión de succión y se dirige hacia el impulsor el cual al girar a determinadas revoluciones por minuto (rpm) arrastra al fluido por los alabes aumentando su velocidad. El impulsor está centrado de manera que la luz entre el impulsor y la voluta se incrementa en la zona de corte de agua y descarga. El fluido choca contra las paredes de la voluta y se dirige hacia la descarga. En este punto debido a la mayor luz entre voluta e impulsor decrece la velocidad

y aumenta la presión. El fluido a mayor presión es expulsado por la descarga de la bomba, a esta presión se le conoce como cabeza (Chesterton Global Training, 2007a).

Cada bomba proporciona una presión y un caudal a determinadas condiciones de instalación y operación. La curva de rendimiento u operación de una bomba grafica la relación entre la capacidad de caudal o flujo y la cabeza o presión que desarrolla la bomba. Esta curva grafica cuanta energía o cabeza está disponible a cierto caudal, diámetro de impulsor y velocidad de giro para cada tamaño de bomba (Chesterton Global Training, 2007a).

Cada curva se grafica a la máxima velocidad del impulsor, si la velocidad se reduce también lo hará la curva. Reducir la velocidad de una bomba es más eficiente que reducir el diámetro del impulsor ya que no se alteran los espacios entre el diámetro exterior del impulsor y la voluta en la bomba. Dos bombas trabajando a la mitad de su velocidad serán más eficientes que una bomba a plena carga (North Ridge Pumps, 2020).

Existen también otras curvas características de bombas que proporcionan información sobre el desempeño de estos equipos (North Ridge Pumps, 2020):

- La potencia requerida por la bomba para mover el fluido a las diferentes cabezas y caudales, medida en kilowatts. Con esta curva generalmente se determina la potencia mínima necesaria del motor de la bomba que asegure su trabajo en todo el rango de la curva de la bomba, es decir a las diferentes cabezas y caudales. A mayor caudal se requiere mayor potencia.
- La curva de presión neta de succión positiva requerida (NPSHR) medida en metros. Esta curva mide la presión mínima necesaria para mover el fluido a través del sistema, considera las pérdidas de todos los componentes en el sistema a diferentes caudales, así como la altura estática. A mayor caudal se requiere mayor NPSHR para evitar la cavitación en la bomba por bajas presiones.
- La curva de eficiencia de la bomba, medida en porcentajes. Relaciona la eficiencia de la bomba a los diferentes caudales y presiones. Se relaciona directamente con las pérdidas de presión que pueda haber en el sistema; mide la relación entre la energía de salida o energía mecánica y la energía de ingreso a la bomba o energía eléctrica.

En la Figura 3 se muestran las curvas de desempeño para bomba específica de diámetro de impulsor 290mm. Se puede observar como a mayores caudales la eficiencia de la bomba baja y se requiere de mayor NPSHR y energía para su funcionamiento.

En Chesterton Global Training (2007a) se indica que cada bomba tiene un punto donde la eficiencia es máxima, el cual se denomina Punto de máxima Eficiencia (BEP). Se recomienda operar la bomba en una zona lo más cercana al BEP para prolongar la vida útil de los componentes y minimizar el desgaste de sus partes.

En la Figura 4 se observa en la parte izquierda de la curva que la eficiencia aumenta hasta aproximadamente el 85% para luego reducirse nuevamente. Se recomienda trabajar una bomba dentro del rango de +/- 10 % del BEP para asegurar una operación confiable (Chesterton Global Training, 2007a).

Es importante mantener la estanqueidad y sellado de la bomba para evitar pérdida de presión durante su funcionamiento que puede perjudicar el desempeño y eficiencia de la bomba. Los sellos mecánicos y/o empaquetaduras son los encargados de mantener la estanqueidad en las partes húmedas de la bomba que conectan el motor con el eje de giro del impulsor. Existe un espacio cilíndrico por el cual pasa el eje conectado al impulsor el cual es llamado caja estopera o caja de sellado donde se instalan los dispositivos de sellado que deben controlar y/o eliminar las fugas de fluido hacia el exterior (Chesterton Global Training, 2007a).

a.1. SISTEMAS DE SELLADO EN BOMBAS CENTRÍFUGAS

Según Arias (2008), para el sellado de bombas se utilizan dispositivos de sellado cuya finalidad es evitar la fuga del fluido contenido en un recipiente a una determinada presión. Ya que las bombas centrífugas contienen un eje en movimiento, el sellado se clasifica como dinámico. Para el sellado de estas bombas generalmente se utilizan sellos inter faciales los cuales se clasifican en:

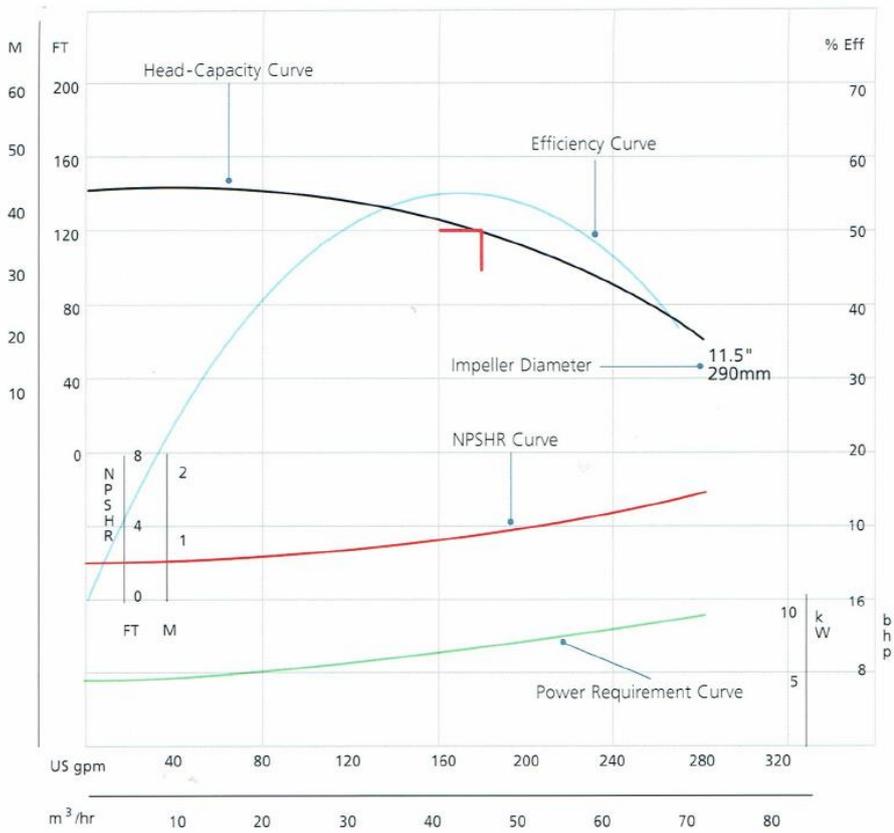


Figura 3: Curvas características de bombas

FUENTE: Chesterton Global Training (2007a)

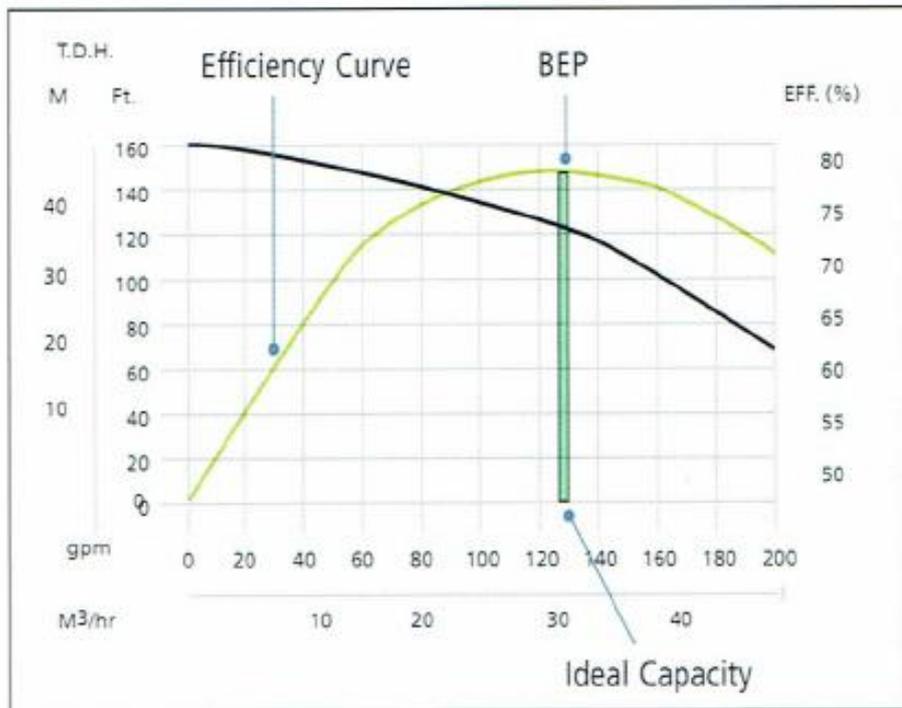


Figura 4: Punto de máxima eficiencia en una bomba

FUENTE: Chesterton Global Training (2007a)

- Empaquetaduras, sello de contacto radial. Consiste en instalar anillos de empaquetadura cuadrada en la caja estopera y presionadas con un estopero el cual deforma los empaques y crea una barrera que restringe el paso del fluido a través del estopero hacia el exterior. Los empaques ayudan a controlar la fuga, pero para su correcto funcionamiento es necesario un goteo permanente que ayude a lubricar y reducir la temperatura en la zona de sellado.

En la Figura 5 se puede apreciar el arreglo de empaquetaduras en una caja estopera en bombas. Se observa la distribución de los anillos de empaquetadura y la instalación de un anillo linterna posicionado en el punto de ingreso de agua. Este anillo ayuda a distribuir el ingreso de agua de refrigeración de una fuente externa que se aplica a los empaques para ayudar en la refrigeración y limpieza de contaminantes presentes en el fluido que pueden acelerar el desgaste de la bocina o eje de la bomba (Arias, 2008).

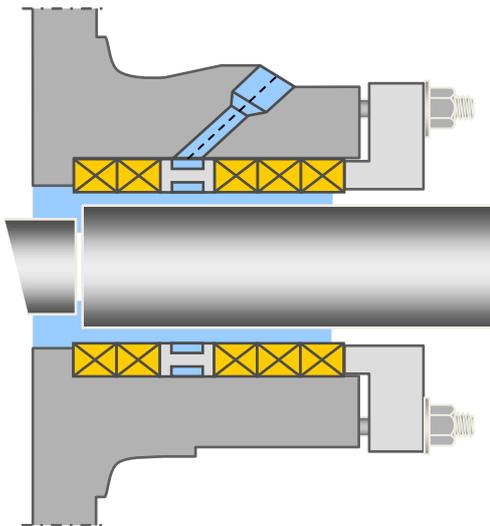


Figura 5: Empaquetadura en caja estopera

FUENTE: Chesterton Global Training(2007b)

Chesterton Global Training (2007b) indica que las empaquetaduras trenzadas también llamadas cuadradas o de compresión son utilizadas en los equipos rotatorios, aunque también se utilizan en válvulas, mezcladores y como juntas en compuertas. En el caso de válvulas y compuertas no debe existir fugas ni goteo al exterior por lo que no se utiliza agua de refrigeración.

Arias (2008) indica que la empaquetadura se entreteje con hilos en forma diagonal ya que ayuda a mantener la forma cuadrada, las tolerancias en las dimensiones además de poder absorber grandes cantidades del lubricante necesario para ayudar a reducir el calor producido por el roce del empaque y el eje durante el arranque y funcionamiento de la bomba.

Toda empaquetadura debería tener las siguientes características:

- Buena elasticidad, que permita una ligera deformación al momento de la instalación para adaptarse a la forma de la caja prensaestopas y también cuando haya flexiones en el eje durante el funcionamiento de la bomba.
- Buena resistencia física, ya que estará sometida a constante compresión y ajustes continuos; debe tener suficiente elasticidad para deformarse y rellenar los espacios libres de los prensaestopas, pero no deformarse rápidamente ni disminuir su volumen. Debe contener y restringir el paso del fluido hacia el exterior además de resistir la fricción y el desgaste.
- Buena resistencia química, para soportar el ataque de los diferentes fluidos a sellar en las bombas. En esta resistencia química debe incluirse también al lubricante ya que puede ser removido por los químicos presentes y dejar a la empaquetadura expuesta a la abrasión, fricción y rápido desgaste (Arias, 2008).

Los empaques deben contener suficiente lubricante de sacrificio que se utiliza durante el arranque del equipo y mantener su volumen además de continuar exudando lubricante durante los ajustes que se le realicen para deformar el empaque y controlar la fuga de fluido hacia el exterior (Chesterton Global training, 2009).

A medida que se realicen más ajustes el empaque se va deformando y pierde volumen, desgasta el eje o bocina de la bomba lo que origina un mayor paso del fluido hacia el exterior haciéndose incontrolable la fuga (Chesterton Global Training, 2007a) En ese momento es necesario realizar el cambio de empaques, culminando su tiempo de vida o duración del sistema de sellado.

Fluidos que contengan partículas abrasivas, contaminantes y/o altas temperaturas dañaran rápidamente los empaques por lo que el recambio de empaques será más frecuente reduciendo el tiempo de vida de estos.

Existen diversidad de fibras utilizadas para la fabricación de empaques: PTFE, grafito, aramida, carbón, kevlar, las cuales son elegidas de acuerdo a las características del fluido y las condiciones de operación de las bombas (Chesterton Global Training, 2009).

- Sello mecánico, este tipo de sellado de contacto axial previene la fuga de fluidos al exterior. Su principal función es controlar efectivamente la fuga que puede alcanzar y exceder los estándares medioambientales y son contabilizados como emisiones (ppm). Puede ser descrito como un dispositivo de fuga controlada representado por dos caras paralelas, planas y no porosas separadas por una distancia o separación entre caras (FSA, 2008). Una cara rotativa pulida va ajustada al eje de giro de la bomba y una cara estacionaria también pulida y ajustada mediante interferencia en el fondo de la tapa de la caja estopera de la bomba. La cara rotativa tiene uno o varios resortes que la presionan contra la cara estacionaria. Al trabajar la bomba una cara gira sobre la otra; la presión del fluido en la bomba y de los resortes mantiene las caras cerradas (Chesterton Global Training, 2007b).

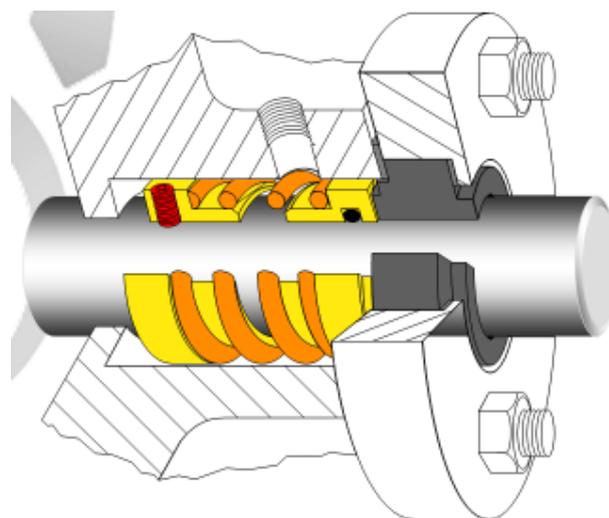


Figura 6: Sello mecánico instalado en bomba

FUENTE: Chesterton Global Training (2007b)

En la Figura 6 se observa el sello mecánico instalado en la caja de sellado de una bomba. El estopero que ajusta los empaques ha sido reemplazado por una brida que contiene la cara estática del sello mecánico. Esta brida tiene un empaque de junta que realiza el sellado secundario entre el frente de la caja de sellado y la brida (Chesterton Global Training, 2007b).

b. SELLOS MECÁNICOS

Los sellos mecánicos están sometidos constantemente a la fricción generada por el rozamiento entre sus caras cuando gira la bomba. Esta fricción genera una elevación de temperatura que puede ser muy perjudicial para el sello mecánico ya que lo deteriora rápidamente. Es por ello que ambas caras de sellado deben ser extremadamente planas y deben estar pulidas y lapeadas. Una película muy fina del fluido a presión entre las caras produce una fuerza hidrodinámica que mantiene una separación microscópica entre las caras reduciendo la fricción y calentamiento entre estas. La distribución de la presión entre las caras tiene forma de cuña y se reduce conforme se acerca al lado atmosférico. Debido a esa diferencia de presión, la película microscópica lubricante entre las caras se evapora al contacto con el medio ambiente por lo que no se aprecia fuga de fluido visible hacia el medio ambiente (Chesterton Global Training, 2007b). Generalmente estas fugas se miden en partes por millón.

Para garantizar un sello sin fuga la distancia entre las dos caras debe ser la menor posible por lo que debe asegurarse la planitud de las caras. A mayor rugosidad entre caras mayor será la fuga de fluido (Chen et Al, 2021).

Chesterton Global Training (2007b) indica que todos los sellos mecánicos constan de tres partes:

- Anillos o sellos primarios, conformados por la cara rotativa y la cara estacionaria y que se mantienen unidas por la presión del fluido y/o la presión de los resortes.
- Sellos secundarios, elementos que ayudan a eliminar fugas en otras áreas del sello mecánico diferentes a los anillos primarios. Los principales son utilizados entre eje

o bocina y el sello mecánico, y entre el sello y el frente de la caja prensaestopas. Generalmente se utilizan o’rings, juntas, V ring’s, anillos de PTFE, carbón, etc.

- Partes metálicas, son las demás partes que conforman el sello mecánico: bocinas, resortes, fuelles, pines, collarines, bridas, retenedores, soporte de anillos o caras, etc.

b.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SELLOS MECÁNICOS

Chesterton Global Training (2007b) realiza una clasificación de sellos mecánicos de acuerdo a su configuración:

- Sello mecánico Interno o Externo, es sello interno es aquel donde el sello mecánico está inmerso en el fluido y el sello externo aquel que está instalado fuera del fluido a sellar (en el exterior de la bomba).
- Sello mecánico Estacionario o Rotativo, el sello estacionario es aquel en el que el resorte se encuentra en la parte estacionaria del sello y no gira con el eje. El sello rotativo es aquel en el que el resorte se encuentra en la parte rotativa y gira junto con el eje de la bomba.
- Sello mecánico de Componentes o Encartuchado, en el sello de componentes la parte rotativa y estacionaria viene por separado y deben ser instaladas por separado en la bomba. Se requiere mucha precisión durante su instalación para evitar desalineamientos y producir una falla prematura del sello mecánico. Los sellos encartuchados vienen pre ensamblados sobre una bocina y contenido en una brida fácilmente montable en la bomba. En los sellos de componentes generalmente el sistema de ajuste de la parte rotativa al eje está dentro de la caja prensaestopas; en el sello encartuchado el anillo de ajuste al eje se encuentra al exterior de la bomba. La brida puede contener los puertos para planes adicionales necesarios en el sello mecánico lo que facilita la instalación.
- Sello mecánico Simple o Doble, el sello simple contiene solo una parte rotativa y una parte estacionaria. Los sellos dobles contienen dos juegos de sellos mecánicos. Generalmente se utilizan para fluidos agresivos. El sello interior (hacia el lado del fluido) cumple la función de sellar el fluido y el sello exterior (hacia el lado del medioambiente) cumple la función de sellar el fluido de respaldo y proteger de grandes fugas y contaminación hacia el exterior. Se utiliza generalmente en fluidos

agresivos con productos químicos y/o abrasivos que pueden dañar fácilmente los sellos mecánicos.

Sin embargo, se pueden también realizar diferentes clasificaciones si se tiene en cuenta otros criterios de clasificación como la clasificación en base a la norma AP 682 (Arias, 2008).

b.1.1. SELLOS MECÁNICOS BALANCEADOS Y NO BALANCEADOS

Un sello mecánico no balanceado es aquella configuración donde la presión hidráulica del fluido en la caja de sellado actúa en toda el área de las caras del sello sin ser reducida. Ya que las caras giran juntas, la cantidad de calor generado está determinado por la cantidad de presión aplicada, la cantidad de lubricante entre las caras, la velocidad y los materiales de las caras. En los sellos no balanceados la presión sobre las caras es alta, se dificulta la lubricación entre sus caras lo que aumenta la generación de calor; además la excesiva fuerza produce un desgaste más rápido entre las caras del sello. Estos sellos generalmente soportan bajas presiones de trabajo (Chesterton Global Training 2007b).

Chesterton Global Training (2007b) indica que un sello mecánico balanceado tiene una configuración que disminuye la acción de la fuerza hidráulica del fluido entre las caras del sello. Se reduce el área de las caras del sello en donde la presión actúa, esto permite una mejor lubricación, menor generación de calor menor desgaste de caras e incluso menor consumo de energía. Los sellos balanceados soportan mayores presiones de trabajo.

b.1.2. OPERACIÓN DE SELLOS MECÁNICOS

De la Rosa (2019), refiere que en un análisis internacional a equipos de bombeo se determinó que los sellos mecánicos fallan por tres razones: inadecuada instalación, problemas básicos de diseño del sello mecánico y por la contaminación del fluido en los prensaestopas. Fallas en los sellos mecánicos originan paradas de equipos, fuga de fluido y alto costo de mantenimiento.

Chesterton Global Training (2007b) refiere que existen una gran variedad de tipos y arreglos de sellos mecánicos que derivan de la cantidad de métodos y arreglos que se utilizan para darle la flexibilidad necesaria en el montaje y funcionamiento, así como también una

diversidad de materiales de fabricación para soportar las condiciones operativas y la naturaleza del fluido a sellar. Generalmente las partes metálicas de los sellos mecánicos son fabricados en acero inoxidable de distintas calidades, las caras de contacto pueden ser de diferentes materiales como carbón, acero, cerámica, carburos de silicio o tungsteno entre otros y los elastómeros o sellos secundarios en nitrilo, EPDM, FKM, etc.

Elegir el tipo de sello mecánico y los materiales de fabricación adecuados de acuerdo con el fluido a sellar y las condiciones de operación de la bomba son fundamentales para asegurar el éxito en su funcionamiento.

De la Rosa (2019) concluye ello se puede concluir que un sello mecánico puede fallar por tres razones:

- Mala instalación del sello mecánico, se deben considerar las tolerancias de las medidas, el máximo des alineamiento axial y radial, los sistemas auxiliares necesarios y la puesta en marcha del equipo.
- Mala selección de sello mecánico, para su selección se deben considerar las condiciones de operación, el tipo de fluido a sellar y su agresividad, las características del proceso y la presencia de contaminantes que puedan dañar las caras del sello mecánico.
- Mala operación del equipo, se refieren a fallas operacionales por contrapresión, trabajo en seco y otras situaciones que pueden darse durante la operación de los equipos.

Para asegurar una adecuada instalación y operación de los sellos mecánicos se deben considerar estos aspectos durante la instalación y operación de las bombas (Goulds Pumps, 2009):

- Verificar las dimensiones de la bomba, impulsor, carcasa y sus tolerancias referentes a perpendicularidad, paralelismo, juego axial y dimensiones de caja estopera.
- El peso de la cimentación debe ser 2 a 3 veces el peso de la bomba, base y motor. Se debe evitar distorsiones y/o deformación de los pernos al anclarse a la base.
- Se debe verificar el alineamiento de la bomba respecto al acople del motor y respecto a las tuberías para evitar cargas en las bridas de las bombas.
- Mantener las tuberías lo más cortas posibles para minimizar las perdidas por fricción.

- Colocar válvulas de aislamiento en tubería de aspiración a una distancia igual a 2 veces el diámetro de tubería.
- Distancia entre la brida de ingreso de la bomba y el primer cambio de dirección (codo, válvula, etc.) debe ser 5 veces el diámetro de la tubería para evitar riesgo de cavitación por turbulencia.

La segunda causa de falla es referida a la selección del tipo de sello mecánico respecto al tipo de sello mecánico, los materiales de fabricación y sus condiciones de operación. Se indicó que es necesaria una capa de fluido entre las caras del sello para su correcto funcionamiento, un sello que trabaje en “seco” fallara rápidamente (Cadena, 2011).

Chen et al (2021) refiere que la fricción entre las caras del sello mecánico y la cantidad de fuga de material son dos indicadores relacionados entre sí del deterioro del sello mecánico. En su investigación tomaron en cuenta estos factores y la temperatura de la interface como indicadores del desempeño de los sellos mecánicos. El espesor de la capa lubricante puede verse afectado por distorsiones elásticas de la carga de presión y distorsiones térmicas por el calor generado por la fricción en el área de contacto afectando la confiabilidad del sello mecánico.

FSA (2008) refiere que, si en las bombas se asumen propiedades físicas constantes y un flujo laminar no compresible, la ratio de fuga es proporcional a la presión y al cubo de la separación entre caras. Los sellos mecánicos de mayor tamaño tienden a fugar más que los pequeños. En teoría la fuga en sellos mecánicos con caras angostas debería ser mayor que aquellos que tienen caras anchas, pero en la práctica las caras angostas suelen fugar menos porque el área de sellado o de contacto entre caras usualmente es menor que para los sellos mecánicos de caras anchas.

Un sello mecánico recién instalado tiene ambas caras muy pulidas y en contacto entre sí, las distorsiones por presión y temperatura de la cara rotativa resultan en desgastes de las caras que aumentan su rugosidad y que por los ciclos de repeticiones durante el funcionamiento aceleran su desgaste y generan fugas en el sello mecánico (FSA, 2008)

Según FSA (2008) en su grafico de la Figura 7, en el punto A se muestran las dos caras de un sello mecánico en su posición inicial antes de iniciar el trabajo. Ambas caras están muy pulidas y perfectamente paralelas. Durante el trabajo la cara rotativa sufre distorsiones por efecto de la presión del fluido de la bomba sobre el diámetro exterior de la cara, graficado en el punto B, lo que provoca el des alineamiento de la cara rotativa respecto a la cara estacionaria. Puede observarse en el punto C que el efecto de elevadas temperaturas de trabajo también sufre distorsiones, pero en el diámetro interno de la cara rotativa por efecto de la dilatación térmica que provoca su des alineamiento respecto a la cara estacionaria.

Ambas distorsiones son absorbidas por el desgaste de las caras durante el funcionamiento de la bomba conocido como el asentamiento de las caras. Quedan entonces ambas caras paralelas en las posiciones de trabajo, punto D. Cuando la bomba por mantenimiento o como parte del proceso detiene su funcionamiento la presión y temperatura disminuyen lo que elimina las distorsiones y la cara rotativa retorna a su posición inicial creando una mayor luz entre las caras del sello, punto E. Conforme se repitan los ciclos de arranque y parada en las bombas esta luz entre caras será mayor hasta el momento que las fugas sean perceptibles y no controlables lo que determina el fin de la vida útil del sello mecánico.

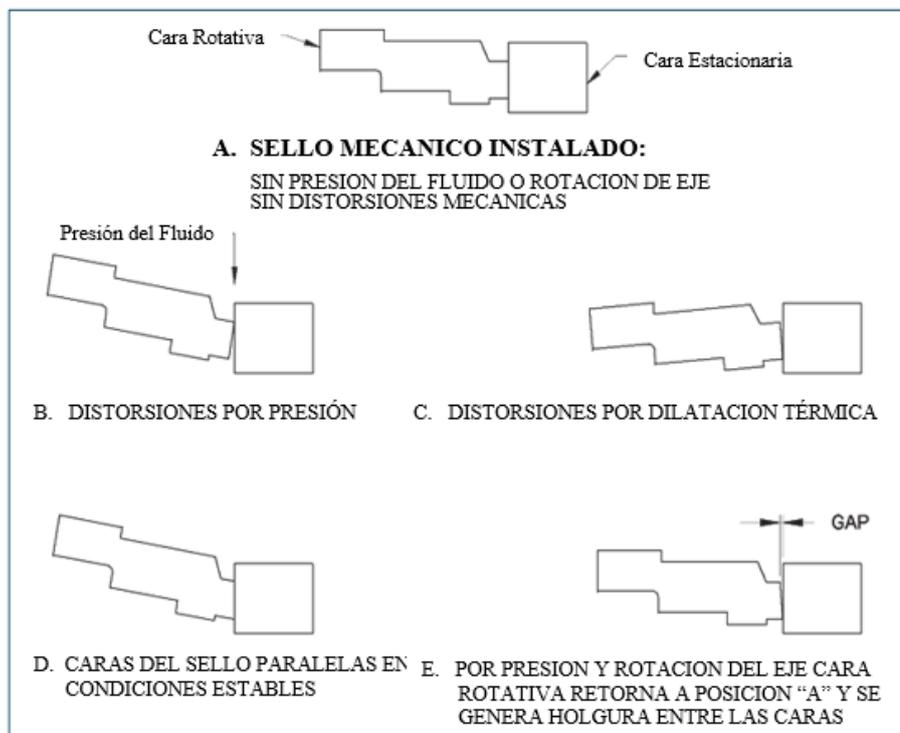


Figura 7: Distorsiones en las caras de sello mecánico por acción de la temperatura y la presión

FUENTE: Fluid Sealing Association (2008a)

Existen otros factores que tienden a incrementar la fuga en sellos mecánicos tales como: fluidos de alta viscosidad, sellos con bajo balance de presiones, baja presión de cierre estático entre caras, caras de sellado muy angostas donde un daño o desgaste en las caras produce una mayor fuga. Se deben considerar pues las características del fluido y condiciones de operación al momento de seleccionar el sello mecánico adecuado para cada aplicación (FSA, 2008).

Chesterton Global Training (2007b) indica que cuando las características del fluido como la viscosidad, cantidad de contaminantes o temperatura entre otros generan dificultades en la lubricación, es necesario utilizar planes auxiliares de lubricación los cuales son denominados Planes API de control ambiental para sellos mecánicos y están diseñados en base a la norma ASME API 682. Estos sistemas auxiliares utilizan un fluido de barrera que debe ser compatible con el fluido a sellar y debe permitir la lubricación y el enfriamiento de las caras de los sellos mecánicos para evitar un rápido deterioro de éste por la agresividad del fluido. Es importante seleccionar el adecuado plan API a utilizar con los sellos mecánicos para asegurar el correcto sellado sin contaminación ni dilución del fluido a sellar.

b.1.3. PLANES DE CONTROL AMBIENTAL API PARA SELLOS MECÁNICOS

Ya que el principio de funcionamiento de un sello mecánico se basa en la formación de una película lubricante entre las caras del sello es importante especificar como se realizará dicha lubricación según el fluido a sellar (Acosta, 2011).

Generalmente el fluido a sellar trabaja como fluido lubricante entre las caras del sello mecánico, pero si este fluido tiene alto contenido de contaminantes, pobres propiedades lubricantes, se cristalizan o tienen baja presión de vapor será necesario recurrir a fuentes de lubricación externas (Acosta, 2011).

El sistema de sellado de una bomba es el conjunto del método de sellado del eje, los materiales de dicho sello y el equipo auxiliar o sistema de soporte requerido para extender el ciclo de vida del de sello utilizado (FSA, 2008b).

Existen una diversidad de planes de lubricación a usar en diferentes aplicaciones. Estos planes incluyen sistemas de refrigeración de fluido bombeado, eliminación de partículas abrasivas o incluso el uso de fuentes externas para el suministro de lubricación de los sellos mecánicos. Para un buen desempeño del sello mecánico es necesario seleccionar el plan de lubricación de las caras del sello más adecuado y que tenga una buena relación costo – beneficio. (Acosta, 2011).

Los planes de lubricación son llamados también planes de control ambiental ya que en muchos casos evitan que el fluido bombeado salga hacia el exterior en caso de fuga y contamine el medio ambiente.

Cada plan ha sido diseñado para trabajar con un sello mecánico en específico bajo ciertas condiciones de proceso. Estos planes ambientales suministran un líquido o gas al sello mecánico para regular el ambiente en el cual opera y extender su tiempo de vida especialmente en aplicaciones con condiciones muy difíciles de funcionamiento. Cumplen las siguientes funciones:

- Lubricar y enfriar las caras del sello mecánico.
- Controlar la presión y temperatura en la cámara de sellado.
- Lavar y drenar la acumulación de residuos entre las caras del sello mecánico.
- Evitar las fugas del fluido de proceso hacia la atmósfera.

El arranque y puesta en marcha de los equipos rotativos son críticos para la operación de los sistemas de sellado. Aire atrapado en el sistema durante el arranque puede traer graves problemas como interrumpir el caudal y/o impedir generar el enfriamiento adecuado en la cámara de sellado (Swagelok, 2020).

Swagelok (2020) clasifica a los planes de sellado API en tres grupos:

- Planes del lado de proceso, que regulan las condiciones de presión y temperatura en la cámara de sellado ingresando fluido al proceso. Incluye los siguientes planes ambientales:

Plan 2: Bomba enchaquetada.

Plan 11: Recirculación desde la descarga.

Plan 12: Recirculación desde la descarga con filtro.

Plan 13: Recirculación hacia la succión.

Plan 14: Recirculación desde la descarga y hacia la succión.

Plan 21: Recirculación y enfriamiento desde la descarga.

Plan 23: Recirculación y enfriamiento en el sello mecánico.

Plan 31: Recirculación desde la descarga con ciclón separador.

Plan 32: *Flushing* de limpieza.

Plan 41: Recirculación desde la descarga con enfriamiento y ciclón separador.

- Planes entre sellos mecánicos, se utilizan con sellos mecánicos dobles y controlan las fugas para evitar la contaminación al medio ambiente. Incluye los siguientes planes ambientales:

Plan 52: Circulación de fluido externo con tanque auxiliar.

Plan 53A: Circulación de fluido externo presurizado con tanque auxiliar.

Plan 53B: Circulación de fluido externo presurizado con acumulador e intercambiador de calor.

Plan 53C: Circulación de fluido externo presurizado con intercambiador de calor y pistón acumulador.

Plan 54: Circulación de fluido presurizado con unidad de bombeo externa.

Plan 74: Alimentación externa de gas como fluido de barrera.

- Planes del lado atmosférico, planes que permiten fugas de fluido de proceso hacia el medio ambiente.

Plan 62: *Quench*.

En el presente trabajo se utilizaron los siguientes planes ambientales:

- **Plan 32: Flushing de limpieza**

Este plan utiliza un líquido externo limpio como *flushing* que es inyectado a la caja de sellado con o sin un buje restrictivo colocado en el fondo de la caja de sellado. Este plan es generalmente utilizado para minimizar el ataque de los sólidos del fluido al sello mecánico. El fluido de *flushing* es aplicado a mayor presión y desplaza los sólidos lejos de las caras y

partes del sello mecánico. Este fluido debe ser compatible con el fluido del proceso, generalmente se utiliza agua limpia y debe estar a una presión como mínimo 15 psi por encima de la presión de la caja de sellado para generar el flujo positivo (Chesterton Global Training, 2007b).

- **Plan 53A: Circulación de fluido externo presurizado con tanque auxiliar**

Consiste en un sello mecánico doble con un fluido de barrera a alta presión entre ambos sellos. El fluido de barrera es contenido en un tanque auxiliar presurizado usualmente a unos 20 a 25 psi por encima de la presión en la caja de sellado. Fugas en el sello mecánico interno provocara el ingreso de fluido de barrera al fluido de proceso. La cantidad de ingreso de fluido de barrera al proceso dependerá de la diferencia de presión entre el fluido en la caja de sellado y la presión del fluido de barrera en el tanque (Chesterton global Training, 2007b). Según Chesterton (2011b) la presión en la caja de sellado se debe conocer siempre antes de proponer el sello más adecuado y el plan ambiental más recomendado en cada aplicación. La presión en la caja de sellado puede variar dependiendo del diseño de la bomba, las características del fluido y las presiones a las que trabaja. Para el caso de bombas de una etapa con la caja de sellado cerrada y ubicada detrás del impulsor el cálculo se realiza con la siguiente formula:

$$P_{sc} = P_s + 0,25 (P_d - P_s) \quad (09)$$

Donde:

P_{sc} : Presión de la caja de sellado

P_s : Presión de succión

P_d : Presión de descarga

Para todos los planes ambientales de ingreso de agua presurizada a través del sello mecánico se requiere como mínimo una presión de 1 a 2 bar mayor que la presión en la caja de sellado, ello asegura el ingreso del agua, la limpieza y refrigeración adecuada del sello mecánico (Chesterton, 2011b).

III. METODOLOGÍA

3.1. LUGAR DE EJECUCIÓN

El proyecto se realizó en un ingenio azucarero ubicado al norte de Perú en la región de La Libertad, Trujillo zona privilegiada para el cultivo de la caña de azúcar.

El trabajo se desarrolló durante tres años (2014 – 2016), periodo en el que se implementó la propuesta y se monitoreó su desempeño.

3.2. MATERIA PRIMA E INSUMOS

Se utilizaron los siguientes insumos para la instalación de los sistemas de sellado:

3.2.1. BOMBA DE JUGO CRUDO DIFUSOR

- Juego de empaquetaduras de fibra PTFE Pilotpack 5025.
- 01 Sello Mecánico Chesterton 150 2,375” SC/SC/FKM.
- 01 Buje de restricción Chesterton 14K RB 2,375”x3,346”x0,610” AWC 800.
- Manguera flexible de 1/4”.
- Adaptador en acero inoxidable de 3/8” a 1/4”.
- Conector rápido en acero inoxidable de 1/4”.
- Conector Tee de 1/2”.
- Adaptador de 1/2” a 1/4”.

3.2.2. BOMBA DE JUGO CLARIFICADO

- 01 Sello Mecánico Chesterton 250 60 SC/SC/SC/CB/FKM.
- 01 Sello Mecánico AS Seal Converter.
- 01 Tanque auxiliar de fluido de barrera Chesterton *Reorder* 107126.

- 03 metros Tubería de bronce de 1/2".
- 01 Base para instalación de tanque.
- 01 Regulador de presión marca Festo.
- 02 válvula *check*.
- 01 Válvula de alivio.
- 01 barómetro.
- 02 codos de 1/2".
- 02 Tees de 1/2".
- 04 niples de 3" x 1/2".
- 04 niples de 1 1/2" x 1/2".
- 01 niple de 1 1/2" x 3/4".
- 02 llaves de paso de 1/2".
- 04 Acoples Reductores 3/8" a 1/2".
- 08 Acople rápido 1/2".
- 01 termómetro.
- Línea de aire habilitada a 70 – 80 psi de presión.

3.3. MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS

3.3.1. MATERIALES

- Hoja técnica de sello mecánico Chesterton 150.
- Hoja técnica de sello mecánico Chesterton 250.
- Hoja técnica de buje restrictivo 14K.
- Formato de Seguimiento de sello mecánico.
- Hoja de instalación de sello mecánico Chesterton 150.
- Hoja de instalación de sello mecánico Chesterton 250.
- Hoja de instalación de tanque auxiliar de fluido de barrera Chesterton 107126.
- Indicaciones instalación plan API 32.
- Indicaciones instalación plan API 53 A.
- Installation, Operation and Maintenance Manual Goulds Pump Model 3180, 3181, 3185 and 3186.

- Tabla de densidades en soluciones azucaradas en función del °Brix y la temperatura. Zavaleta, R.

3.3.2. EQUIPOS

- Laptop Toshiba Modelo Satélite.
- 01 calibrador marca Mitutoyo.
- 01 pinza de interiores.
- 01 pinza de exteriores.
- Medidor de profundidades Chesterton.
- 01 juego de llaves Allen.
- 01 juego desarmadores.
- 01 llave francesa.
- Grasa teflonada.
- Cinta de PTFE.
- Celular con cámara.
- Recipiente recolector.

3.4. MÉTODOLÓGIA DE INVESTIGACIÓN

La metodología de investigación se desarrolló según la secuencia de actividades indicadas en la Figura 8.

3.4.1. ENTREVISTAS CON JEFES, SUPERVISORES Y OPERARIOS

Se realizaron visitas técnicas al ingenio azucarero como parte de la asesoría técnica ofrecida a la empresa. Estas visitas eran coordinadas con los jefes de cada área de producción y programadas de manera mensual con la finalidad de presentar mejoras en el control del transporte de fluidos en toda la planta.

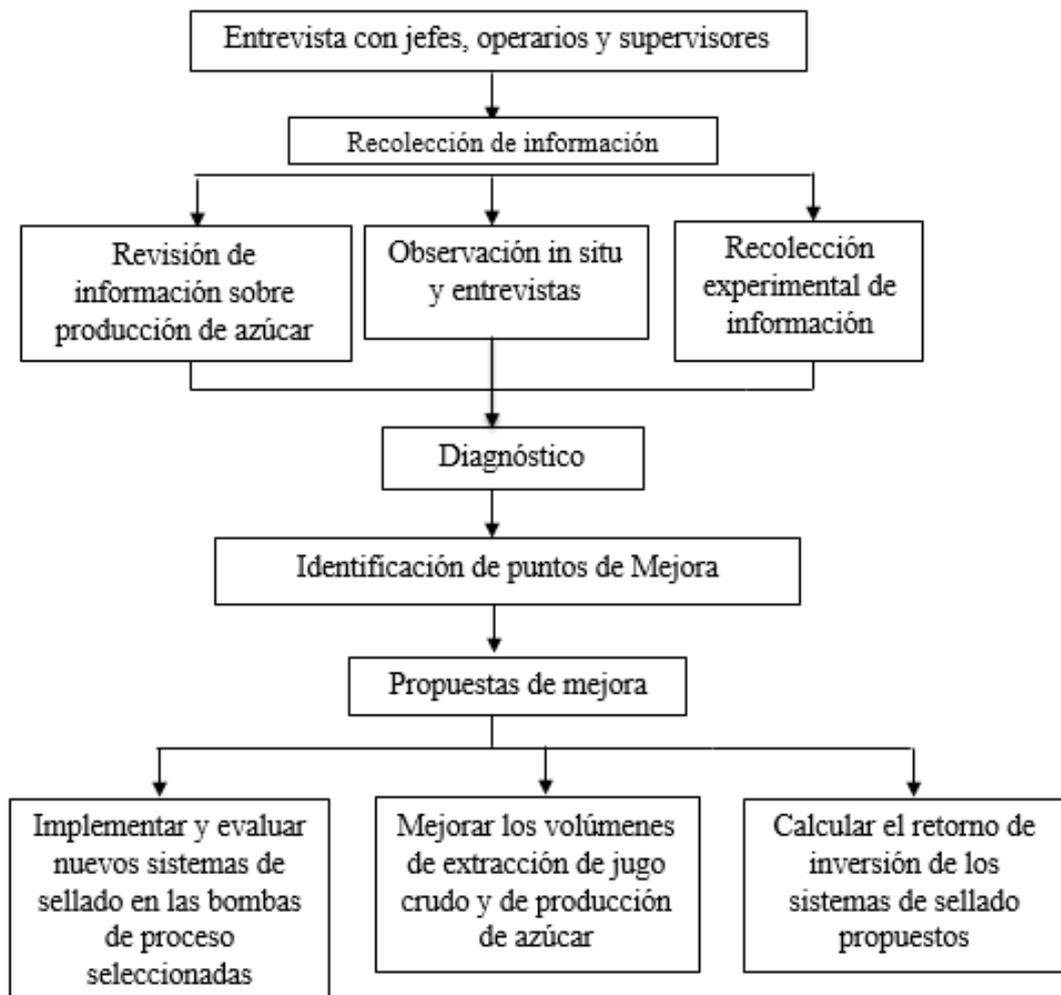


Figura 8: Diagrama de la secuencia metodológica seguida en la presente investigación

Se coordinaron reuniones con el jefe del área de extracción donde se explicaron los objetivos del proyecto de mejora en el control de pérdidas de jugo crudo en el área del difusor de la zona de extracción, la metodología a seguir para su implementación y los beneficios del proyecto.

De igual forma en reunión con el jefe del área de elaboración se presentó el proyecto de mejora en los sistemas de sellado de las bombas de proceso de jugo clarificado y se explicaron los objetivos, la metodología para su implementación y sus beneficios.

En ambos casos se solicitó el apoyo para la recolección de la información necesaria y el desarrollo de las actividades necesarias para la ejecución de los proyectos. Con el compromiso de las jefaturas se continuó con los proyectos.

Se realizaron reuniones de coordinación con los supervisores y operarios de los equipos, se solicitó el compromiso y apoyo para la implementación del proyecto en cada aplicación seleccionada.

3.4.2. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Se recopiló la información necesaria para el desarrollo de los proyectos. Se recopilaron algunos datos de la producción anual de azúcar publicada por el ingenio azucarero en estudio, se obtuvieron datos de la revisión de información interna archivada en la empresa, de inspecciones in situ, conversaciones con los operarios y supervisores de los equipos y de la toma de información de manera experimental en campo.

a. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LA PRODUCCIÓN ANUAL DE AZÚCAR

Se revisó la información oficial publicada por el ingenio azucarero en estudio sobre la producción anual de azúcar, los porcentajes de eficiencia del proceso productivo durante el periodo de ejecución del trabajo, la cantidad de caña procesada, los porcentajes de azúcar en caña y se seleccionaron los siguientes datos:

- Caña Total: Cantidad de caña ingresada anualmente a fabrica para su procesamiento.
- Azúcar rubia: Cantidad de azúcar rubia producida anualmente en el ingenio azucarero.
- Azúcar refinada: Cantidad de azúcar refinada producida anualmente en el ingenio azucarero. La azúcar refinada se obtiene a partir del azúcar crudo producido en fabrica.
- Total Azúcar: Cantidad total de azúcar rubia y refinada producida anualmente en el ingenio azucarero. de azúcar. La producción de azúcar refinada se inició a partir del año 2015.

- Rendimiento Comercial: cantidad de azúcar producida por cada tonelada de caña de azúcar ingresada a fabrica, expresada en porcentaje.

$$\text{Rendimiento Comercial} = \frac{Tn \text{ azúcar rubia}}{Tn \text{ caña}} \times 100 \quad (10)$$

- Melaza % caña: cantidad de melaza producida expresada en porcentaje del total de caña de azúcar ingresada a fabrica. La melaza contiene rastros de sacarosa y sacarosa invertida y es utilizada para la producción de alcohol.
- Recobrado crudo fabrica: Llamado también Eficiencia o Recuperabilidad es la cantidad de azúcar recuperado respecto a la cantidad sacarosa en caña, expresada en porcentaje. Está representada en la Ecuación 8.
- Extracción Total: llamada también Extracción de jugo crudo es la cantidad de jugo crudo obtenido a partir de una cantidad de caña de azúcar, expresado en porcentaje. Es un indicador de la eficiencia del área de extracción. Está representada en la Ecuación 2.

Con esta información se establecieron los parámetros iniciales de eficiencia en el proceso productivo.

b. OBSERVACIÓN IN SITU Y ENTREVISTAS

Se realizaron recorridos por el área de extracción en la zona del difusor y en el área de clarificación de la planta de procesamiento para observar in situ las condiciones de los sistemas de sellado, las fugas y los trabajos de reparación e intervención de los equipos seleccionados para el proyecto.

En entrevistas con los operarios a cargo se obtuvo información sobre el balance de masa en el difusor del área de extracción, la contabilización de las pérdidas físicas de jugo, la duración y frecuencia de cambio de los sistemas de sellado utilizados y de los controles de las pérdidas de jugo crudo y jugo clarificado en las áreas de estudio.

c. RECOLECCIÓN EXPERIMENTAL DE INFORMACIÓN

Debido a que no se llevaba un control de las pérdidas de jugo crudo en las bombas de recirculación del difusor se realizó la medición experimental de pérdidas de jugo crudo en las 17 bombas de recirculación instaladas alrededor del difusor en el área de extracción.

Las 17 bombas del difusor no se encontraban en igual condición, algunas presentaban mayor fuga que otras, lo cual estaba en relación directa con el estado de los sistemas de sellado instalados.

Se establecieron cinco niveles de eficiencia de los sistemas de sellado y para cada nivel de eficiencia de sellado se consideraron como variables que afectaban directamente el nivel de pérdidas el estado del empaque y el estado de la bocina las cuales tenían tres condiciones: Nuevo, Ligero desgaste, Desgastado.

Debido a que los niveles de fuga aumentaban con una condición más deficiente de los sistemas de sellado se establecieron niveles de condición para las bombas de acuerdo al desgaste que presentaban los elementos de sellado y que se indican en la Tabla 1:

Tabla 1: Condición de Bomba según desgaste del sistema de sellado

NIVEL	CONDICIÓN		CONDICIÓN
EFICIENCIA	BOCINA	EMPAQUE	BOMBA
1	Nueva	Nuevo	Óptimo
2	Buen estado	Ligero desgaste	Controlable
3	Ligero Desgaste	Nuevo	Controlable
4	Ligero Desgaste	Desgastado	Crítico
5	Desgastada	Desgastado	Crítico

Una vez identificadas el nivel que en que se encontraba cada bomba se realizó la medición de la cantidad de fuga de fluido en cada una de las bombas.

La medición de caudal de las pérdidas de jugo crudo se realizó mediante recolección del jugo que fugaba en cada bomba en un depósito plástico y se contabilizó en mililitros por minuto (mL/min).

3.4.3. DIAGNÓSTICO

a. ESTIMACIÓN DEL BALANCE DE MASA E IDENTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS DURANTE LA ETAPA DE EXTRACCIÓN

Con la información recopilada se realizó el análisis del balance de masa en la zona del difusor del área de extracción.

Para este análisis del balance de masa se utilizó la Ecuación (01) de balance de masa. Se consideró como agua de imbibición al total de ingresos en el difusor que incluían también el agua de prensa y el vapor ingresado para calentamiento.

Para complementar la información del balance de masa se utilizó la Ecuación (02) del porcentaje de extracción de jugo que permitió calcular la cantidad de caña que ingresaba al difusor y la cantidad de bagazo que salía del difusor al aplicar la siguiente ecuación de extracción total (Sandoval, 2002):

$$\% \text{ Extracción total} = 100 + \frac{Tn \text{ agua}}{Tn \text{ caña}} \times 100 - \frac{Tn \text{ bagazo}}{Tn \text{ caña}} \times 100 \quad (11)$$

Con la recopilación experimental de información sobre los volúmenes de pérdidas de jugo crudo en el difusor del área de extracción se realizó la estimación del total de pérdidas indeterminadas durante la etapa de extracción de jugo.

Debido a que toda la información acerca de la producción de azúcar y rendimientos se encontraba en unidades de peso y la información recopilada de manera experimental sobre las pérdidas de jugo se encontraba en unidades de volumen fue necesario realizar la conversión utilizando:

$$\text{Masa} = \text{densidad} \times \text{volumen} \quad (12)$$

Zavaleta (2011) estudió la relación másica y volumétrica de soluciones de sacarosa a diferentes concentraciones y temperaturas. Estableció valores de densidad para diferentes concentraciones de °Brix a diversas temperaturas y elaboró tablas de densidades para soluciones de sacarosa a diferentes concentraciones.

Se recurrió a dicha tabla experimental para calcular las pérdidas de jugo crudo en las bombas de recirculación del difusor en toneladas.

Los diagnósticos de pérdidas de jugo crudo y de duración de los sistemas de sellado se presentaron a los jefes de las áreas de extracción y elaboración.

b. ESTIMACIÓN DE LA DURACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SELLADO EN BOMBAS DE PROCESO

Para una mejor identificación de los sistemas de sellado estudiados se nombraron de la siguiente manera:

- Sistema de sellado 1: instalado en bombas de recirculación del difusor área de extracción
- Sistema de sellado 2: instalado en bombas de jugo clarificado del área de elaboración

Con la información obtenida de las entrevistas con los supervisores y mecánicos además de la inspección in situ de los sistemas de sellado instalados se elaboraron tablas con la duración promedio de los sistemas de sellado actuales.

Para el sistema de sellado 1 se elaboró una tabla en función a la condición de la bomba indicada en la Tabla 1 y al tipo de intervención realizado para poner nuevamente operativo este sistema de sellado.

Para el sistema de sellado 2 se elaboró una tabla en función al termino de vida útil y al tipo de intervención realizado para poner nuevamente operativo este sistema de sellado.

3.4.4. IDENTIFICACIÓN DE PUNTOS DE MEJORA

En reunión con los jefes de área se mostraron los resultados del diagnóstico de las pérdidas de jugo y duración de los sistemas de sellado.

En base al diagnóstico realizado se identificaron puntos de mejora en los sistemas de sellado de las bombas de jugo crudo y jugo clarificado que significaban un aumento en la producción de azúcar y la reducción de costos de mantenimiento.

3.4.5. PROPUESTAS DE MEJORA

En reunión con los jefes de área se acordó:

- Implementar y evaluar nuevos sistemas de sellado propuestos para las bombas de proceso seleccionadas.
- Mejorar los volúmenes de extracción de jugo crudo en el difusor y de azúcar crudo producido.
- Calcular el retorno de inversión de los sistemas de sellado propuestos

Se acordó además implementar las mejoras en una bomba de cada aplicación para establecer la efectividad de las propuestas planteadas.

3.4.6. IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE NUEVOS SISTEMAS DE SELLADO EN BOMBAS DE PROCESO

Se propuso mejorar los sistemas de sellado de las bombas de recirculación del difusor y de las bombas de jugo clarificado que enviaba el jugo a los evaporadores para reducir los volúmenes de fuga de jugos.

La propuesta de mejora incluía la implementación y evaluación de las nuevas propuestas de sistemas de sellado, el seguimiento del tiempo de duración, del desempeño de las bombas, la cuantificación de las nuevas pérdidas y el cálculo del retorno de la inversión.

a. PROPUESTA DE SISTEMA DE SELLADO PARA CADA APLICACIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES MÍNIMAS NECESARIAS PARA SU INSTALACIÓN

Para el análisis de las propuestas de los sistemas de sellado para cada aplicación en estudio se realizó una investigación de la información sobre los sistemas de sellado actuales y conocimiento sobre nuevas tecnologías de sellado más eficientes. Se recurrió a información publicada en la intranet de la empresa fabricante de dispositivos de sellado, a la información obtenida en capacitaciones internas e internacionales y a las experiencias de éxito documentadas por colegas en el extranjero.

a. EVALUACIÓN DE LA DURACIÓN Y EFECTIVIDAD DE LOS SISTEMAS DE SELLADO PROPUESTOS DURANTE EL FUNCIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO

La estimación de la duración de los sistemas de sellado utilizados se realizó en base a la recolección de información registrada en los reportes de mantenimiento de los equipos de bombeo y materiales utilizados para su reparación además de la información proporcionada por los mecánicos a cargo de los trabajos y del monitoreo mensual de los equipos

Inicialmente se estableció como período de evaluación un (01) año de monitoreo y seguimiento de los sistemas de sellado instalados.

En el formato de seguimiento se registraron las características del sistema de sellado anterior y del sistema de sellado propuesto, las inspecciones y la evolución en el tiempo del desempeño de los sistemas de sellado propuestos. Se llevaron registros fotográficos del monitoreo de los sistemas de sellado instalados.

Se llevó registro fotográfico de las condiciones de sellado en las bombas antes de la intervención para realizar el análisis comparativo al término del periodo de evaluación respecto a los sistemas de sellado propuestos.

Se estableció además que el término del ciclo de vida útil de los sistemas de sellado se daría al inicio del primer indicio de falla de los sellos mecánicos por goteo de fluido hacia el exterior.

Se realizó el análisis comparativo de las condiciones de sellado en las bombas antes de la intervención y luego de las mejoras instaladas.

3.4.7. AUMENTO DE LOS VOLÚMENES DE EXTRACCIÓN DE JUGO CRUDO EN EL DIFUSOR Y DE AZÚCAR CRUDO PRODUCIDO

Dado que se estableció que el ciclo de vida útil del sistema de sellado en las bombas de recirculación del difusor terminaba con el inicio de fuga a través de los sellos mecánicos no existieron fugas de jugo crudo desde la instalación de la nueva propuesta hasta el término de su monitoreo experimental.

Con el sistema de sellado propuesto las pérdidas de jugo crudo se convirtieron en jugo crudo adicional ingresado a fábrica.

Con la Ecuación (14) Rendimiento de jugo crudo:

$$\text{Rendimiento de jugo crudo} = \frac{T_n \text{ azúcar rubia}}{T_n \text{ jugo crudo}} \times 100 \quad (13)$$

obtenida a partir de los valores de rendimiento comercial y extracción total en la información recolectada se calculó la cantidad de azúcar producido por cada tonelada de jugo crudo adicional ingresado a fábrica y con la información del valor de venta por kg de azúcar publicada por el ingenio azucarero en estudio se calculó el valor económico de la producción adicional de azúcar en el área del difusor.

3.4.8. ESTIMACIÓN DEL RETORNO DE INVERSIÓN PARA CADA APLICACIÓN

Con la información recopilada se elaboraron cuadros comparativos de los costos de instalación y mantenimiento acumulado del sistema de sellado anterior respecto al nuevo sistema de sellado propuesto en el periodo de vida útil.

Con la información de los cuadros comparativos se realizó el cálculo del retorno de inversión (ROI) para cada aplicación evaluada.

Para el cálculo del ROI se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% ROI = \frac{\text{Beneficio} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} \times 100 \quad (14)$$

El porcentaje resultante es el nivel de rentabilidad obtenido con la inversión realizada. Los porcentajes bajos indican que los resultados obtenidos no logran recuperar la inversión realizada. Valores mayores a 100% indican inversiones rentables.

Se realizó además un gráfico comparativo de los costos acumulados por el uso y reparación de los sistemas de sellado anteriores respecto a los mismos costos con los sistemas de sellados propuestos y se compararon con las curvas de beneficio total acumulado.

La curva de beneficio total acumulado se calculó por diferencia entre los costos de mantenimiento acumulados en el tiempo por el sistema de sellado actual menos los costos de mantenimiento acumulados por los sistemas de sellado propuestos.

Para el caso de las bombas de recirculación del difusor en el beneficio de la inversión se aumentó además el aumento en la producción de azúcar.

Con esta curva se determinó el tiempo de recuperación de las inversiones realizadas con el cambio de sistemas de sellado.

3.5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.5.1. ENTREVISTAS CON JEFES, SUPERVISORES Y OPERARIOS

En reuniones con los jefes de área de extracción y elaboración expresaron su disposición para el desarrollo del proyecto de mejora. Se coordinaron las entrevistas con los supervisores de las áreas y los mecánicos a cargo de los equipos de bombeo para la recolección de información necesaria.

Se establecieron fechas y frecuencias de visita y los procedimientos para la obtención de la información necesaria.

Se establecieron las frecuencias de visita para el seguimiento del desarrollo de los proyectos y se designó un mecánico a cargo de cada bomba en evaluación para que brinde la información sobre el desempeño y/o intervenciones que pudieran ocurrir en las bombas con la finalidad de obtener información confiable sobre cualquier incidente durante todo el desarrollo de la parte experimental.

3.5.2. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

a. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE LA PRODUCCIÓN ANUAL DE AZÚCAR

Se tomaron los datos publicados por el ingenio azucarero en los resúmenes anuales de molienda y producción de azúcar y alcohol en fábrica. Se tomaron los valores de caña total, total azúcar, rendimiento comercial, recobrado crudo fabrica y extracción total.

También se tomaron datos de los rendimientos en la producción de caña por hectárea y el porcentaje de sacarosa promedio anual de la caña de azúcar cosechada y procesada.

Se trabajó con los valores promedio anuales de producción ya que de acuerdo con lo señalado por Rein (2007) para tener valores confiables de los datos de producción es necesario tomar valores de producción y balance de masa obtenidos entre paradas programadas de mantenimiento para no caer en error al no considerar el stock de azúcar en procesamiento.

El ingenio realizaba una parada a fin de año con una duración de 20 a 30 días, como cierre de actividades y en la que liquidaban todos los tanques de proceso.

Se registraron también los ingresos anuales por venta de azúcar.

b. OBSERVACIÓN IN SITU Y ENTREVISTAS

La información adicional necesaria se obtuvo de la observación e información recopilada de los mecánicos y personal a cargo de las áreas definidas para este trabajo.

Se registraron los datos obtenidos de ingresos de agua y vapor, los datos de la cantidad de jugo crudo de salida del difusor. No se contaba con el dato promedio de ingreso de caña al difusor ni el de salida de bagazo. Además, se refirieron los valores promedio de ° Brix y POL del jugo crudo.

De las entrevistas con los mecánicos a cargo de los equipos de bombeo se recopiló información sobre la duración de los sistemas de sellado utilizados, la frecuencia de cambio, repuestos utilizados y su costo, frecuencia de intervenciones y criterios para el cambio de empaques y sellos mecánicos.

c. RECOLECCIÓN EXPERIMENTAL DE INFORMACIÓN

La cuantificación de las pérdidas de jugo en bombas se realizó de manera experimental ya que no se contaba con información al respecto.

Las pérdidas de jugo antes del ingreso a fábrica eran consideradas indeterminadas por lo que no eran controladas y las pérdidas durante proceso de fabricación eran recolectadas y reprocesadas por lo que tampoco se contabilizaban como pérdidas.

Las bombas de circulación se encontraban instaladas en voladizo alrededor del difusor y las pérdidas de jugo caían directamente al piso. Esta configuración permitió colocar tinas de plástico debajo de las bombas para la recolección de las pérdidas. Se midió y contabilizó el volumen de jugo crudo que caía sobre la tina por minuto.

Se realizaron inspecciones visuales del funcionamiento de los sistemas de sellado instalados donde se indicaba si se observaba fuga de fluido hacia el exterior. Estas inspecciones se registraron en el Formato de seguimiento de sello mecánico y con registro fotográfico del estado de las bombas con los sistemas de sellado instalados.

3.5.3. DIAGNÓSTICO

a. ESTIMACIÓN DEL BALANCE DE MASA E IDENTIFICACIÓN DE PÉRDIDAS DURANTE LA ETAPA DE EXTRACCIÓN

Se realizó el análisis de los datos de la producción de caña, producción de azúcar y los porcentajes de eficiencia del proceso productivo del ingenio azucarero durante el periodo de ejecución del trabajo. Se elaboraron cuadros informativos para lo cual se recurrió a la información recopilada y los datos colectados de consultas realizadas a los jefes de área y a los mecánicos a cargo del mantenimiento de las bombas en el difusor.

Se calculó la cantidad de toneladas de caña por hora de ingreso al difusor y la cantidad de bagazo en toneladas por hora de salida del difusor.

Se calculó también la cantidad de jugo crudo anual y el rendimiento de jugo crudo en función de las toneladas de azúcar crudo producidas.

Se midieron las fugas en las 17 bombas de recirculación del difusor, Las bombas se clasificaron de acuerdo a la condición del sistema de sellado y se estimó el valor promedio de fuga para cada nivel de desgaste en los sistemas de sellado instalados.

Con los valores promedio de fuga en cada bomba se estimó el volumen promedio de fuga de jugo crudo total anual en las 17 bombas del difusor.

b. ESTIMACIÓN DE LA DURACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SELLADO EN BOMBAS DE PROCESO

Con la información experimental recopilada se elaboraron los cuadros de duración de los sistemas de sellados instalados en el momento de la inspección y diagnóstico.

3.5.4. PROPUESTAS DE MEJORA

a. IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE NUEVOS SISTEMAS DE SELLADO EN BOMBAS DE PROCESO

Se realizó el análisis de la información recolectada y con las jefaturas se decidió implementar mejoras en dos bombas de proceso:

Sistema de sellado 1: instalado en bombas de recirculación del difusor área de extracción

Sistema de sellado 2: La propuesta de mejora se desarrolló en 2 etapas:

- Propuesta de sistema de sellado para cada aplicación y especificación de las condiciones mínimas necesarias para su instalación

Se elaboraron cuadros comparativos entre los tipos de sellado actuales y los propuestos donde se apreciaban las ventajas de diseño, se recomendaron dispositivos adicionales y planes ambientales para mejorar el ambiente de funcionamiento del sistema de sellado y aumentar la duración de los sellos mecánicos.

Se indicaron además las condiciones mínimas necesarias en las bombas para la instalación de los sellos mecánicos y los planes ambientales que aseguren su correcto funcionamiento y duración adecuada.

- Evaluación de la duración y efectividad de los sistemas de sellado propuestos durante el funcionamiento de los equipos de bombeo.

Se realizaron visitas mensuales al ingenio azucarero para realizar las observaciones y registrar la evolución en el tiempo del desempeño de los sistemas de sellado propuestos, verificar las condiciones de funcionamiento de las bombas y observar si existían pérdidas de fluido en las bombas a través de estos sistemas.

Se registró la información y se tomaron registros fotográficos como evidencia de la evolución del desempeño de los sistemas de sellado propuestos y se elaboraron cuadros resumen con los resultados obtenidos.

Se concluyó con la evaluación de la duración y efectividad de los sistemas de sellados cuando los sellos mecánicos de las bombas monitoreadas evidenciaron fuga de fluido hacia el exterior, contabilizándose ese periodo como el tiempo de vida útil de los sistemas de sellado.

Para la nueva puesta en funcionamiento de los sistemas de sellado luego de la falla era necesario realizar su reparación y mantenimiento. Los equipos auxiliares necesarios para la instalación de los planes ambientales requerían solo de limpieza, los sellos mecánicos requerían de reparación para lo cual era necesario el kit de reparación que incluía las partes sometidas a desgaste: caras rotativas y estacionarias, resortes, elastómeros y prisioneros de anclaje.

b. Aumento de los volúmenes de extracción de jugo crudo en el difusor y de azúcar crudo producido

Se realizó el cálculo de la cantidad de azúcar producido con los volúmenes de jugo crudo adicional ingresado a fabrica debido a la eliminación de fugas en la zona del difusor del área de extracción con la propuesta de sellado instalada.

c. Estimación del retorno de inversión para cada aplicación

Se realizó el cálculo del ROI para cada aplicación que determinó si las inversiones fueron rentables.

Se realizó un gráfico comparativo de las curvas de los costos acumulados con los sistemas de sellado anteriores, curva de los costos acumulados con las propuestas de sistemas de sellado y la curva de beneficio acumulado. Con este grafico se determinó el tiempo estimado de retorno de inversión para cada propuesta, que se dio en el punto de equilibrio donde la curva de los gastos de mantenimiento de las propuestas anteriores se intersecta con la curva del beneficio acumulado al igualarse el costo de mantenimiento acumulado de los sistemas de sellado anteriores con el beneficio obtenido.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante las visitas técnicas realizadas al ingenio azucarero, se observaron varias zonas en diferentes áreas de proceso que tenían intervenciones frecuentes por reparaciones de sus equipos de bombeo para controlar las pérdidas de fluido de proceso observadas por el área de laboratorio.

Estas pérdidas denominadas indeterminadas solo eran identificadas de manera cualitativa y reportadas por el laboratorio a cada área y se realizaban las tareas correctivas para controlar dichas pérdidas.

4.1. ENTREVISTAS CON JEFES DE AREA

En las reuniones coordinadas con los jefes de las áreas con mayor incidencia en reparaciones de equipos de bombeo y/o pérdidas de jugo de caña se acordó desarrollar el estudio de una propuesta de mejoras en sistemas de sellado para reducir las fugas de jugo. Brindaron las facilidades para realizar las entrevistas con los supervisores y operarios de las áreas en estudio para recolectar la información necesaria y realizar un diagnóstico.

4.2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN Y DIAGNÓSTICO

Se recopiló la información necesaria sobre datos de producción de azúcar, porcentajes de eficiencia, observaciones in situ, entrevistas y datos experimentales de pérdidas de jugo crudo, frecuencias de reparación de bombas y duración de sistemas de sellado para realizar el diagnóstico.

4.3. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SOBRE PRODUCCIÓN ANUAL DE AZÚCAR

Las informaciones recopiladas de los documentos oficiales publicados por el ingenio azucarero en estudio fueron resumidas en la Tabla 2. Se recopilaron los valores anuales de producción, porcentaje de eficiencia y valores de venta durante los años en que se desarrolló el estudio. Se calcularon los valores promedio de los tres años y se utilizaron esos valores para todos los cálculos realizados.

Tabla 2: Resumen de molienda y producción de azúcar en un ingenio azucarero

Molienda		2014	2015	2016	Promedio
Caña Total	TN	2 863 979	2 696 431	2 171 848	2 577 419
Azúcar rubia	TN	305 323	245 881	214 905	255 370
Azúcar refinada	TN	- -	27 510	13 564	20 537
Total azúcar	TN	305 323	273 391	228 468	269 061
Rendimiento Comercial	%	10,66	10,14	10,52	10,44
Melaza % caña	%	3,899	3,998	ND	3,949
Recobrado crudo fábrica	%	83,88	82,76	84,21	83,62
Extracción Total	%	95,720	95,724	95,680	95,708
Ingresos por venta de azúcar	US \$	397 243	458 370	462 762	439 458

FUENTE: Memoria anual del ingenio azucarero en estudio (2014 al 2016)

El ingenio azucarero tiene un porcentaje de extracción total promedio de 95,708% lo que significa un eficiente proceso de extracción de caña. La extracción de caña por difusión generalmente provee mejores porcentajes de extracción total que la extracción por molinos (Chen & Chi Chou, 1993).

Un valor más preciso de la eficiencia en la producción de azúcar es el Recobrado crudo fabrica ya que comprende dos elementos del proceso: la eficiencia en la extracción de

sacarosa en el jugo crudo y la recuperación del azúcar contenido en el jugo crudo llamado también recuperación por evaporación (Rein, 2007).

El recobrado crudo fabrica promedio en el ingenio azucarero en estudio fue de 83,62% situándose dentro de los valores promedios que van del 80 a 90% (Rein, 2007).

Con los datos de extracción total se calculó que en promedio se obtuvieron 2 466 796 toneladas de jugo crudo extraídos del promedio de caña total ingresada al ingenio para procesamiento.

Con los datos de recobrado crudo fabrica se calculó que en promedio se obtuvieron anualmente 321 766 toneladas de sacarosa del total de jugo crudo extraído.

Se compararon las toneladas de sacarosa en jugo crudo extraído con las toneladas de jugo crudo procesado y se concluyó que el jugo crudo que ingresaba a fabrica tenía un promedio de 13.04% de sacarosa.

Se despejaron las toneladas de caña en las fórmulas de rendimiento comercial y extracción total y se expresaron en función de las toneladas de azúcar y toneladas de jugo crudo, obteniéndose:

$$\frac{Tn \text{ azúcar rubia}}{\text{Rendimiento comercial}} \times 100 = \frac{Tn \text{ jugo crudo}}{\text{Extracción total}} \times 100 \quad (15)$$

Con esta ecuación se calculó el rendimiento del jugo crudo que dio un valor de 0,109 Tn azúcar rubia/ Tn jugo crudo.

Esto significa que por cada tonelada de jugo crudo procesado se obtuvieron 0,109 toneladas de azúcar crudo llamado también azúcar rubia.

En la Tabla 3 se muestra la información de las toneladas de caña cosechada y el porcentaje de sacarosa presente en la caña al momento del ingreso a fábrica.

Tabla 3: Rendimientos de caña cosechada

Rendimientos de caña		2014	2015	2016	Promedio
Toneladas de caña/hectárea	Tn/Ha	181,04	156,81	130,51	156,12
Edad de cosecha	Meses	20,51	18,03	16,48	18,34
Sacarosa	%	12,59	12,29	12,45	12,44

FUENTE: Memoria anual del ingenio azucarero en estudio (2014 al 2016)

El valor promedio de porcentaje de sacarosa en caña fue de útil información en los cálculos de balance de masa en el difusor del área de extracción.

El promedio de toneladas de caña cosechada por hectárea bajo considerablemente en el 2016 debido al estiaje y sequía que sufrieron los campos de cultivo sin embargo los mejores valores de venta por kilogramo de azúcar compensaron la menor producción por lo que se observó un aumento en los ingresos por venta de azúcar a pesar de la menor producción en toneladas (SMV, 2016).

4.4. OBSERVACIÓN IN SITU Y ENTREVISTAS

De las visitas al ingenio azucarero se identificaron las áreas de recepción de materia prima, zonas de lavaderos, difusor y molino del área de extracción, área de taller tornos, área de calderos, área de elaboración, área de refinería, área de almacenaje de producto almacenado.

En la **Figura 9** se observa el diagrama de procesos del ingenio azucarero en estudio que incluye la extracción por difusión.

Se visitaron las siguientes áreas:

- Recepción de caña de azúcar; el patio de recepción al aire libre contaba con una balanza para el pesado de camiones y equipos para la descarga de la caña. La caña que llegaba sin hojas era descargada y enviada a los lavaderos.

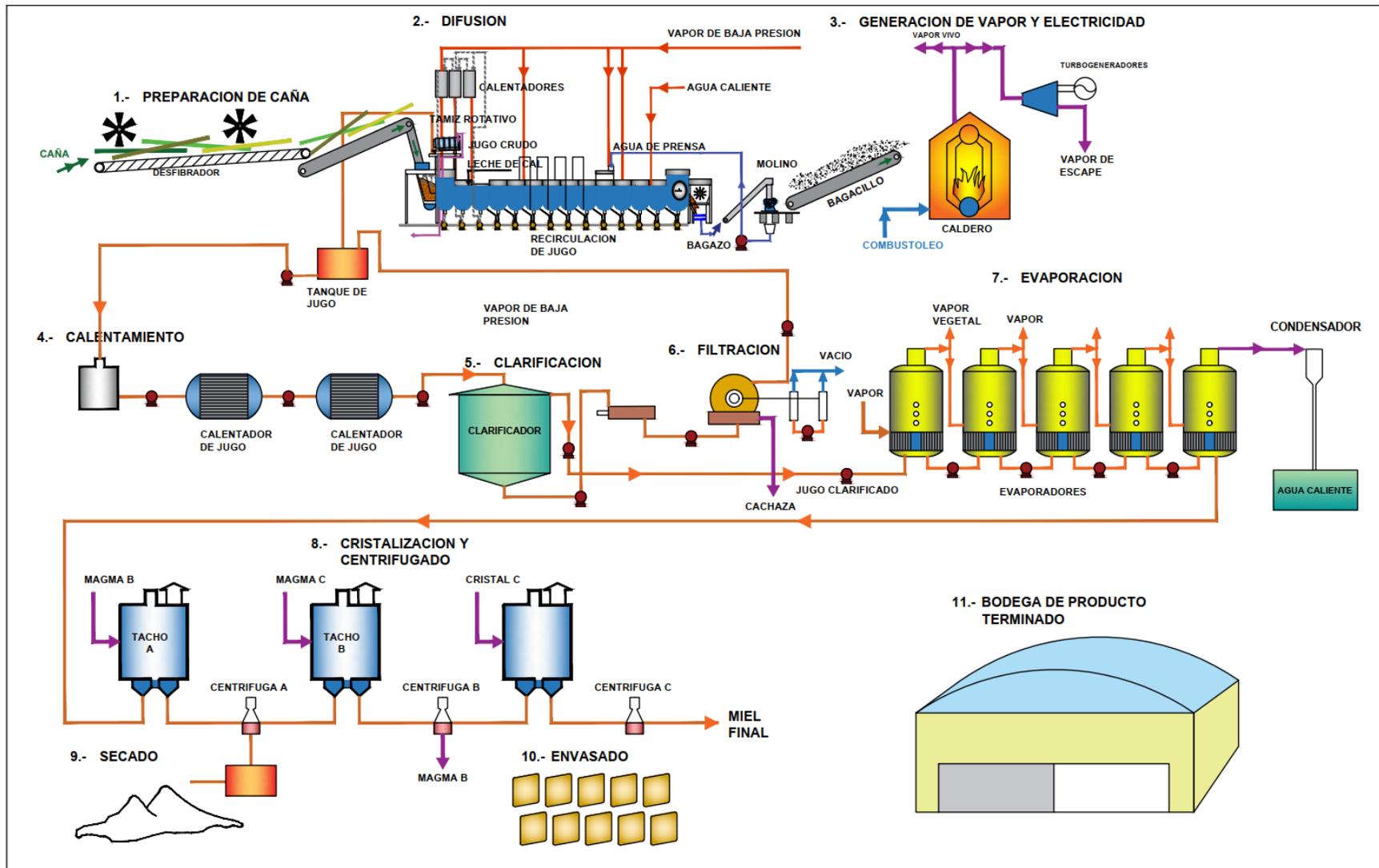


Figura 9: Diagrama de proceso del ingenio azucarero en estudio

- Lavaderos: en esta zona estaban instaladas las mesas de lavado que transportaban la caña hacia el desfibrador mientras las lavaban para quitarle tierra y suciedades.
- Difusor: La caña cortada y desfibrada ingresaba al difusor a través de las mesas transportadoras. En el difusor con el ingreso de agua caliente y vapor se calentaba el jugo que recirculaba a través del difusor extrayendo la sacarosa de la caña de azúcar, una vez terminado el tiempo de residencia del jugo en el difusor se envía el jugo hacia la fábrica con las bombas de envío a fabrica y el bagazo es enviado al molino para extraer el jugo imbibido en la caña desfibrada. Tanto para la recirculación de jugo en el difusor como para el envío de jugo a fabrica se utilizaban equipos de bombeo para el traslado del jugo.
- Molino de extracción: al molino llegaba el bagazo proveniente de la salida del difusor extraía el jugo de prensa del bagazo y lo enviaba nuevamente al difusor como agua de imbibición. Para el transporte del jugo de prensa también se utilizaban bombas centrifugas.
- Área taller tornos; esta área de encontraba entre la zona del difusor y el molino de extracción. En este taller se fabricaban las piezas y repuestos para la reparación de los equipos del ingenio.
- Área de calderos: a esta área llegaba el bagacillo ya exprimido y seco. El bagacillo se utilizaba para la generación de vapor y electricidad necesarios para el funcionamiento de la planta en el ingenio azucarero. En esta área se utilizaban equipos de bombeo para el transporte del agua necesario para la producción de vapor.
- Área de elaboración; en esta área se concentraba el mayor número de bombas. Se utilizaban bombas para el transporte de jugo crudo, jugo diluido, jugo clarificado, jugo encalado, agua caliente, bombas de vacío, transporte de mieles. La mayoría de aplicaciones nombradas contaban con dos bombas para una misma aplicación; una de ellas se encontraba en *stand by* y se ponía en funcionamiento cuando la bomba principal fallaba.

Esta práctica se realizaba porque la planta funcionaba las 24 horas y no se permitía paradas de planta por fallas en bombas.

- Área de refinería: en esta planta se realizaba la refinación y elaboración de azúcar blanca. Se enviaba azúcar crudo a esta planta para el proceso de refinación. Esta área también contaba con un parque grande de bombas para el transporte del jugo diluido.
- Área de almacenaje: zona de almacenes de azúcar crudo y azúcar refinado.

De las entrevistas con los operarios se obtuvieron datos de funcionamiento del difusor, parámetros de funcionamiento, frecuencia de intervenciones de las bombas del difusor, reparaciones y costo de los materiales utilizados. También se obtuvo información de las bombas de clarificación parámetros de operación y funcionamiento, frecuencia de intervenciones y duración de los sistemas de sellado.

Se realizó también el monitoreo a los equipos de dichas áreas para corroborar la información suministrada. Se monitoreo la duración de los sistemas de sellados en bombas del difusor y jugo clarificado bajo las condiciones actuales y se midieron las fugas de jugo crudo en las bombas del difusor.

Con toda la información recopilada se realizaron cálculos de pérdidas y duración de los sistemas de sellado lo que permitió tener un diagnóstico de la situación de las bombas estudiadas.

4.5. BALANCE DE MASA EN EL DIFUSOR

Los datos obtenidos sobre el balance de masa se indican en la Tabla 4 donde se observa el resumen de los ingresos y salidas de masa del difusor, la cantidad de jugo crudo enviado a fabrica y los valores de °Brix y POL del jugo crudo tomado de la Tabla 3.

Tabla 4: Balance de Masa en Difusor

	CANTIDAD	° BRIX	POL PROMEDIO
Ingreso Difusor			
Agua de Prensa	60 Tn/h	--	--
Vapor	6 Tn/h	--	--
Agua imbibición	70 Tn/h	--	--
Caña azúcar	N/D		12,44%
Salida Difusor			
Jugo Crudo	230 Tn/h	14	12%
Bagazo	N/D	N/D	N/D

N/D: No determinado

Se contaba con la información proporcionada de los ingresos de agua y salida de jugo, pero no con el ingreso de caña y ni la salida de bagazo.

En la Figura 10 se describe el balance de masa en el difusor del ingenio azucarero en estudio y se indican los volúmenes de ingreso y salida recopilados:

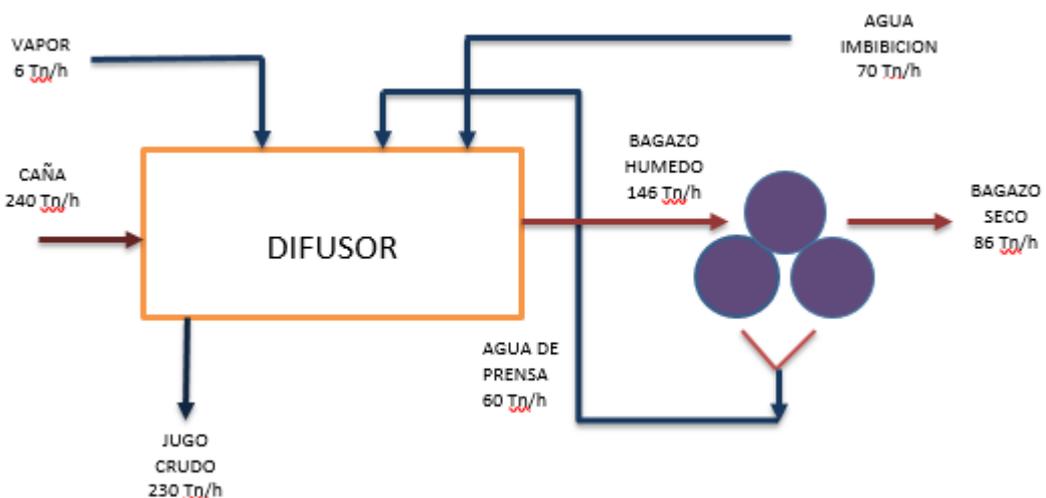


Figura 10: Balance de masa en el difusor del ingenio azucarero en estudio

Para mejorar la extracción de sacarosa en el difusor se calentaba el jugo de recirculación lo que aumentaba la permeabilidad de la caña (Chen & Chi Chou, 1993) por esta razón es que se agregaba vapor al jugo de recirculación para calentarlo.

La temperatura tiene dos efectos en la extracción por difusión: promueve la transferencia de masa al reducir la viscosidad lo que aumenta la velocidad de difusión y desnaturaliza la proteína lignina de las paredes de la caña lo que facilita la permeabilidad de las paredes celulares para una mayor extracción de sacarosa (Rein, 2007).

El agua de prensa obtenida del prensado del bagazo a la salida del difusor retornaba al difusor y se utilizaba como agua de imbibición.

Se realizaron los siguientes cálculos:

- **Cantidad de caña/h que ingresa al difusor para la extracción de jugo:**

De la Ecuación (02) se despejó toneladas de caña por hora:

$$Tn\ caña/h = \frac{Tn\ jugo\ crudo/h}{\% Extracción\ jugo} \times 100 \quad (16)$$

Considerando la extracción total promedio indicada en la Tabla 2 se tiene que el ingreso al difusor es de 240,31 Tn de caña/h.

- **Cantidad de bagazo Tn/h que sale del difusor:**

$$\% Extracción\ total = 100 + \frac{Tn\ agua}{Tn\ caña} \times 100 - \frac{Tn\ bagazo}{Tn\ caña} \times 100 \quad (11)$$

Considerando la extracción total promedio indicada en la Tabla 2 se obtiene que salen del difusor 146,30 Tn de bagazo/h.

- **Producción anual de jugo crudo**

$$Tn\ jugo\ crudo = \% Extracción \times Tn\ caña \times 100 \quad (17)$$

Considerando la extracción total promedio indicada en la Tabla 2 se obtiene que la producción anual es de 2 446 796,18 Tn jugo crudo/año.

Con los valores de balance de masa en el difusor y la información recopilada en la **Tabla 2** es posible calcular el rendimiento del jugo crudo ya que tenemos las cantidades iniciales de ingreso y finales de salida.

Con la Ecuación (13) se calcula el rendimiento según:

- **Rendimiento del jugo en toneladas de azúcar:**

$$\text{Rendimiento de jugo crudo} = \frac{\text{Tn azúcar rubia}}{\text{Tn jugo crudo}} \times 100 \quad (13)$$

$$\text{Rendimiento de jugo crudo} = 11\% \text{ Tn azúcar rubia/Tn jugo crudo}$$

Esto significa que al procesar el jugo crudo la cantidad de azúcar obtenida era el 11% del peso total del jugo crudo procesado. Es decir que de cada tonelada de jugo crudo procesado se obtenían 110 kg de azúcar crudo.

Se había calculado también el rendimiento de jugo crudo por tonelada de azúcar a partir de la ecuación (15) que expresaba las toneladas de caña en función del rendimiento comercial y de la extracción total. Este cálculo dio un resultado de 0,109 toneladas de azúcar por cada tonelada de jugo crudo procesado, si lo redondeamos a dos cifras el resultado será el mismo 0,11 Tn azúcar rubio/Tn jugo crudo.

La coherencia de ambos resultados confirma que los cálculos del balance de masa también son coherentes.

En la Tabla 5 se muestra el resumen de los cálculos de balance de masa realizados.

Tabla 5: Cálculos del Balance de masa

	Unidad	Resultados
Ingreso de Caña	Tn/h	240
Salida de Bagazo	Tn/h	146
Salida de Jugo crudo a Difusor	Tn/año	2 466 796
Rendimiento del Jugo Crudo	Tn azúcar/Tn jugo	0,11

Rein (2007) refiere que debido a que existen pérdidas indeterminadas de sacarosa producidas durante el almacenaje, lavado y desfibrado de la caña lo más razonable para tener un balance de masa confiable es medirlo desde la salida del jugo crudo de la planta de extracción hacia la fábrica de elaboración. Se debe además poner especial énfasis en el cálculo de los flujos de melazas para poder calcular el valor de las pérdidas indeterminados con alguna seguridad o confianza.

Chen & Chi Chou (1993) por otro lado indican que es importante contar con información confiable acerca de las pérdidas no contabilizadas o indeterminadas ya que sirven para estimar cuanta azúcar se está perdiendo y establecer en que parte del proceso se está perdiendo. Una vez identificados los puntos críticos de pérdidas de jugos se pueden mejorar o controlar las condiciones que producen las fugas y luego medir los cambios en las pérdidas como respuesta a los cambios realizados.

4.6. ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE JUGO CRUDO

4.6.1. BOMBAS DE DIFUSOR EN LA ETAPA DE EXTRACCIÓN

Durante las visitas e inspecciones coordinadas al ingenio azucarero se observaron fugas de fluido en todas las bombas centrífugas de recirculación en el difusor del área de extracción debido a la falta de hermeticidad en el sistema de sellado.

En la Figura 11 se muestran bombas del difusor que presentaban fugas de jugo crudo, en estas bombas se utilizaban empaquetaduras como sistema de sellado.



Figura 11: Bombas de difusor con fugas de jugo crudo

En el Anexo 1 se muestran registros fotográficos de las pérdidas de jugo en diversas bombas del área del difusor. Se observaban fugas en la zona de sellado y las pérdidas acumuladas en el piso del área de extracción; la acidez del jugo crudo deterioraba el piso de concreto, la inversión y degradación de la sacarosa promovía un ambiente contaminado y sucio que no daba un buen aspecto al área.

Las pérdidas de jugo crudo no eran recolectadas y además debido a la degradación e inversión de la sacarosa los jugos no se podían reingresar al proceso. Eran informadas por el laboratorio de manera cualitativa con evidencias físicas (fotos) y se solicitaba al área de mantenimiento reparar los equipos de bombeo para eliminar las fugas.

Debido a que el balance de masa y el porcentaje de recobrado de azúcar se controlaba desde la salida del jugo crudo del difusor hacia la planta de procesamiento, las pérdidas en el área no eran medidas ni contabilizadas y se consideraban como pérdidas indeterminadas.

Los controles químicos del departamento de laboratorio en todo el proceso y en los productos finales permitían la estimación de las pérdidas de sacarosa y de la eficiencia del proceso de recuperación de la misma pero solo desde la salida del difusor y no durante el proceso de extracción de jugo.

Para tener un patrón de referencia de la cantidad de pérdidas en las bombas se realizó la medición del volumen de jugo perdido por cada una de las 17 bombas de recirculación del difusor del área de extracción, medido en mililitro por minuto (mL/min).

El desgaste de los sistemas de sellado y el nivel de fugas de jugo crudo no eran similares para todas las bombas, el volumen de fuga estaba en función al estado de los empaques y bocinas del sistema de sellado de las bombas.

En la Tabla 1 se describieron los niveles de eficiencia de las bombas en función de la condición del sistema de sellado; utilizando esta tabla se identificaron las bombas según su nivel de eficiencia y se recolectaron las pérdidas de jugo crudo en cada una de ellas.

Con los volúmenes obtenidos se calculó el valor promedio de fuga para cada nivel de eficiencia de las bombas de recirculación en el difusor.

En la Tabla 6 se muestra los promedios de volúmenes de fuga de jugo crudo y la desviación estándar de las muestras tomadas. Nótese como la desviación estándar aumenta conforme se deteriora la eficiencia de la bomba y aumentan los volúmenes de jugo perdido.

Tabla 6: Registro de pérdidas en bombas del difusor

NIVEL	CONDICIÓN		CONDICIÓN DE	FUGA PROMEDIO DE JUGO CRUDO	DESVIACIÓN ESTANDAR
EFICIENCIA	BOCINA	EMPAQUE	LA BOMBA	mL/min	
1	Nueva	Nuevo	Óptimo	6,13	0,63
2	Buen estado	Ligero desgaste	Controlable	17,81	1,78
3	Ligero desgaste	Nuevo	Controlable	65,73	2,76
4	Ligero desgaste	Desgastado	Crítico	144,61	5,45
5	Desgastada	Desgastado	Crítico	274,80	6,24

El sistema de sellado por empaquetaduras tiene un corto ciclo de vida y conforme se acerca a su final las pérdidas de fluido son mucho más difíciles de controlar y los volúmenes de fuga aumentan incontrolablemente hasta el punto en que es necesario no solo cambiar las empaquetaduras sino también la bocina desgastada.

En la Tabla 7 se muestra el detalle de la cantidad de bombas y los volúmenes totales de perdida de jugo por cada nivel de eficiencia.

Tabla 7: Volumen total de fugas en bombas de difusor

NIVEL	CONDICIÓN DE	CANTIDAD DE	FUGA PROMEDIO DE	FUGA PROMEDIO
EFICIENCIA	LA BOMBA	BOMBAS	JUGO CRUDO	TOTAL DE JUGO
		Unid	mL/min	CRUDO
				mL/min
1	Óptimo	6	6,13	36,78
2	Controlable	3	17,81	53,43
3	Controlable	1	65,73	65,73
4	Crítico	3	144,61	433,83
5	Crítico	4	274,8	1 099,2
TOTALES		17		1 688,97

Considerando la cantidad de bombas en los diferentes niveles de eficiencia se calculó que en las 17 bombas se producía una pérdida de 1 688,97 mL/min.

El difusor trabajaba las 24 horas del día, solo se programaban paradas cortas para los cambios de empaques y mantenimientos programados en el año.

Una de las ventajas de la extracción por difusión radica en que el difusor se puede intervenir las bombas de recirculación sin detener su funcionamiento e incluso se puede detener el equipo para mantenimiento sin la necesidad de detener la producción del ingenio, además los costos de mantenimiento son mucho menores en comparación con la extracción por molinos donde los costos de mantenimiento son elevados y no se pueden intervenir sin antes paralizar toda la planta de producción (Rein, 2007).

Se consideraron 345 días efectivos de trabajo del difusor para el cálculo de las fugas.

Fuga total en las 17 bombas:

$$\text{Fuga total} = 1\,688,97 \text{ mL Jugo crudo /min} * 60 \text{ min/hr} * 24 \text{ hr/día} * 345 \text{ días/año}$$

$$\text{Fuga total} = 839\,080\,296 \text{ mL Jugo crudo /año}$$

Debido a que las fugas calculadas se encuentran en volumen, se utilizó la Ecuación (12) para calcular la cantidad de fugas en toneladas de jugo crudo.

En el anexo 2 se muestra la tabla de densidades para soluciones de sacarosa a diferentes concentraciones desarrolladas por Zavaleta (2011) la cual se tomó con referencia para determinar el valor de la densidad para el jugo de caña a 70°C.

Según dicha tabla para un jugo de 14°Brix a 70°C le corresponde una densidad de 1,0355g/mL.

Con dicha información se pudo calcular la cantidad en toneladas de fuga anual de jugo crudo en las bombas de recirculación en el difusor.

Fuga total = 839 080 296 mL Jugo crudo /año*1,0355g/mL

Fuga total = 868 867 646,51 g jugo crudo/año

Fuga Total = 868,87 Tn jugo crudo/año

4.6.2. BOMBAS DE CLARIFICACIÓN EN ÁREA DE ELABORACIÓN

Según lo indicado por Rein (2007) en un balance de masa de todo el proceso de elaboración de azúcar confiable se deben contabilizar las pérdidas de jugo dentro de fábrica una vez que ingresa el jugo crudo y se inicia el proceso de elaboración por lo que se deberían considerar los flujos de melazas en fugas de bombas para poder calcular el valor de las pérdidas indeterminados con alguna seguridad o confianza.

Por ello dentro de fábrica se lleva una supervisión más estricta de las fugas y pérdidas de material, se observó que las bombas de proceso se encontraban instaladas con sellos mecánicos como sistemas de sellado más confiables para un mejor control de las fugas de material.

En las bombas de clarificación no se observaban pérdidas de jugo por el sistema de sellado mientras el sello mecánico se encontraba en buen estado. Las pérdidas se iniciaban cuando fallaba el sello mecánico y esta falla determinaba su tiempo de vida útil.

En algunas bombas de jugo clarificado sobre todo aquellas con concentraciones más elevadas de °Brix se observaron pérdidas de fluido durante su funcionamiento, pero las fugas se recolectaban en bandejas de acero inoxidable que luego eran ingresadas al proceso productivo como reproceso por lo que no se consideraban como pérdidas.

La mayor concentración de °Brix en el fluido da mayor valor a estas pérdidas por lo que el control de las fugas era estricto. Desechar estas pérdidas significaba disminuir los porcentajes del Recobrado crudo fabrica llamado también Recobrado total.

El Recobrado total es uno de los indicadores más frecuentemente utilizados por los ingenios azucareros para medir la eficiencia en el proceso productivo ya que expresa la eficiencia para recuperar azúcar a partir de la sacarosa en la caña de azúcar.

Debido a la ocasional demora en la intervención de las bombas con sello mecánico con falla se observó que presentaban fugas no controladas.

En la Figura 12 se observan bandejas de acero inoxidable en la base de la bomba que recolectaban las fugas y las enviaban a reproceso. Al ser reprocesadas no se consideraban como pérdidas.



Figura 12: Bomba de jugo clarificado con fuga de jugo

4.7. ESTIMACIÓN DE LA DURACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SELLADO ACTUALES

Se observó que las bombas de recirculación del difusor denominadas sistema de sellado 1 eran intervenidas semanalmente para el cambio de empaquetaduras como control de las pérdidas de fluido.

Sin embargo, este cambio de empaquetaduras no lograba controlar efectivamente la fuga de todas las bombas ya que unas se encontraban en mejor condición que otras.

Como se indica en la Tabla 1 se establecieron niveles de eficiencia y condición de bomba en función al estado de los elementos del sistema de sellado. Así una bomba en condición óptima tenía un nivel de eficiencia 1 y un mínimo de fuga de jugo crudo fácilmente controlable mediante el ajuste de empaquetaduras, mientras que una bomba en condición

crítica y nivel de eficiencia 5 tenía una gran fuga de jugo que los ajustes de empaquetaduras no lograban controlar.

Cuando se llegaba a un nivel de eficiencia 5 era necesario un mantenimiento mayor que incluía no solo el cambio de empaques sino también el cambio de la bocina desgastada. En este punto terminaba el ciclo de vida del sistema de sellado por empaques en las bombas del difusor.

Para controlar las fugas se realizaban cambios semanales de empaquetaduras y cambios de bocina debido al desgaste al cabo de los 02 meses. El cambio de bocina determinaba el fin del ciclo de vida del sistema de sellado en las bombas del difusor el cual se verificó era de 02 meses.

Dependiendo del momento en el que se encontraba tanto el empaque como la bocina se podían observar diferentes niveles de pérdidas, en la Figura 13 se puede observar una proyección del incremento del volumen de fuga en una bomba durante su ciclo de vida, es decir 8 semanas.

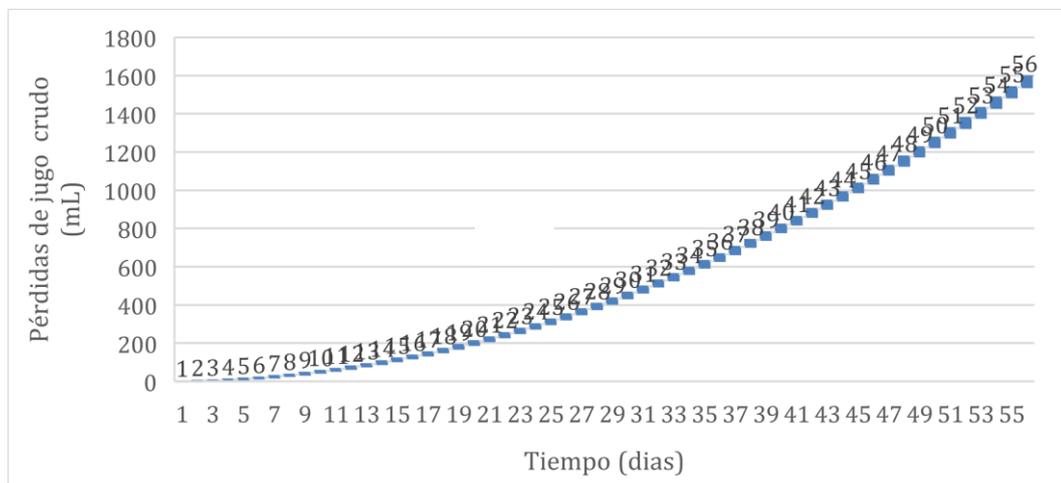


Figura 13: Fugas de jugo en bomba del difusor durante el ciclo de vida del sistema de sellado

Ya que el principio de funcionamiento de una empaquetadura es controlar la fuga, es lógico que se cambie el sistema completo cuando la fuga se torna incontrolable.

Se verificó que en las bombas de jugo clarificado denominadas sistema de sellado 2 el sello mecánico instalado duraba 8 meses lo que determinaba su ciclo de vida.

Normalmente para los sellos mecánicos encartuchados como el instalado en la bomba de jugo clarificado se les estima un tiempo de vida de un año como mínimo por lo que se observó que la duración del sello no era la adecuada. A diferencia de los empaques, un sistema de sellado con sello mecánico elimina la fuga durante su funcionamiento y solo al final de su ciclo de vida tendrá fugas que generalmente son controlables y en cantidades limitadas. En el ingenio azucarero se observó que las fugas en sellos mecánicos se controlaban fácilmente colocando una bandeja que recibía el material fugado y que era suficiente para contenerlo ya que las cantidades eran pequeñas.

Cuando el sello mecánico de las bombas de jugo clarificado presentaba fuga se realizaba la reparación del sello mecánico que consistía en el cambio de las partes desgastadas del sello mecánico: cara rotativa, cara estacionaria, elastómeros, resortes, prisioneros. Una vez instalado y puesto en funcionamiento el sello mecánico reparado solo trabajaba 06 meses sin presentar fuga. Luego de dos reparaciones el sello mecánico no se podía continuar reparando porque presentaba desgaste en la bocina pre ensamblada del sello encartuchado y esta parte del sello mecánico no era reparable.

Con los valores de referencia de duración de los sistemas de sellado utilizados normalmente en las bombas de jugo clarificado y en las bombas de recirculación del difusor se elaboró la Tabla 8 que indica los tiempos de duración de cada uno de ellos.

Tabla 8: Duración de sistemas de sellado actuales

BOMBA	TIPO SELLADO	TIPO MANTENIMIENTO	FRECUENCIA REPARACION	CICLO DE VIDA
Sistema sellado 1	Empaques	Cambio empaque	semanal	
		Cambio empaque y bocina	2 meses	2 meses
Sistema sellado 2	Sello Mecánico	Nuevo	8 meses	
		Cambio kit de reparación	6 meses	20 meses*

* Incluye 02 reparaciones con kit de reparación

Para ambas aplicaciones se observaron cortos tiempos de duración de los sistemas de sellado y frecuentes intervenciones para reparación lo que originaba altos costos de mantenimiento y compra de repuestos.

4.8. PROPUESTAS DE MEJORA

Definidas las bombas que se iban a intervenir e identificados los puntos de pérdida de jugo crudo en la bomba del difusor y bomba de jugo clarificado se estableció una propuesta de mejora en los sistemas de sellado que significaba un aumento en la recuperación de sacarosa y mayor producción de azúcar.

Este aumento suponía una mejora en los porcentajes de Recobrado Total y de Extracción total ya que se enviaría mayores cantidades de jugo a fabrica y se tendría mayores cantidades de azúcar producida. Estos indicadores son ampliamente utilizados en la industria azucarera para medir la eficiencia y productividad del proceso productivo.

Se explicó además que era posible no solo aumentar la cantidad de jugo crudo enviado a fabrica sino también lograr un desempeño más eficiente de los equipos de bombeo mediante un nuevo sistema de sellado sin fugas y que extendía su tiempo de vida, el tiempo promedio entre las reparaciones y que propiciaba un ambiente más limpio y seguro en planta con menos costos de mantenimiento.

Se estableció implementar los sistemas de sellado solo en una bomba del difusor y en una bomba de jugo clarificado para monitorear y verificar la efectividad de la propuesta.

Las bombas de proceso en fabrica generalmente se instalan en conjunto con otra bomba similar de *stand by* disponible para entrar en funcionamiento inmediatamente en caso falle la bomba que se encuentra trabajando. Para el caso de la bomba de jugo clarificado se instaló el sistema de sellado propuesto en una bomba en operación y en la bomba de *stand by* se instaló el sistema de sellado que normalmente utilizaban.

Ya que la vida útil de un sello mecánico encartuchado generalmente oscila entre un año a más, se estableció un periodo de evaluación de 12 meses para ambas propuestas de sellado. Sin embargo, la evaluación en caso los sistemas de sellado superaron el año de funcionamiento por lo que se prolongó el monitoreo del desempeño de las propuestas de sellado hasta el momento de falla con la finalidad de determinar la efectividad y el ciclo de vida de los sistemas de sellado.

El sistema de sellado instalado en la bomba del difusor tuvo un tiempo de duración de 21 meses sin falla ni intervenciones. Se recomendó realizar la reparación del sello mecánico para tenerlo operativo nuevamente y que continúe trabajando donde estaba instalado.

Ya que la duración sin presentar falla determinaba el ciclo de vida útil se estableció que el tiempo de vida útil del sistema de sellado 1 fue de 21 meses,

El sistema de sellado instalado en la bomba de jugo clarificado tuvo una duración de 26 meses sin falla ni intervenciones. Se recomendó realizar la reparación del sello mecánico para tener operativo nuevamente el sistema de sellado y que continúe trabajando donde estaba instalado.

Se estableció que el ciclo de vida útil o tiempo de vida útil del sistema de sellado 2 fue de 26 meses,

4.9. IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE NUEVOS SISTEMAS DE SELLADO EN BOMBAS DE PROCESO

Los empaques fueron los primeros elementos de sellado utilizados para sellar y controlar las fugas en equipos rotativos y aún hoy en día se continúan utilizando en una diversidad de aplicaciones. Se prefiere su uso ya que son de bajo costo inicial, es de fácil instalación y mantenimiento.

Pero, por otro lado, los empaques son caros de mantener ya que para controlar las fugas de producto se deben cambiar los empaques frecuentemente sobre todo cuando se utilizan en equipos que transportan fluidos abrasivos. Ya que el principio de funcionamiento del empaque es solo controlar la fuga y no eliminarla, siempre habrá un goteo y fuga hacia el

medio ambiente. Un adecuado goteo o fuga es entre 8 a 10 gotas por minuto por cada pulgada de diámetro del eje o bocina de la bomba (Chesterton Global Training, 2009).

Los empaques necesitan de un fluido de refrigeración para lubricar y reducir las altas temperaturas que se generan por la fricción entre los empaques que permanecen estáticos en la caja estopera y la bocina o eje de la bomba que gira a determinados rpm. En algunos casos cuando los fluidos bombeados son limpios y están a bajas temperaturas no necesitan lubricación adicional para su funcionamiento ya que el fluido mismo actúa como lubricante; pero en el caso de fluidos bombeados a altas temperaturas que contienen abrasivos y/o sustancias peligrosas para el medio ambiente es necesario utilizar refrigeración de una fuente externa, la cual debe ser inyectada a una presión 1 bar mayor que la presión en la caja estopera para asegurar que el fluido ingrese a la caja de sellado y entre en contacto con los empaques; como consecuencia el líquido de refrigeración ingresa al circuito de bombeo y se mezcla con el fluido bombeado (Chesterton Global training, 2009).

En la Figura 5 se mostró la ubicación de los empaques y del anillo linterna que se instala entre los anillos de empaque alineado con el punto de ingreso del líquido de refrigeración para ayudar a distribuir el agua entre los empaques.

Es importante que el fluido utilizado para la refrigeración sea compatible con el fluido bombeado y que no interfiera con el proceso productivo. En la mayoría de los casos se utiliza agua, pero en algunas ocasiones no es posible utilizarla ya que no es compatible con el fluido bombeado o lo diluye afectando el proceso productivo.

En el caso de las bombas de recirculación en el difusor se utilizaban empaques, sin agua de refrigeración a pesar que el jugo crudo bombeado contenía suciedades y bagacillo, era pegajoso, abrasivo y no buen lubricante. El ingreso de agua adicional alteraba el proceso productivo ya que con mayor cantidad de agua ingresada al proceso se requería mayor cantidad de energía para evaporar el adicional de agua inyectada lo que reducía la eficiencia e incrementaba el costo de producción. Además, el ingreso adicional de agua de refrigeración alteraba el balance de materia en el difusor.

En el balance de materia en el difusor se considera:

$$Tn \text{ caña} + Tn \text{ agua imbibición} = Tn \text{ jugo diluido} + Tn \text{ bagazo} \quad (01)$$

Si consideramos el agua de refrigeración se tendría:

$$Tn \text{ caña} + Tn \text{ agua imbibición} + Tn \text{ agua refrigeración} = Tn \text{ jugo diluido} + Tn \text{ bagazo} \quad (16)$$

Al tener una mayor cantidad de agua el porcentaje de extracción se vería afectado

$$\% \text{Extracción jugo crudo} = \frac{Tn \text{ jugo crudo}}{Tn \text{ caña}} \times 100 \quad (02)$$

En la Figura 14 se observan las suciedades encontradas durante una inspección y cambio de empaquetaduras en bombas de jugo crudo de la zona de extracción.



Figura 14: Bagacillo en caja estopera de bombas zona de extracción

La presencia de estos contaminantes, las características del jugo crudo y la falta de lubricación externa reducía notablemente la duración de los empaques utilizados en estas bombas; se requerían continuos ajustes de los empaques para el control de fugas y cambios frecuentes de empaques. Los continuos ajustes deformaban los empaques y reducían su volumen exudando todo el lubricante impregnado en las fibras del empaque; cuando los empaques perdían todo el lubricante interno se endurecían aumentando la fricción y daño en el eje o bocina de la bomba. En la

Figura 15 se puede observar el ciclo de deterioro de los empaques debido a los continuos ajustes.

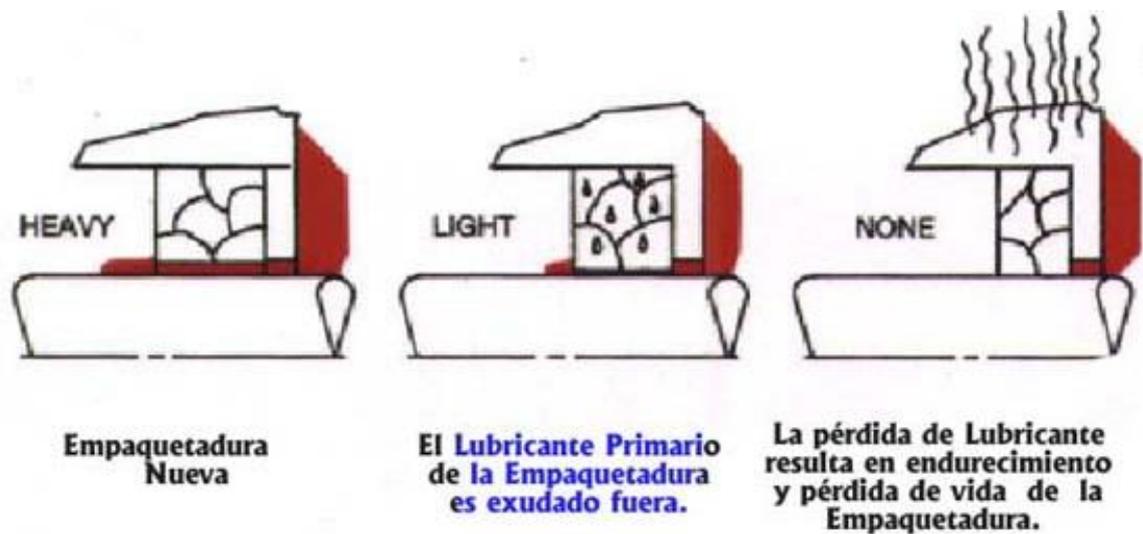


Figura 15: Ciclo de vida de una empaquetadura

FUENTE: Chesterton (2008)

Debido a la fricción generada los empaques se quemaban y dañaban la bocina de los ejes sobre la cual se instalaban los empaques. El cambio de bocinas también era frecuente y se consideraba como mantenimiento mayor de las bombas.

En la

Figura 16 se puede observar los empaques quemados retirados de una bomba para cambio durante el mantenimiento semanal.



Figura 16: Empaques usados de bombas de circulación

En la Figura 17 se evidencia el desgaste de las bocinas en las bombas de circulación del difusor intervenidas para mantenimiento mayor.



Figura 17: Bocina desgastada de bomba de circulación

Para controlar las fugas en los empaques se aplica fuerza a los anillos de empaque con el ajuste del *gland* o estopero, los anillos más próximos a la zona de ajuste tendrán mayor deformación y producirán el mayor desgaste en la bocina (Chesterton, 2009).

En la

Figura 17 se pudo observar una bocina desgastada retirada de una bomba de recirculación del difusor. Nótese el diámetro inicial de la bocina en los extremos no desgastados de la bocina y la zona de mayor desgaste por deformación de los empaques.

En la Figura 18 se grafica la distribución de la fuerza ejercida sobre los empaques.

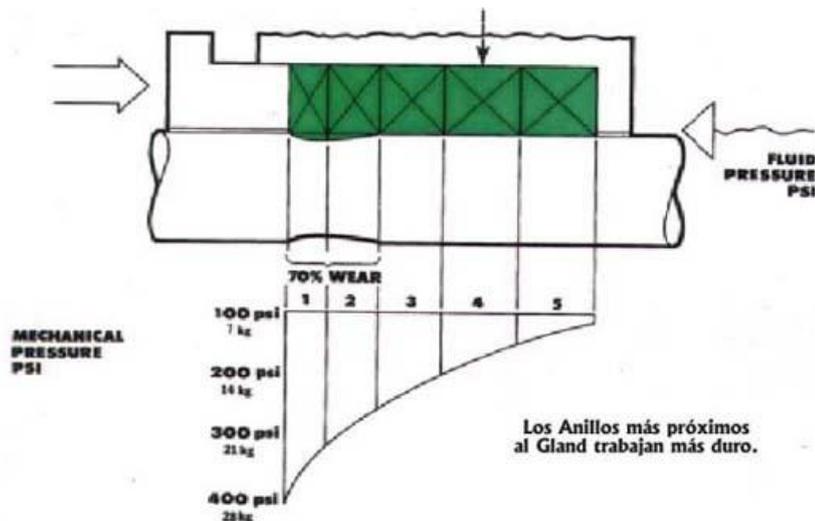


Figura 18: Desgaste de bocina por deformación de empaques

FUENTE: Chesterton (2008)

En la Figura 19 se explican los criterios de decisión para el uso de empaques y/o sellos mecánicos en el sellado de bombas y como el nivel de fugas aceptable define el sistema de sellado a utilizar.

En el caso de utilizar empaquetaduras el criterio es ajustar los prensaestopas en caso haya fuga excesiva (1). Si es necesario eliminar la fuga del sistema de sellado por empaques se debe migrar hacia el uso de un sello mecánico y plan ambiental de ser necesario (2). Cuando se utiliza un sello mecánico si se presenta una fuga es necesario realizar su cambio y/o reparación (3). En ambos casos mientras la fuga este controlada se debe monitorear su desempeño para establecer el tiempo de vida útil del sello mecánico y estimar el retorno de la inversión (4).

Debido a la facilidad para el mantenimiento de las bombas de circulación en el difusor y a que no se llevaba un control de las pérdidas de jugo crudo no se había evaluado la posibilidad de mejorar el desempeño de las bombas de difusor ni mejorar las condiciones de sellado para reducir las fugas de jugo.

Sin embargo, en el proceso de fabricación de azúcar el elemento más importante es el jugo de caña y pérdidas de jugo significan pérdidas de producción que afectan los porcentajes de recuperación de la sacarosa. Por ello es importante eliminar las fugas de jugo hacia el exterior, sobre todo en aquellas aplicaciones donde las fugas de fluido no son recuperables (Chen, 1993).

Ya que el sistema de sellado por empaquetaduras utilizado en las bombas de circulación del difusor solo controlaba las fugas de jugo crudo al exterior, era necesario cambiar el sistema de sellado por uno en el que se incluya un sello mecánico para eliminar las pérdidas de jugo crudo en esta zona, extender la vida útil de los sistemas de sellado, reducir los costos por mantenimiento y brindar un ambiente más limpio y seguro en la zona del difusor.

Existe una diversidad de sellos mecánicos en el mercado que han sido diseñados con características que mejoren su desempeño frente a condiciones agresivas de trabajo y sobretodo su durabilidad. Se han desarrollado además nuevos materiales para los

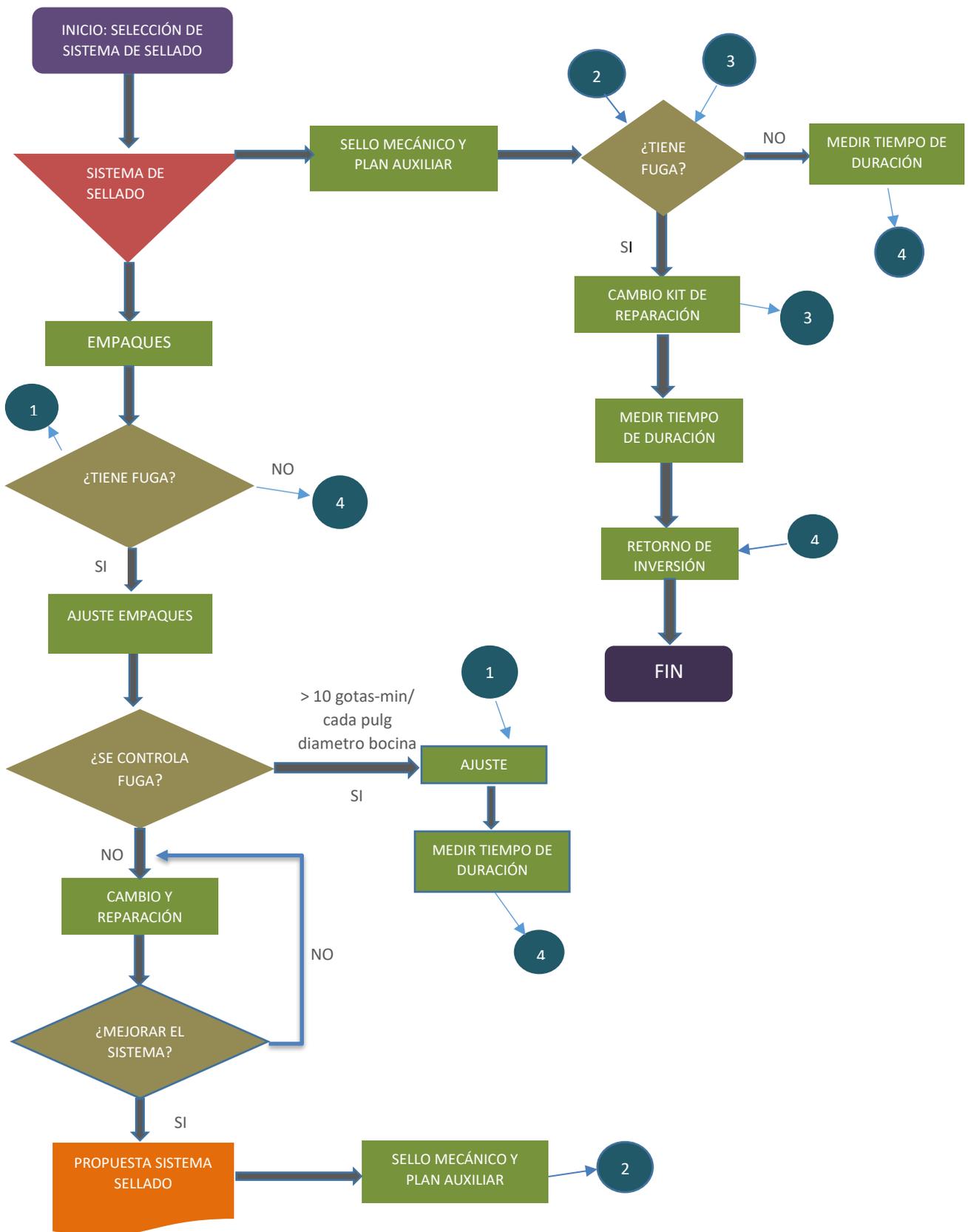


Figura 19: Flujograma de decisión para selección de sistemas de sellado en bombas

elastómeros, componentes de metal, materiales, diseños de las caras y de los sellados secundarios, que mejoran su desempeño durante su funcionamiento.

- **Sellos mecánicos balanceados**

Los primeros sellos mecánicos diseñados con tenían un balance hidráulico por lo que toda la presión hidráulica del fluido en la caja de sellado actuaba sobre las caras del sello presionándolas excesivamente lo que producía un rápido desgaste. Al estar las caras del sello muy presionadas no se formaba la capa lubricante entre ellas y se producía alta fricción; alta generación de calor y alto consumo de energía. Debido a la alta presión ejercida entre las caras estos sellos trabajaban solo con bajas presiones y temperaturas de operación (*Chesterton Global Training, 2007b*).

Con el desarrollo de la tecnología se diseñaron sellos mecánicos que soportaban rangos de operación más amplios lo que aumentó el tiempo de vida útil de los sellos mecánicos y la confiabilidad de los equipos de bombeo. Durante el funcionamiento de un sello mecánico actúan dos tipos de fuerzas sobre las caras: (1) las fuerzas de cierre dada por los resortes del sello y por la presión del fluido contra la cara con la que está en contacto directo, lo que mantiene las caras muy pegadas entre si y (2) las fuerzas de apertura que es la presión del fluido en el área de contacto de ambas caras tratando de abrirlas.

Un sello balanceado busca balancear ambas fuerzas. El rango de balanceo generalmente es 70/30. Al reducir la fuerza de cierre aplicada sobre la cara del sello se reduce el consumo de energía, el desgaste excesivo de las caras del sello y no se genera tanto calor por fricción entre las caras (*Chesterton, 2006a*).

- **Sellos mecánicos estacionarios**

Los sellos mecánicos que llevan los resortes en la parte rotativa, en contacto con el fluido se denominan sellos rotativos. El resorte se contrae y expande con cada rpm de giro de la bomba por lo que está expuesto a una temprana fatiga, esto además reduce los límites de velocidad a los que puede trabajar. La posibilidad de que los resortes se obstruyan por contaminación y produzcan una falla al dejar el sello mecánico con las caras abiertas, sobretodo en

aplicaciones de fluidos con contaminantes, abrasivos, polimerizantes, limita su uso en estas aplicaciones (Chesterton Global Training 2007b).

Cuando los elastómeros de sellado secundario se encuentran en la parte rotativa del sello se desplazan en conjunto con la parte rotativa generando desgaste en el eje o bocina de la bomba. Para el correcto funcionamiento de un sello mecánico las caras deben permanecer perpendiculares al eje, pero durante el funcionamiento de la bomba la posición de la cara del sello varia, ya sea por distorsiones o deflexiones del eje; los resortes ayudan a compensar estas distorsiones para evitar una fuga por apertura de las caras, lo que produce un desplazamiento de la parte rotativa que mueve el elastómero o sellado secundario hacia adelante y atrás, dos veces por cada rpm produciendo un desgaste en el eje o bocina llamado *fretting*. Una vez que se produce un desgaste, contaminantes o partículas abrasivas presentes en el fluido pueden ingresar entre el eje y el elastómero acelerando el proceso de desgaste y deterioro del elastómero lo que desencadena en falla del sello mecánico (Chesterton Global Training 2007b).

Según lo indica el manual de Chesterton Global Training (2007b) para superar estas limitaciones se diseñaron sellos con partes rotativas con resortes aislados que no entraban en contacto con el fluido para evitar su obstrucción; sellos mecánicos con diseño de resortes estacionarios donde los resortes se colocaban en la parte estacionaria del sello mecánico para reducir la fatiga y prolongar el tiempo de vida útil.

Se desarrollaron además elastómeros en materiales que soporten mayores temperaturas y ofrezcan mayor resistencia química; sellos mecánicos con *o' rings* estáticos que no producen el *fretting* o desgaste del eje de la bomba. En este diseño los *o' ring* dinámicos se encuentran sobre una parte reemplazable del sello mecánico para poder ser reparado sin tener que cambiar todo el sello mecánico (Chesterton Global Training 2007b).

- **Diseño de caras optimizado**

Todos los sellos mecánicos tienen “emisiones fugitivas” que son las vaporizaciones del fluido en su camino a través de las caras del sello mecánico. Ya que se asume que la presión en la caja de sellado será siempre mayor que la presión atmosférica conforme recorre las

caras del sello mecánico por diferencia de presiones la capa lubricante de fluido se vaporiza y fuga al exterior a través de emisiones, los cuales generalmente se miden en partes por millón. Estas emisiones fugitivas no son visibles a simple vista. Cuando hay un desgaste excesivo de las caras o falla del sello mecánico la fuga se vuelve incontrolable y visible a simple vista. Para controlar la cantidad de emisiones fugitivas en un sello se deben mantener las caras lo más juntas posible, perpendiculares respecto al eje y evitar las distorsiones causadas por acción de la presión y temperatura explicadas en la *Figura 7* (FSA, 2008).

Con el diseño de caras optimizadas en sellos mecánicos se fabricaron caras rotativas encapsuladas en bases metálicas, estas caras angostas redujeron la cantidad de fricción y emisiones, pero persistían en menor medida las distorsiones en las caras por presión y temperatura. La base metálica que contenía la cara rotativa durante funcionamiento se exponía a dilatación que soltaba la cara encapsulada y distorsionaba su posición (FSA, 2008).

Mediante el uso del análisis de elementos finitos se han estudiado mejoras en el diseño de caras de sello con un mapeo en cientos de miles de segmentos de las caras y evaluación de su comportamiento frente a posibles distorsiones durante su trabajo. Así se han diseñado caras angostas que permanecen planas durante las distorsiones de presión y temperatura, minimizan la generación de calor y reducen las emisiones fugitivas al medioambiente (Chesterton Global Training 2007b).

Para reducir los errores durante la instalación de un sello mecánico se han diseñado sellos mecánicos encartuchados, son sellos pre ensamblados sobre una bocina que aseguran la posición perpendicular de las caras respecto al eje para reducir fallas por mala instalación del sello. Contiene además prisioneros que ajustan y centran la bocina del sello al eje de la bomba. Incluye además una brida con los puertos necesarios para la instalación, en caso se necesite algún plan API auxiliares para brindar un mejor ambiente de trabajo al sello mecánico (Chesterton Global Training 2007b).

Los sellos mecánicos son la primera opción cuando se necesita sellar equipos rotativos con fluidos limpios y buenos lubricantes, sin embargo, cuando se presentan fluidos contaminantes, agresivos y abrasivos representa un gran reto el utilizarlos.

- **Planes API de control ambiental**

Para ayudar a darle un ambiente favorable al funcionamiento de sellos mecánicos en estas aplicaciones se utilizan los planes auxiliares API que brindan mejores ambientes de trabajo refrigerando las caras de los sellos, eliminando partículas abrasivas que puedan dañar las caras y mejorando las características de lubricidad entre sus caras.

- **Bujes de restricción**

Para controlar el ingreso de contaminantes a la caja de sellado donde se encuentra el sello mecánico se pueden utilizar también bujes instalados en el fondo de la caja hacia el lado del impulsor que restrinjan el ingreso de los contaminantes del fluido en la caja de sellado y así controlar el ambiente donde funciona el sello mecánico.

Muchos fabricantes de bombas entienden que el diseño de la caja de sellado en la bomba hace la diferencia en el desempeño de los equipos. Los diseños varían si se utiliza sellos mecánicos o empaquetaduras. Las cajas estoperas son diseñadas para minimizar el espacio entre el eje y sus paredes para que los empaques calcen justos y sean más efectivos para restringir el paso del fluido y controlar la fuga. Cuando se trata de sellos mecánicos ambientes estrechos no ayudaran a refrigerar y mantener limpia la caja de sellado (Chesterton, 2006b).

Los sólidos contenidos en el fluido generan turbulencia cuando gira el eje de la bomba y se acumulan tanto entre las caras del sello como en la parte posterior lo que puede ocasionar desgaste prematuro de las caras y/o obstrucción de los resortes y otras partes del sello. También puede quedar aire atrapado en una caja sin venteo y con el giro del eje el fluido se desplazará hacia las paredes de la caja y el aire quedará entre las partes del sello que puede fallar por falta de lubricidad. Para solucionar estos problemas los fabricantes de bombas diseñaron un fondo de caja abierto para remover todos los sólidos por la fuerza centrífuga generada al girar el eje. Lamentablemente en la práctica los sólidos se acumulan justo en la zona de mayor daño para los sellos mecánicos (Chesterton, 2006b).

Para lograr un ambiente favorable para el funcionamiento de los sellos mecánicos se diseñaron bujes restrictivos que forman una barrera entre el sello mecánico en la caja de sellado y el fluido transportado por la bomba hacia el lado del impulsor. Se instalan en el fondo de la caja para aislar la caja de sellado y dependiendo del diseño del buje es necesario utilizar un plan ambiental API 32 para ayudar a limpiar y evitar el ingreso de partículas contaminantes suspendidas en la caja de sellado (Chesterton, 2011b).

Se pueden utilizar también bujes con helicoides maquinados en su diámetro interior en sentido contrario a la rotación del eje, aprovechando la fuerza centrífuga generada expulsara todos los contaminantes fuera de la caja de sellado (Chesterton, 2006b).

4.9.1 PROPUESTA DE SELLADO PARA CADA APLICACIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES MÍNIMAS PARA SU INSTALACIÓN

a. SISTEMA DE SELLADO 1: BOMBAS DE DIFUSOR

Las bombas de circulación instaladas en el difusor eran de fabricación nacional y con muchos años de uso. La mayoría de ellas habían perdido medidas originales; utilizaban bocinas de bronce en la zona del empaquetado que servía como material de sacrificio ante el desgaste producido por el ajuste de los anillos de empaquetadura.

Las bombas se instalaban sobre una plataforma en voladizo y estaban acopladas directamente al difusor, no existía ninguna distancia entre ambos equipos. No existía tampoco válvulas de aislamiento y/o drenaje. No se realizaba un alineamiento preciso de la bomba que asegure su funcionamiento sin vibración ni cargas adicionales por falta de alineación entre motor, bomba, tuberías y base de la bomba.

Estas condiciones favorecían la vibración del equipo y aumentaban el riesgo de cavitación y/o recirculación. Las bombas fuera de medidas estándar hacían difícil el control de fugas y las bocinas de bronce por ser de material dúctil se desgastaban rápidamente y requerían ajustes frecuentes en los empaques, pero sin controlar efectivamente las fugas.

Se dieron las siguientes recomendaciones dentro de la propuesta de mejora en la eficiencia del sellado y condiciones de instalación:

- Instalar las bombas en base de concreto en el piso.
- Cambiar las bocinas de bronce por bocinas de acero inoxidable.
- Verificar las medidas de la caja prensaestopas según planos.
- Realizar el alineamiento laser del equipo y verificar que no existan cargas adicionales por des alineamiento de tuberías.
- Instalar un sello mecánico que ayude a controlar la fugas.

Se verificaron dichas recomendaciones y se llegó a la conclusión que con las bombas antiguas existentes no sería posible dar las condiciones adecuadas para la instalación de un sello mecánico que elimine las fugas por lo que decidieron comprar bombas nuevas y realizar un piloto para la evaluación de la mejora en el sistema de sellado.

Seleccionaron la bomba GOULDS 3196 S con arreglo para uso de empaquetaduras como sistema de sellado. Esta bomba según las curvas características cumplía con los valores de caudal y altura necesarios para la circulación de jugo a través del difusor.

La bomba se instaló sobre una base de cemento en el piso del área, no fue posible la instalación de la válvula de drenaje, pero se decidió continuar con el piloto.

Ya que el principio de sellado con empaquetaduras requiere un goteo constante y dada la disposición de las bombas en la zona de extracción; recolectar las fugas producidas por los empaques suponía realizar modificaciones a toda el área e instalar equipos de bombeo adicionales que pudieran recolectar y transportar las pérdidas nuevamente al difusor.

Adicionalmente las fugas estaban expuestas a inversión de la sacarosa y fermentación de los azúcares lo que dificultaba su recolección. Realizar las modificaciones necesarias significaba mayor inversión y mayor cantidad de equipos a los que se debían realizar mantenimiento lo que generaba mayores tareas y mayor gasto.

Si bien generalmente se utilizan sellos mecánicos dobles para aplicaciones con fluidos viscosos o con alto contenido de sólidos como es el caso del jugo crudo, se realizó una

propuesta innovadora con la finalidad de reducir el costo de instalación y lograr un mejor desempeño en el sellado de las bombas que los obtenidos con las empaquetaduras utilizadas.

Debido a las características del fluido y la dificultad de lubricación, para el uso de sellos mecánicos en la industria azucarera fue necesario utilizar planes auxiliares de lubricación denominados Planes API de control ambiental para sellos mecánicos (Chesterton Global Training, 2007b) y están diseñados en base a la norma ASME API 682.

- **Selección de sello mecánico**

En la Tabla 9 se realiza un comparativo de las características de los sistemas de sellado disponibles y las ventajas de cada propuesta de sellado.

Tabla 9: Comparativo entre empaques y sello mecánico

Características	Empaquetadura	Sello mecánico
Fuga	Controlada	Imperceptible
Flujo	10 gotas/pulg diámetro	< 500 ppm
Instalación	Sencilla	Laboriosa
Costo inicial	Bajo	Alto
Costo mantenimiento	Alto	Bajo
Duración	> 6 meses dependiendo de aplicación	< 1 año
Controles	Ajustes frecuentes	Inspección visual
Planes ambientales	Debe trabajar con Plan 32	Puede trabajar con todos los planes API
Consumo de agua	Alto	Controlado
Consumo de energía	Alto	Bajo
Materiales de sellado	Fibras sintéticas lubricantes	acero inox, carbón, carburo silicio, tungsteno resortes
Soporta desalineamiento	Si	No
Desgasta partes de bomba	Si	No
Observaciones	Se puede instalar en equipos en mal estado	Requiere precisión para instalación

Para esta aplicación se recomendó la instalación de un sello mecánico simple balanceado y encartuchado con resortes protegidos Chesterton 150 SC/SC/FKM (AW Chesterton, 2011a) en lugar de los empaques Pilot pack 5025 utilizados en las bombas.

- **Descripción del Sello Mecánico Propuesto**

El sello mecánico Chesterton 150 SSC/SSC/AFLAS es un sello encartuchado preensamblado listo para ser instalado en el espacio de la caja prensaestopas de la bomba de circulación convencional. Tanto las caras rotativas como las estacionarias son fabricadas en carburo de silicio sinterizado, material resistente a la abrasión y el ataque químico; los elastómeros de AFLAS resisten altas temperaturas y pH ácidos. Este modelo garantiza la hermeticidad que la bomba necesita para eliminar las fugas de jugo en circulación. En el Anexo 3 se muestra la hoja técnica del sello mecánico donde se indican los parámetros de funcionamiento y materiales.

El sello mecánico estilo 150, viene con una brida en acero inoxidable, la cual cuenta con una conexión para circulación/lavado (*flush*). Todas estas conexiones tienen medidas estándar para ser instalados fácilmente incluso en bombas donde anteriormente utilizaban prensaestopas. Puede ser instalado en bombas donde anteriormente han trabajado prensaestopas sin requerir mayores modificaciones o adaptaciones. Entre las principales características:

- Sello balanceado 75/25 que compensa las fuerzas ejercidas en las caras del sello.
- Diseño de caras optimizado que asegura la planitud de las caras. Diseñado con el método de análisis de elementos finitos elimina las distorsiones en las caras.
- Diseño de resortes protegidos sin contacto con el fluido. Los resortes instalados en la parte rotativa del sello mecánico, están protegidos mediante *o' rings* para evitar su contacto con el fluido. Así se evita la posible obstrucción del resorte por los sólidos presentes en el jugo crudo.
- Elastómeros no producen *fretting* en el eje de la bomba. El *o'ring* dinámico está instalado en un canal sobre una pieza metálica por lo que no se desplaza en el eje de la bocina. El eventual desgaste es producido en la parte posterior de la cara rotativa de recambio y es fácilmente reparable.
- Clips de centrado bi-direccionales que ajustan automáticamente la posición del sello y las caras de éste, dándole a los resortes la compresión necesaria, durante la instalación, para un correcto funcionamiento.
- Amplio canal de refrigeración que permite brindar un ambiente favorable al sello mecánico durante su funcionamiento. La temperatura controlada reduce las

dilataciones y/o contracciones de la canastilla que contiene a la cara rotativa, esto se complementa con el diseño de cara que minimiza las distorsiones.

- Sistema de Auto centrado de Bocina, sistema patentado que permite mantener la concentricidad entre la bocina del sello mecánico y el eje de la bomba en todos los puntos de apoyo, asegurando así la perpendicularidad entre el eje y las caras del sello mecánico. Minimiza la posibilidad de una apertura de las caras del sello durante su funcionamiento (Chesterton, 2006d).

El jugo crudo en el difusor contenía 12°Brix y gran cantidad de bagacillo por lo que se recomendó además utilizar un buje de restricción Chesterton 14K (AW Chesterton, 2011b) para controlar el ingreso de contaminantes a la caja de sellado y evitar que el sello mecánico se contamine y falle. .

- **Descripción del Buje Restrictivo Propuesto**

Los bujes restrictivos se colocan en el fondo de la caja de sellado para restringir el ingreso de los contaminantes presentes en el fluido bombeado desde la zona del impulsor hacia el área donde se encuentra el sello mecánico instalado. Al restringirse el paso del fluido y sus contaminantes se restringe también la cantidad de fluido lubricante disponible para el sello mecánico lo que puede generar aumento de la temperatura en el sello y deficiencias en la lubricación de las caras, además los contaminantes pueden incluso obstruir el ingreso de fluido a la caja de sellado.

Para asegurar un flujo de lubricante que mantenga el área de la caja de sellado limpia y fría es necesario utilizar un plan ambiental de refrigeración que asegure el ingreso de un flujo constante a la cámara de sellado y le brinde al sello mecánico un ambiente adecuado para su funcionamiento; cuanto mayor sea el flujo mejores condiciones tendrá el sello mecánico (Merullo y Toal, 2013).

Basándose en el principio de Bernoulli y en el principio de conservación de energía al reducir o restringir el área de paso del agua de refrigeración de la cámara de sellado hacia el lado del impulsor de la bomba se reduce la presión, pero se aumenta la velocidad lo que mejora el flujo y hace que se mantenga limpia la caja de sellado con un reducido consumo de agua

de *flushing* o refrigeración. Así se reduce el consumo e ingreso de agua al sistema de bombeo en el difusor (Merullo y Toal, 2013).

El buje de restricción Chesterton 14K recomendado se fabrica en un elastómero especial de poliuretano termo endurecido que soporta altas temperaturas, tiene excelente resistencia al desgaste y superior resistencia a la extrusión a alta presión. Se fabrica con un proceso de maquinado y tiene un diseño bipartido que facilita su instalación. Este sello tiene un diseño de reborde afinado que se adapta a las excentricidades que pueda presentar la caja de sellado y minimiza la separación anular formada alrededor del eje de la bomba, de esta manera se crea el área de flujo más pequeño posible que ayuda a controlar los caudales de ingreso de agua al sistema de bombeo (Chesterton, 2011b). En el Anexo 4 se encuentra la hoja técnica de este buje recomendado.

El buje al ser fabricado en material flexible soporta mejor las partículas contaminantes y evita el taponamiento en el fondo de la caja de sellado. El flujo de agua que ingresa de la caja de sellado hacia la bomba y el impulsor ayuda a remover las suciedades y permite mantener un ambiente limpio para el sello mecánico con un mínimo ingreso de agua al sistema (Merullo y Toal, 2013).

Un buje de acero u otro material rígido no brindaba la flexibilidad necesaria en el fondo de caja que permita el paso del agua y remover las partículas contaminantes presentes.

Un buje restrictivo del tipo spiral trac con surcos helicoidales en su diámetro interior que sirven para expulsar contaminantes podrían obstruirse por saturación de la sacarosa acumulada entre esos espacios muy finos cuando los equipos paren para mantenimiento o diversas razones. Estos bujes se podrían utilizar siempre y cuando se realice el lavado del equipo apenas pare su funcionamiento, lo que lo hace una opción poco viable.

- **Selección de Plan ambiental**

Se recomendó además implementar el sistema auxiliar Plan API 32 llamado *flushing* (Chesterton Global Training, 2007b) como soporte para el funcionamiento del sello mecánico con el buje restrictivo 14K.

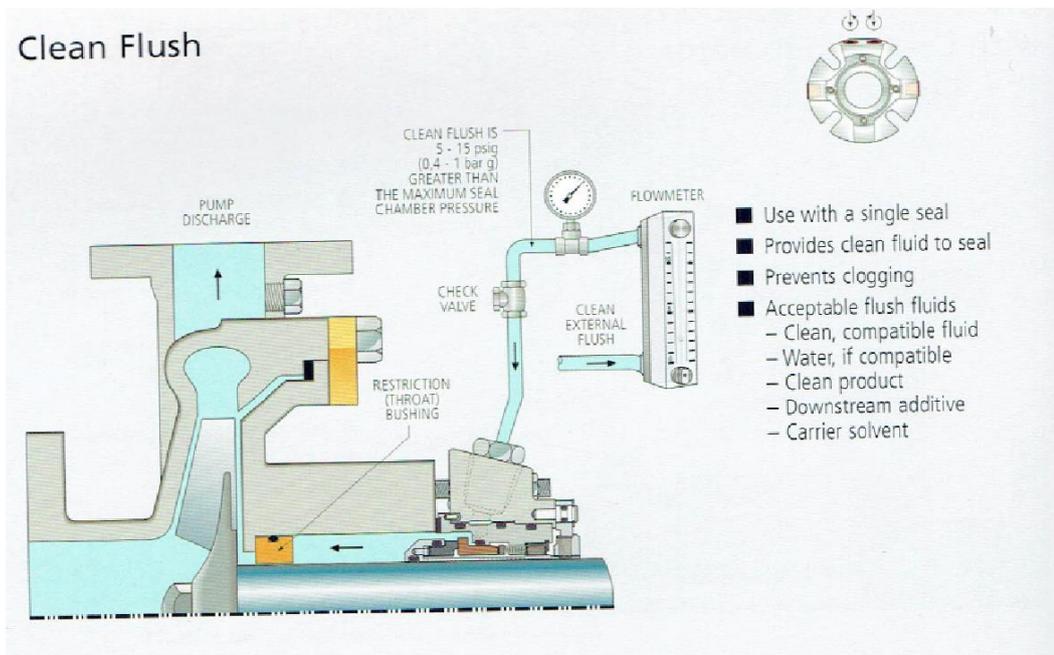


Figura 20: Esquema del plan API 32

FUENTE: Chesterton Global Training (2007b)

En la Figura 20 se representa el esquema de instalación de este plan que consiste en utilizar una fuente externa de líquido limpio inyectado a presión en la caja de sellado para garantizar la lubricación y limpieza entre las caras del sello mecánico.

Ya que no era posible ingresar agua adicional al difusor porque alteraba el balance de materia se recomendó utilizar parte del agua de imbibición incluida en el balance para la implementación del plan API 32. En la tubería de ingreso de agua al difusor ubicada en la parte superior del equipo se adicionó una línea de salida de agua después del manómetro de control de ingreso de agua al difusor, se llevó la línea con una manguera de ¼" hasta la brida del sello mecánico ubicado en la parte inferior del difusor en la bomba de circulación intervenida y se conectó al ingreso de *flushing* del sello mecánico. La presión de ingreso de agua a través del puerto de *flushing* debe ser por lo menos 01 bar mayor que la presión en la caja de sellado para que el buje restrictivo trabaje correctamente (Merullo y Toal, 2013).

Para el cálculo de la presión en la caja se utiliza la siguiente formula:

$$P_{sc} = P_s + 0,25 (P_d - P_s) \quad (09)$$

$$P_{sc} = 1 \text{ bar} + 0.25 (3 \text{ bar} - 1 \text{ bar})$$

$$P_{sc} = 1.5 \text{ bar}$$

La línea de agua de imbibición tenía una presión de 70 psi o 4.7 bar que era suficiente para su uso con el buje Chesterton 14K.

El agua ingresada en esta zona sirvió para limpiar y lubricar el sello mecánico. El buje restrictivo además redujo la cantidad de agua necesaria para este sistema auxiliar.

b. SISTEMA DE SELLADO 2: BOMBAS DE JUGO CLARIFICADO

Conforme se avanzaba en el proceso de obtención de sacarosa en fabrica las pérdidas de fluido por mal funcionamiento de los sistemas de sellado eran más costosas debido a que el azúcar se encontraba más concentrada y los esfuerzos por controlarlas eran mayores. Dentro de planta la mayoría de bombas utilizaban sellos mecánicos y las pérdidas de material eran recolectadas y reprocesadas.

Sin embargo, se pudo observar que, si bien los sellos mecánicos nuevos tenían un tiempo de vida aceptable, las reparaciones realizadas a los sellos con el kit de reparación luego de la primera falla, no lograban superar los 06 meses de funcionamiento.

Por ello se recomendó la instalación de sellos mecánicos más confiables que permitan prolongar el tiempo de vida útil y sus reparaciones sean tan confiables como un sello nuevo.

• Selección del sello mecánico

Para esta aplicación debido, a que el jugo tenía una concentración de 65 °Brix, no era posible utilizar un sello mecánico simple y menos aún ingresar agua al sistema ya que en esta parte del proceso de evaporación el objetivo era eliminar el agua del jugo o jarabe.

Se recomendó la instalación de un sello mecánico doble balanceado y encartuchado con resortes protegidos Chesterton 250 SC/SC/SC/CB (AW Chesterton, 2011b) es un sello encartuchado pre ensamblado listo para ser instalado en el espacio de la caja prensaestopas de la bomba de clarificación. Tanto las caras rotativas como las estacionarias del sello interior, en contacto con el fluido, son fabricadas en carburo de silicio sinterizado y los

elastómeros de AFLAS resisten altas temperaturas y pH ácidos. La cara rotativa del sello exterior está fabricada también en carburo de silicio sinterizado y la cara estacionaria en carbón. Este modelo garantiza la hermeticidad que la bomba necesita para eliminar las fugas de jugo en circulación. En el Anexo 5 se muestra la hoja técnica del sello mecánico donde se indican los parámetros de funcionamiento y materiales.

El sello mecánico estilo 250, viene con una brida en acero inoxidable, la cual cuenta con todas las conexiones necesarias para la instalación de los planes ambientales necesarios para su funcionamiento. Todas estas conexiones tienen medidas estándar para ser instalados fácilmente incluso en bombas donde anteriormente utilizaban prensaestopas.

Entre las principales características:

- Sello doblemente que compensa las fuerzas ejercidas en las caras del sello y que permite trabajar tanto aplicaciones con presiones positivas como aplicaciones de vacío.
- Diseño de caras optimizado que asegura la planitud de las caras. Diseñado con el método de análisis de elementos finitos elimina las distorsiones en las caras.
- Diseño de resortes protegidos sin contacto con el fluido. Los resortes instalados en la parte rotativa del sello mecánico, están protegidos mediante *o' rings* o elastómeros para evitar su contacto con el fluido. Así se evita la posible obstrucción del resorte por los sólidos presentes en el jugo crudo.
- Elastómeros no producen *fretting* en el eje de la bomba. El *o'ring* dinámico está instalado en un canal sobre una pieza metálica por lo que no se desplaza en el eje de la bocina. El eventual desgaste es producido en la parte posterior de la cara rotativa de recambio y es fácilmente reparable.
- Clips de centrado bi-direccionales que ajustan automáticamente la posición del sello y las caras de éste, dándole a los resortes la compresión necesaria, durante la instalación, para un correcto funcionamiento.
- Amplio canal de refrigeración que permite brindar un ambiente favorable al sello mecánico durante su funcionamiento. La temperatura controlada reduce las dilataciones y/o contracciones de la canastilla que contiene a la cara rotativa, esto se complementa con el diseño de cara que minimiza las distorsiones.
- Sistema de Auto centrado de Bocina, sistema patentado que permite mantener la

concentricidad entre la bocina del sello mecánico y el eje de la bomba en todos los puntos de apoyo, asegurando así la perpendicularidad entre el eje y las caras del sello mecánico. Minimiza la posibilidad de una apertura de las caras del sello durante su funcionamiento.

Se elaboró un cuadro comparativo de las características técnicas entre el sello utilizado y la propuesta recomendada que se muestra en la Tabla 10, entre las principales diferencias se puede observar los *o' rings* dinámicos que producen desgaste en la bocina del sello mecánico.

El kit de reparación de un sello mecánico está compuesto por las partes que con el uso tienen desgaste: caras, resortes y elastómeros. La bocina del sello mecánico no se considera como pieza de recambio en un kit e reparación. La bocina desgastada por el *o'ring* dinámico permite el ingreso de contaminantes en el espacio desgastado, lo que provoca mayor desgaste y contaminación de los resortes, esta situación acelera el deterioro del sello mecánico y reduce su tiempo de vida. Además, un canal de refrigeración estrecho no permite una adecuada lubricación y enfriamiento de las caras.

- **Selección del plan auxiliar**

En esta aplicación el fluido contenía 65 °Brix con las siguientes características: cristalizante, abrasivo, adhesivo, alta temperatura (mayores a 70°C) por lo que para la lubricación y refrigeración de las caras del sello se recomendó utilizar el Plan API 53A (Chesterton Global Training, 2007).

Tabla 10: Comparativo de sello mecánicos

Características	Sello utilizado	Sello propuesto
Encartuchado	Si	Si
Sello Balanceado	Si	Doble balanceo
Diseño de caras	Optimizada	Optimizada
O'ring dinámico	Si	No
Resortes	Desgasta bocina de sello rotativos aislados	No hay desgaste de piezas rotativos aislados
Canal de refrigeración	estrecho	amplio

<<continuación>>

Puerto para fluido barrera	Si	Si
Puerto Quench & Drain	No	Si
Clip de centrado	Unidireccional	Bidireccional
Auto centrado de bocina	No	SI

Este plan esta graficado en la Figura 21 y consiste en circular un fluido limpio a presión entre las caras de sello y un tanque auxiliar (AW Chesterton, 2011a); se utilizó agua blanda como fluido auxiliar.

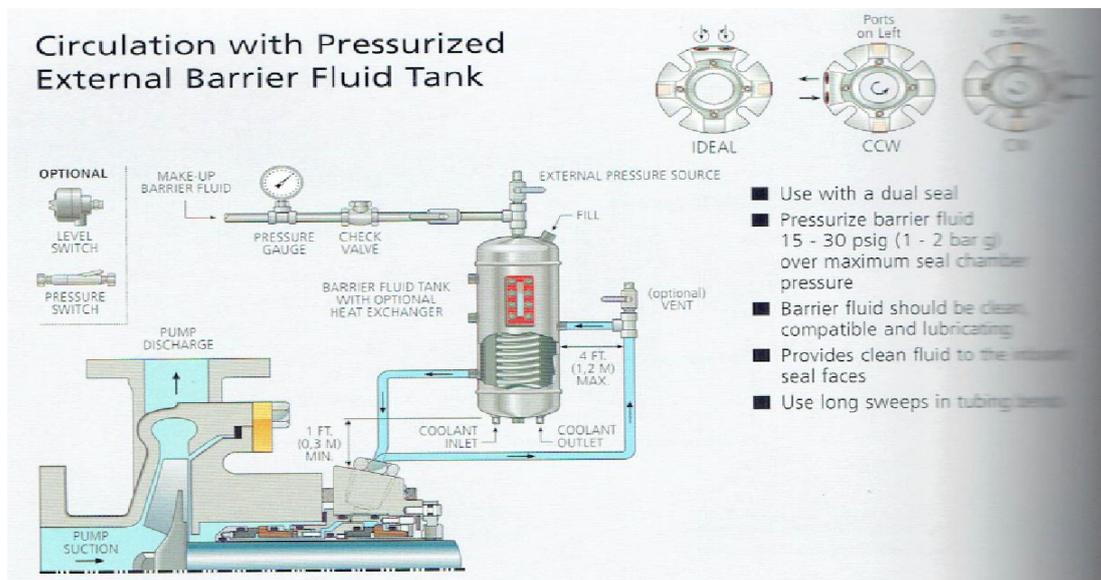


Figura 21: Esquema del plan ambiental API 53A

FUENTE: Chesterton Global Training (2007)

En el Anexo 6 se muestra la hoja de instalación del tanque auxiliar de fluido de barrera que incluye las indicaciones de distancia y pendientes que deben tener las tuberías para asegurar la correcta recirculación del fluido de barrera en el circuito cerrado tanque – sello mecánico – tanque y representa el esquema típico de instalación.

Dado que en el diseño y distribución de muchos equipos en el ingenio azucarero se consideraba tener 02 bombas para cada aplicación (una en funcionamiento y otra en stand by) para maximizar el equilibrio técnico – económico se recomendó instalar un tanque por cada par de bombas similares, con 02 líneas independientes de ingreso y salida del tanque hacia el sello mecánico, las cuales necesariamente deberían trabajar de manera alternada con

el tanque de fluido de barrera. El tanque de fluido de barrera solo trabajó con una bomba a la vez.

Con el objetivo de tener un comparativo del desempeño del sello mecánico propuesto respecto al que utilizaban en ese momento se decidió instalar el sistema de sellado propuesto en una bomba y el sistema de sellado usualmente utilizado en la bomba de stand by; de esa forma ambos sellos trabajaron bajo las mismas condiciones operativas para una mejor comparación de los resultados.

En la Figura 22 se aprecia la disposición de las tuberías en el arreglo dispuesto para trabajar con bombas de condiciones y aplicaciones similares. Fue importante mantener cerradas las llaves de paso de las tuberías conectadas a la bomba parada. Cuando se realizaba el cambio de bomba de trabajo la apertura y cierre de las válvulas de paso se realizó con ambas bombas apagadas.

Para el cálculo de la presurización del tanque se utilizó la siguiente formula:

$$P_{sc} = P_s + 0,25 (P_d - P_s) \quad (09)$$

$$P_{sc} = 2 \text{ bar} + 0.25 (5 \text{ bar} - 2 \text{ bar})$$

$$P_{sc} = 1.5 \text{ bar}$$

Considerando que la presión de succión es de 2 bar y la presión de descarga es de 5 bar se calculó la presión de la caja de sellado de 2,75 bar.

El tanque auxiliar de fluido de barrera debía presurizarse a 4,25 bar o 64psi. Las líneas de aire en planta tenían una presión de 70 – 80 psi por lo que se cubría el requerimiento de presión para la aplicación.



Figura 22: Tanque auxiliar - instalación con 2 bombas

c. CONDICIONES MÍNIMAS PARA INSTALACIÓN DE LOS SELLOS MECÁNICOS

Se establecieron las siguientes condiciones mecánicas y operativas mínimas necesarias en los equipos de bombeo para asegurar su correcto funcionamiento y evitar fallas en el sello mecánico por (01) mala instalación del sello mecánico o (02) mala operación del equipo que podía ocasionar una falla temprana en el sello mecánico (AW Chesterton, 2006c).

- **Condiciones Mecánicas del Equipo**

- La bomba debía trabajar dentro de una campana de operación de $\pm 20\%$ del punto de máxima eficiencia, zona en la cual las flexiones sobre el eje por esfuerzos radiales son aceptables para instalar un sello mecánico y se evitan problemas de cavitación y/o recirculación en las bombas que pueden dañar los sellos mecánicos.

- El diámetro del eje o bocina de la bomba debía estar dentro de una tolerancia no mayor de +/- 0.05mm (0.002 de pulgada) del diámetro nominal.
 - Se debía medir la excentricidad del eje de la bomba con un indicador de cuadrante en el sitio donde iba a ser instalado el sello, instalada sobre su base y alineada mediante laser. La excentricidad no debía exceder de 0.001mm TIR (lectura total del indicador) por milímetro de diámetro del eje (0.001 de pulgada TIR por pulgada del diámetro de eje).
 - El juego Longitudinal de la bomba no debía pasar de 0.13 mm (0.005 de pulgada) de TIR.
 - El des alineamiento de la caja de sellado en relación con el eje de la bomba no debía exceder de 0.005mm de TIR por cada milímetro del diámetro del eje (0.005 de pulgada de TIR por pulgada de diámetro de eje).
 - Debía existir perfecta perpendicularidad del eje con respecto al caja de la bomba, de lo contrario se generaban esfuerzos mecánicos en el sello que fatigarían los componentes y podía provocar una falla temprana del sello.
- **Condiciones de la operación del equipo**
 - La bomba debía ser operada/manipulada por personal capacitado y con pleno conocimiento de su correcta operación y mantenimiento.
 - El fluido de barrera debía ser puesto en operación antes de su puesta en servicio y detenido luego de ser sacado de servicio el equipo.
 - Se debía informar de cualquier anomalía en el equipo y/o sello mecánico. Si el equipo sufriera alguna avería y se tuviese que desarmar de urgencia, se debían tomar las fotografías que certifiquen el proceso de desarmado y en especial los daños ocurridos.

Hubo una permanente presencia técnica en el momento de instalar los sellos mecánicos y seguimiento constante de su desempeño, se dictaron charlas de capacitación para mantener al personal entrenado en la operación de los planes ambientales de los sellos instalados y asegurar el correcto suministro de agua de lubricación a los sellos mecánicos.

4.9.2 EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD Y DURACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SELLADO PROPUESTOS

Para asegurar la efectividad de las propuestas de sellado era necesario atender las tres causas de falla en sellos mecánicos:

- Mala recomendación de sellos mecánicos y plan ambiental adecuado
- Mala instalación de sellos mecánicos y
- Mala operación de sellos mecánicos

Por lo que una vez realizada la propuesta de los sistemas de sellado se tomó especial interés en asegurar las condiciones mecánicas mínimas para la instalación de los sellos mecánicos y sus planes auxiliares.

Fue necesario confirmar las medidas de los alojamientos de las bombas y verificar el alineamiento y excentricidades en la bomba antes de proceder con la instalación de los sellos mecánicos.

En los Anexo 7 y Anexo 8 se detallan las instrucciones para la instalación de los sellos mecánicos y las tolerancias máximas permitidas en los alojamientos, esta información se compartió con los mecánicos para asegurar la correcta operación de la bomba y la manipulación de los sellos mecánicos de ser necesario.

a. SISTEMA DE SELLADO 1: BOMBAS DE CIRCULACIÓN EN EL DIFUSOR

El sistema de sellado 01: Sello mecánico 150 + buje 14K propuesto para la bomba de circulación en el difusor trabajó correctamente sin pérdidas de jugo crudo y supero los 12

meses de evaluación que se acordó al inicio del proyecto. No se registró ninguna intervención en la bomba durante todo el periodo de evaluación.

Se llevó un registro fotográfico de la evolución del desempeño del sello mecánico instalado. En estos registros se puede comprobar que se eliminó la fuga de jugo crudo en la zona del difusor. El registro fotográfico se encuentra en el Anexo 9.

b. SISTEMA DE SELLADO 2: BOMBAS DE JUGO CLARIFICADO

El sistema de sellado 02: sello mecánico 250 + tanque auxiliar propuesto para las bombas de jugo clarificado en el área de evaporación trabajó correctamente sin pérdidas de jugo crudo y supero los 12 meses de evaluación que se acordó al inicio del proyecto. No se registró ninguna intervención en la bomba durante todo el periodo de evaluación.

En paralelo se realizó el seguimiento de la duración del sello mecánico normalmente instalado en esas bombas y se confirmaron los tiempos de vida que habían sido referidos al inicio del proyecto.

Se llevó un registro fotográfico de la evolución del desempeño de ambos sellos mecánicos instalados. En estos registros se puede comprobar la efectividad del sellado y el tiempo de duración de cada propuesta de sellado. El registro fotográfico se encuentra en el Anexo 10.

Ya que ambas bombas superaron los 12 meses de funcionamiento sin fugas de material se decidió extender la evaluación y seguimiento de los sistemas de sellado hasta determinar su tiempo de vida útil.

El sistema de sellado 1: bombas de circulación en el difusor trabajó 20 meses de manera constante sin interrupciones y no presentó fuga de material. En el mes 21 se observó ligera caramelización alrededor del anillo de arrastre del sello mecánico lo que indicaba desgaste de las caras del sello mecánico y el inicio de fuga de fluido hacia el exterior. El tiempo de vida útil del sistema de sellado quedo registrado en 21 meses (1 año y 9 meses).

Si comparamos la duración del sistema de sellado propuesto con respecto al sistema de sellado anterior tendremos una duración 10 veces mayor y la eliminación de las fugas en la zona del difusor.

Se recomendó programar mantenimiento para la reparación de sello mecánico antes que sufra daño irreparable.

En el Anexo 11 se puede apreciar el seguimiento al desempeño de este sistema de sellado. El inconveniente más frecuente era el taponamiento de la tubería de acceso de agua de *flushing* por contaminación con bagacillo. Esto se debía a que cuando se realizaban mantenimiento al difusor las tuberías y mangueras se desconectaban y se contaminaban con el bagacillo del ambiente.

El Sistema de sellado 2: bomba de jugo clarificado trabajó 26 meses sin interrupciones y sin presentar fugas de material. Se confirmó la eficiencia del sistema de sellado respecto a los sistemas anteriormente utilizados. El tiempo de vida útil quedó registrado en 26 meses (02 años y 02 meses). Se recomendó programar el mantenimiento para la reparación del sello mecánico con un primer kit de reparación.

El sello mecánico anteriormente utilizado tenía una duración total de 20 meses que incluía dos reparaciones del sello mecánico (kit de reparación) Al cabo de ese período era necesario cambiar el sello mecánico por uno nuevo.

Si consideramos la vida útil total, incluyendo 02 reparaciones, del sello mecánico propuesto para esta aplicación su tiempo de duración sería de 06 años y 06 meses. Si lo comparamos con el tiempo de duración del sello mecánico anteriormente utilizado tendrá una duración 3.9 veces mayor.

En el Anexo 12 se puede observar el seguimiento al desempeño de este sistema de sellado. Debido a la inestabilidad de las líneas de aire en la planta algunas veces el tanque quedaba sin presurizar por lo que el plan ambiental API 53A no funcionaba correctamente. Cuando la baja de presión sucedía con la bomba en funcionamiento se producía una contrapresión que desplazaba producto hacia el tanque. Ya que las líneas de aire no aseguraban el

suministro continuo de aire a la presión requerida se decidió trabajar con el plan API 52 que consiste en trabajar con el circuito tanque – sello – tanque, pero con agua sin presurizar. El agua circulante limpia las caras del sello en su diámetro exterior y se cumplía con el objetivo de mantener las caras limpias y el sello mecánico operativo.

En la Figura 23 se muestra el arreglo del Plan Api 52 indicando la presión mínima de 10 psi para asegurar la recirculación en el circuito cerrado.

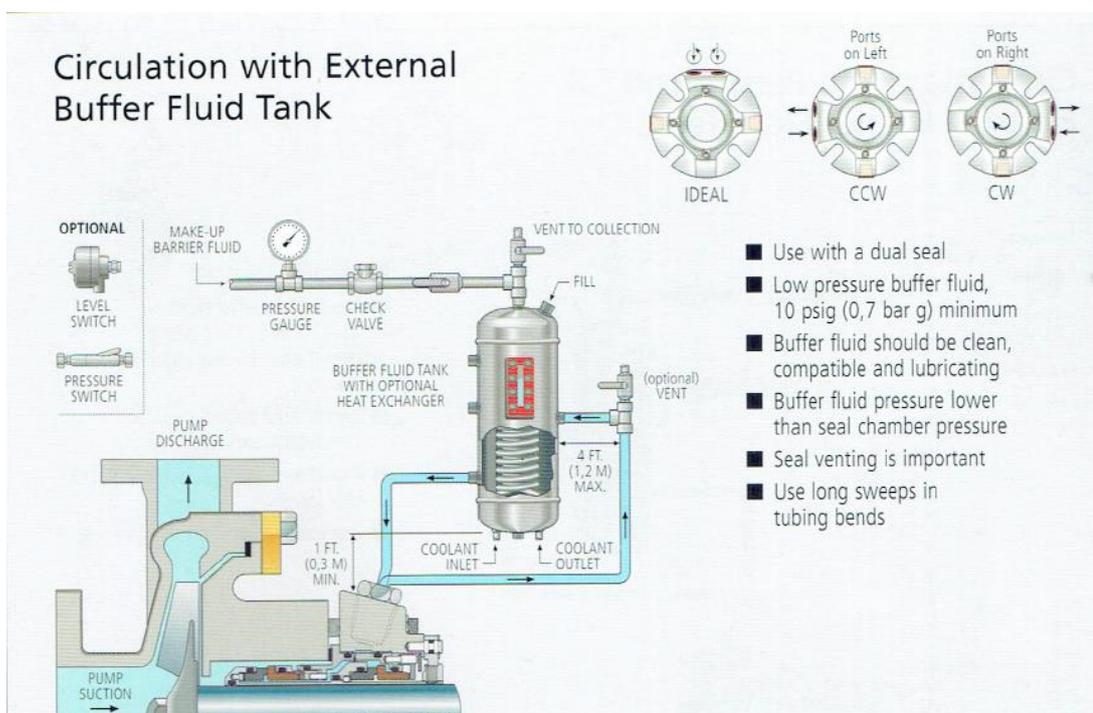


Figura 23: Esquema del plan ambiental API 52

FUENTE: Chesterton Global Training (2007)

4.10. AUMENTO DE LOS VOLUMENES DE EXTRACCION DE JUGO EN EL DIFUSOR Y DE AZUCAR CRUDO PRODUCIDO

La efectividad de los sistemas de sellado propuestos eliminó las fugas de jugo tanto en la zona del difusor en el área de extracción como en la zona de clarificación en el área de elaboración.

Para el caso de las bombas de jugo clarificado no significaba un aumento en las cantidades de jugo procesado dado que las fugas se ingresaban como reproceso.

Sin embargo, en el caso de las bombas del difusor al eliminar las fugas de jugo crudo se lograba un aumento en los volúmenes de jugo enviado a fabrica y procesado.

Este aumento suponía un mayor volumen de jugo procesado y una mayor cantidad de azúcar obtenida.

Del estudio realizado sobre las fugas de jugo crudo se estimó que el volumen de fugas en el difusor era de 839 080,30 L jugo crudo/año en el total de las 17 bombas.

Esto equivalía a 868,87 Tn jugo crudo al año. Por lo tanto, el volumen de jugo extraído aumentaría a 2 467 664.87 toneladas de jugo crudo anuales.

Del cálculo del rendimiento de jugo crudo se tenía:

$$\text{Rendimiento de jugo crudo} = 0,11 \text{ Tn azúcar/ Tn jugo crudo}$$

Por lo que se estimó que las fugas de jugo crudo en el área del difusor representaban un aumento de 95,58 Tn azúcar rubia al año.

Con este aumento en la producción de azúcar se obtendrían 269 156,58 toneladas de azúcar producidas anualmente.

Estos valores representan una mejora en los porcentajes de Recobrado Total o Recobrado crudo fábrica. Este indicador es bastante utilizado en la industria azucarera para medir la eficiencia del proceso productivo en los ingenios azucareros.

Así se tiene que de la Ecuación (08):

$$\% \text{ Recuperabilidad} = \frac{\text{Tn Azúcar} \quad \text{ado}}{\text{Tn Sacarosa en caña}} \times 100 \quad (08)$$

Despejamos el valor de toneladas de sacarosa en caña que va a permanecer constante y se obtiene que en el total de caña procesada anualmente contiene 321 766,32 toneladas de sacarosa.

Considerando:

Azúcar producido: 269 156,58 Tn de azúcar crudo

Se obtiene que el nuevo porcentaje de Recobrado crudo fabrica seria de 83,65%.

Este valor es superior en 0.03% al porcentaje promedio anual reportado y significa una mejora en la eficiencia del proceso ya que con la misma cantidad de caña de azúcar procesada se están obteniendo mayores cantidades de azúcar producidos.

Con estas propuestas de sistemas de sellado se logró además un desempeño más eficiente de los equipos de bombeo al extender sus ciclos o tiempo de vida, se redujeron los costos de mantenimiento y la compra de repuesto y al mismo tiempo que se propiciaba un ambiente más limpio y seguro en planta.

4.11. RETORNO DE LA INVERSIÓN DE LOS SISTEMAS DE SELLADO PROPUESTOS

4.11.1. COSTO DE INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS DE SELLADO PROPUESTOS

a. SISTEMA DE SELLADO 1: BOMBA DE CIRCULACIÓN EN DIFUSOR

En la Tabla 11 se observan un cuadro comparativo de los costos de instalación y mantenimiento de la propuesta de sellado 1 bomba de recirculación del difusor. En el análisis se incluyeron las pérdidas de azúcar calculada para cada bomba estimadas en 468,5 kg de azúcar mensuales.

El periodo de tiempo analizado fue de 21 meses correspondientes al ciclo de vida del sistema de sellado evaluado. Se obtuvieron ahorros por \$ 5 604,31 en cada bomba durante los 21

meses, lo que significó un ahorro de \$ 3 202,46 anuales por cada bomba. De implementarse el sistema de sellado en las 17 bombas del difusor se obtendrían ahorros por \$ 54 441,82 anuales por el cambio del sistema de sellado en las bombas de recirculación del difusor.

b. SISTEMA DE SELLADO 2: BOMBA DE JUGO CLARIFICADO

En la Tabla 12 se analizan los costos de la implementación y mantenimiento de la propuesta de sellado 02 para las bombas de jugo clarificado. Se realiza el comparativo de los sellos evaluados, no se consideró el tanque auxiliar de fluido de barrera ya que para ambos casos es necesario utilizarlo para el correcto funcionamiento de los sellos mecánicos.

El comparativo se realizó por el periodo completo de 26 meses al cabo de los cuales se obtuvo un ahorro de \$ 7 967,46 por cada bomba, lo que significaba un ahorro de \$ 3 677,29 anuales por cada bomba.

Tabla 11: Comparativo Económico Propuesta de sellado 01 vs sellado anterior

COSTOS	EMPAQUES ESTANDARIZADOS		SELLO MECANICO CHESTERTON EN EVALUACION		
	US \$	%	US \$	%	
1ª INSTALACION					
Empaques	14,00	21,74	Sello Mecanico	1 872,95	88,07
Bocina	41,40	64,29	Bocina	41,40	1,95
Mano de obra	9,00	13,98	Mano de obra	212,30	9,98
TOTAL	64,40	10,00	TOTAL	2 126,65	100,00
REPARACIONES (EN 21 MESES)					
Re empaquetado (semanal)	1 176,00	50,13		0,00	
Bocinas (10 cambios)	414,00	17,65		0,00	
Mantenimiento semanal	756,00	32,23		0,00	
TOTAL	2 346,00	100,00	TOTAL	0,00	0,00
COSTOS DE OPERACIÓN					
Pérdidas de jugo crudo	5 321,59			1,03	
TOTAL	7 731,99		TOTAL	2 127,68	
AHORRO TOTAL					
	US \$	5 604,31			

Considerando las 02 bombas de clarificación se obtendría el ahorro de S 7 354,58 anuales. Adicionalmente se debe considerar que con el arreglo recomendado de un tanque auxiliar

asistiendo a dos bombas se logra un ahorro adicional de \$ 2 350,00 por el costo del tanque auxiliar de fluido de barrera ahorrado.

Debido a los buenos resultados obtenidos esta recomendación de sello mecánico doble + tanque auxiliar se replicó en otras bombas de jugo de proceso con alto contenido de °Brix y en algunas bombas de efluentes.

Tabla 12: Comparativo propuesta sellado 02 vs sellado anterior

COSTOS	SELLO MECÁNICO ESTANDARIZADO		SELLO MECÁNICO CHESTERTON EN EVALUACIÓN	
	US \$	%	US \$	%
1ª INSTALACIÓN				
Sello mecánico	2 100,00	19,18	2 725,00	91,48
Bocina	41,40	0,38	41,40	1,39
Mano de obra	212,30	1,94	212,30	7,13
TOTAL	2 353,70		2 978,70	100,00
REPARACIONES (EN 26 MESES)				
Kit de reparación (03 cambios)	4 410,00	40,29	0.00	
Sello Mecánico Nuevo	2 100,00	19,18	0.00	
Mantenimiento correctivo	636,90	5,82	0.00	
Mantenimiento mayor	1 445,56	13,21	0.00	
TOTAL	8 592,46		0.00	0.00
TOTAL	\$ 10 946,16	100,00	\$2 978,70	
AHORRO TOTAL	\$ 7 967,46			

4.11.2. CÁLCULO DEL RETORNO DE LA INVERSIÓN

a. SISTEMA DE SELLADO 1: BOMBA DE CIRCULACIÓN EN DIFUSOR

En la **Figura 24** se observó que el punto de equilibrio de retorno de la inversión realizada en el nuevo sistema de sellado se alcanzó a los 11 meses de implementada la propuesta momento en donde el beneficio económico de utilizar esta propuesta de sellado se iguala a la inversión realizada.

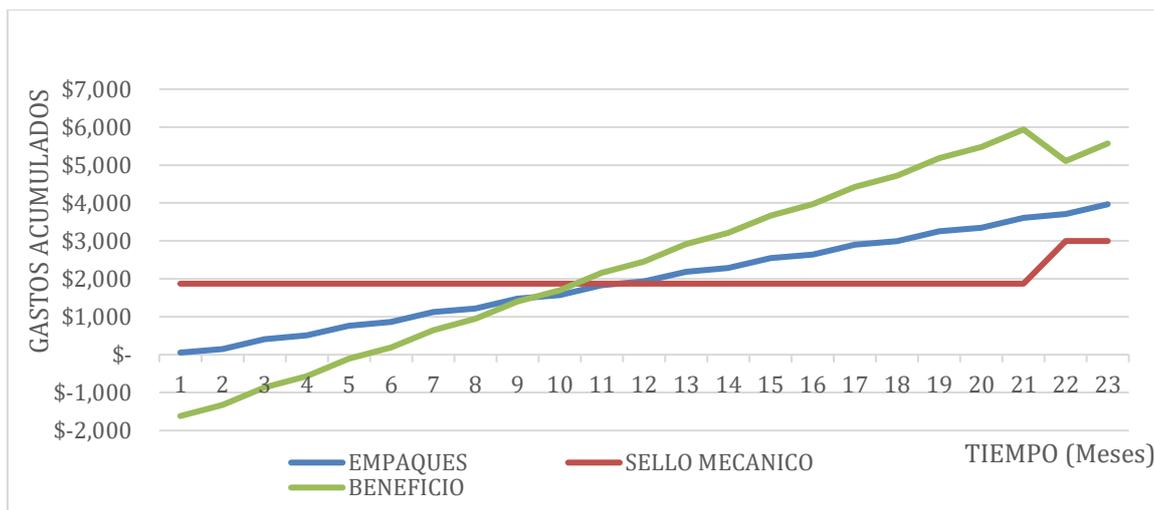


Figura 24: Retorno de inversión propuesta de sellado 01

Se calculó el retorno de la inversión ROI para la duración o tiempo de vida alcanzado:

$$\% ROI = \frac{\text{Beneficio} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} \times 100 \quad (10)$$

$$ROI = 2.17$$

Por lo tanto, esta inversión es rentable.

b. SISTEMA DE SELLADO 2: BOMBA DE JUGO CLARIFICADO

En la Figura 25 se observa que el punto de equilibrio de retorno de inversión se logra en el mes 14 momento en el que el beneficio económico de implementar esta propuesta de sellado 2 se iguala a la inversión realizada con la compra del sistema de sellado.

Sin embargo, se observa que los costos de mantenimiento de la bomba con el sistema normalmente utilizado fueron mayores a partir del mes 9 cuando se realizó la primera reparación del sello mecánico.

Se calculó el retorno de la inversión ROI para la duración o tiempo de vida alcanzado:

$$\% ROI = \frac{\text{Beneficio} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} \times 100 \quad (10)$$

$$ROI = 1.27$$

Por lo tanto, esta inversión es rentable.

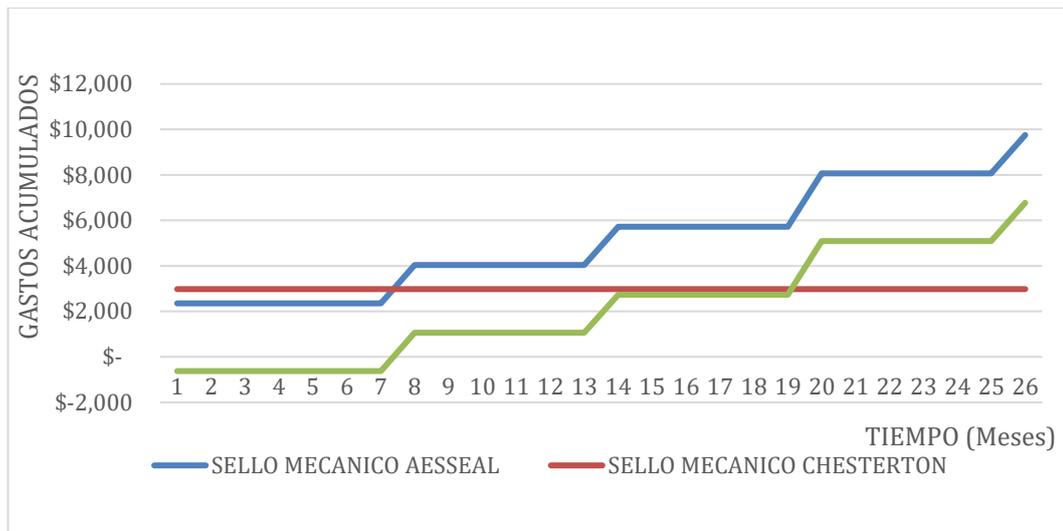


Figura 25: Retorno de inversión propuesta de sellado 02

4.12. APLICACIÓN DE LAS COMPETENCIAS PROFESIONALES

El presente Trabajo de Suficiencia Profesional se encuentra enmarcado dentro de las actividades realizadas por el Bachiller en Ciencias – Industrias Alimentarias en la empresa “US ITEM SA” donde desempeñó el cargo de asesor técnico comercial, encargado de la atención a todas las empresas azucareras del norte peruano. La carrera de Industrias Alimentarias permitió el correcto desenvolvimiento dentro de las empresas asesoradas, tanto en conocimientos como en competencias adquiridas.

Durante el proceso de elaboración de azúcar es de vital importancia el control de la hermeticidad en los equipos rotativos utilizados para el transporte del jugo de caña a través de la planta por lo que se lleva un estricto control de los balances de masa que determinan la eficiencia de los ingenios azucareros. Las pérdidas de jugo durante su transporte y procesamiento podían afectar los volúmenes de producción y eficiencia del proceso productivo. Existían pérdidas físicas de jugo de caña producidas por fallas y bajos estándares de mantenimiento de los sistemas de sellado en tuberías y bombas. Las funciones estuvieron orientadas al asesoramiento, desarrollo e implementación de proyectos de mejora en los sistemas de sellado en equipos rotativos para reducir pérdidas de fluido durante su transporte los que se desempeñaron apropiadamente ya que se pusieron en práctica los conocimientos adquiridos durante los años de estudio, tal como se muestra en la Tabla 13:

Tabla 13: Cursos y conocimientos adquiridos y aplicados en el desempeño laboral

Cursos	Conocimientos adquiridos puestos en practica
Ingeniería de alimentos I	Transporte de fluidos
Procesos I y II	Conservación y procesamiento de alimentos
Diseño de plantas	Diseño y distribución de equipos en planta
Tecnología Azucarera	Procesamiento de la caña de azúcar

Dentro de la carrera se llevaron cursos de procesos, ingeniería de alimentos, diseño de planta y tecnología azucarera que brindaron los conocimientos necesarios y se pusieron en práctica para identificar y esquematizar las diferentes etapas del proceso; entender la composición y el comportamiento del fluido en cada etapa, °Brix, % sacarosa (POL), identificar los puntos críticos y desarrollar propuestas de mejoras en los sistemas de sellado, realizar su instalación y la puesta en marcha así como la evaluación de los resultados obtenidos. La importancia de entender el comportamiento del fluido en cada etapa durante su transporte y el principio de elaboración del azúcar marcaron la diferencia al momento de recomendar las mejoras más apropiadas para elevar la productividad y eficiencia de los procesos y que guardan relación con las asignaturas mostradas en la Tabla 14:

Tabla 14: Cursos y conocimientos adquiridos y aplicados en la implementación de mejoras en los sistemas de sellado en equipos rotativos

Cursos	Conocimientos adquiridos puestos en practica
Ingeniería de alimentos	Transporte de fluidos, pérdidas durante el transporte de jugo de caña.
Procesos I y II	Balance de masa, identificación de puntos críticos, eficiencia de la producción.
Diseño de plantas	Distribución y ubicación de tanques auxiliares para los sistemas de sellado, instalación de bombas, instalación de tuberías y accesorios.
Tecnología Azucarera	Procesamiento de azúcar, balance de masa, rendimiento, Recobrado de fábrica, Pureza, POL.

Finalmente el desarrollo de capacidades y competencias durante la carrera tales como una excelente comunicación asertiva a diferentes niveles, empatía, responsabilidad en el trabajo, búsqueda apropiada de información técnico científica, correcta presentación de proyectos de mejora, búsqueda de soluciones innovadoras y el trabajo en equipo permitieron un correcto desenvolvimiento del bachiller en el centro laboral así como en la ejecución exitosa de las labores y actividades encomendadas en todos los ingenios azucareros asesorados.

V. CONCLUSIONES

1. El ingenio azucarero en estudio durante el periodo en el que se desarrolló el proyecto procesó en promedio 2 577 419 Tn de caña de azúcar de las cuales se obtuvieron 269 061 Tn de azúcar. El total de jugo crudo ingresado a fabrica fue de 2 466 796 Tn los cuales contenían 321 766 Tn de sacarosa. El Recobrado en fábrica o eficiencia en el proceso de obtención de azúcar en el ingenio azucarero fue de 83,62% y el rendimiento del jugo crudo en la producción de azúcar fue de 11%.
2. Según el balance de masa calculado en la zona de extracción de jugo de caña se ingresaban 240 Tn/h de caña de azúcar y 136Tn/h de agua al difusor y salían hacia fabrica 230Tn/h de jugo crudo y 146 Tn/h de bagazo.
3. Se estimó que las pérdidas de jugo crudo por deficiente sellado en las bombas de jugo de recirculación del difusor ascendían a 868,87 Tn jugo crudo/año. Solo se controlaba el peso de jugo crudo desde la salida del difusor hacia fabrica por lo que las pérdidas de jugo durante la difusión se consideraban como indeterminadas.
4. El sistema de sellado por empaquetaduras en las bombas de recirculación de jugo en el difusor tenía una duración de 2 meses y el sistema de sellado con sello mecánico en las bombas de jugo clarificado tenía una duración de 8 meses, luego de lo cual ambas requerían de cambio para evitar mayores pérdidas indeterminadas de jugos en el proceso.
5. Se recomendaron e implementaron sistemas de sellado para ambas aplicaciones: sello mecánico 150 + buje de restricción para las bombas de recirculación del difusor y sello mecánico 250 + tanque auxiliar de fluido de barrera para las bombas de jugo clarificado. Ambos sistemas requerían de planes ambientales de refrigeración para la limpieza y lubricación de las caras. Las especificaciones de los planes ambientales

6. propuestos que no adicionaban agua al proceso por lo que el balance de masa no era afectado.
7. Debido a las fluctuaciones en la línea de aire el sistema de sellado instalado en la bomba de jugo clarificado trabajó con el tanque auxiliar de fluido de barrera sin presurizar o Plan API 52.
8. Ambas recomendaciones superaron los 12 meses de trabajo sin presentar fallas. De implementar los sistemas de sellado en las 17 bombas de recirculación del difusor significaría un aumento en la cantidad de envío de jugo a fabrica a 2 467 665 Tn y en la producción de azúcar a 269 157 Tn azúcar cruda/año. El Recobrado Total o eficiencia del ingenio azucarero aumentaría a 83,65%.
9. El sello mecánico instalado en la bomba de recirculación del difusor trabajo 21 meses sin fuga. Este desempeño significó un ahorro anual de \$ 3 202,46 por cada bomba, que incluye el azúcar obtenido con el jugo crudo recuperado. El retorno de la inversión realizada se logró a los 11 meses de instalado el sello mecánico.
10. El sello mecánico instalado en la bomba de jugo clarificado trabajo 26 meses sin fuga. Este desempeño significó un ahorro anual de \$ 3 677,29 por cada bomba solo en la compra de repuestos para la reparación de los sellos mecánicos anteriormente utilizados. El retorno de la inversión realizada se logró a los 14 meses de instalado el sello mecánico.

VI. RECOMENDACIONES

- Implementar el sistema de sellado propuesto en las 17 bombas de recirculación del difusor. Se obtendrá una mayor producción de azúcar, un ambiente más limpio sin derrames en el piso que dañan el concreto.
- Implementar el sistema de sellado instalado en la bomba de jugo clarificado en todas las bombas de jugo del proceso hasta con una concentración de 63°Brix.
- Utilizar un plan de refrigeración con tanque de fluido de barrera sin presurizar o plan API 52 en las bombas de jugo de proceso con sello mecánico doble y monitorear la duración del sello mecánico doble instalado con este plan.
- Identificar otros puntos en planta donde se observen fugas e implementar sistemas de sellado para reducir las o eliminarlas y extender el tiempo de vida de los equipos. Se logrará un ambiente más limpio y una mejora en los índices de extracción y recobrado.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, J. (2012). *Bombas centrifugas lo que usted necesita conocer para iniciarse en el mundo de las bombas*. Cap. 14. Minc FBN Biblioteca Nacional Rio de Janeiro – Brasil. Registrado en el Esc. Direitos Autorais.
- Apoyo & Asociados. (2020). *Corporación Azucarera del Perú S.A. Informe Anual 2019*. 3 – 5. Recuperado de <https://www.aai.com.pe/wp-content/uploads/2020/07/Coazucar-Dic-2019-VF.pdf>
- Arias, L. (2008). *Aplicaciones de sellos mecánicos en bombas de la industria petrolera ecuatoriana*. (Tesis de Titulación, Escuela Politécnica Nacional) 74 – 79. Repositorio Digital - EPN, 299. Recuperado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/987>
- Asociación Peruana de Agroindustriales del Azúcar y Derivados. APAAD. (2020). *Sector Agroindustrial Del Azúcar y Derivados en el Perú Informe Anual 2019*. Agencia Agraria de Noticias Agraria.pe. 8, 11 – 12. Recuperado de <https://qrco.de/bbgxa1>
- AW Chesterton. (2004). *Emisiones Fugitivas: Programa de sellado de válvulas*.PPT. Recuperado de <https://chestertonuniversity.com/>
- AW Chesterton. (2006a) *Do balanced seals save energy?* Tech Talk Solutions. Winchester, USA. AW Chesterton Company.
- AW Chesterton. (2006b) *Sealing taper bore seal chambers*. Tech Talk Solutions. Winchester, USA. AW Chesterton Company.
- AW Chesterton. (2006c) *Equipment conditions for optimal seal life*. Tech Talk Solutions. Winchester, USA. AW Chesterton Company.
- AW Chesterton. (2006d) *Rotary vs Stationary Seals*. Tech Talk Solutions. Winchester, USA. AW Chesterton Company.
- AW Chesterton. (2007a). *Sello de Cartucho Simple 150*. 2 – 3. Recuperado de https://chestertondocs.chesterton.com/Rotating/Sb150_ES.pdf
- AW Chesterton. (2007b). *Sello de Cartucho Doble 250*. 2 – 3. Recuperado de https://chestertondocs.chesterton.com/Rotating/sb250_ES.pdf
- .AW Chesterton. (2011a). *Catálogo de Sellos Mecánicos*. 44. Recuperado de: https://chestertondocs.chesterton.com/Rotating/scCatalog_ES.pdf

- AW Chesterton (2011b). *Sellos Poliméricos*. 39. Recuperado de <http://www.chesterton.cl/ficha/Catalogo%20Sellos%20Hidraulicos%20Chesterton.pdf>
- Cadena, H (2011). *Descripción y análisis de fallas presentadas en sellos mecánicos de bombas centrifugas*. (Tesina de experiencia educativa, Universidad Veracruzana) 3– 5. Recuperado de <https://www.academia.edu/download/34796845/CadenaVelazquez.pdf>
- Chacón, Justo. 2014. *Propuesta técnica para el incremento de procesamiento de caña de azúcar a 300T/H del trapiche de un ingenio azucarero en el norte del Perú*. (Tesis de titulación, Pontificia Universidad Católica del Perú). Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Chen, James; Chung Chi Chou, 1993. *Cane Sugar Handbook: A Manual for Cane Sugar Manufacturers and Their Chemists*. John Wiley & Sons INC. 12th edition. Recuperado de https://books.google.com.pe/books?id=bDIwg2UZ8sYC&printsec=frontcover&hl=e&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Chen, R., Zhang, C., Wang, S., & Qian, Y. (2021). *Reliability estimation of mechanical seals based on bivariate dependence analysis and considering model uncertainty*. Chinese Journal of Aeronautics, 34(5), 554–572. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.12.001>
- Chesterton Global Training. (2007a). *Pump Principles Manual*. Winchester, USA. AW Chesterton Company.
- Chesterton Global Training. (2007b). *Mechanical Seals Principles Manual*. Winchester, USA. AW Chesterton Company,
- Chesterton Global Training. (2009). *Mechanical Packing Course 1.2*. PPT. Recuperado de <https://chestertonuniversity.com/>
- Chesterton Global Training. (2013). *Flush Pressure or Flow? What is best for seals?* Ralph Merullo/Keith Toal. Webcast. USA. Recuperado de: <https://www.chesterton.com/en-us/Service/Pages/ChestertonUniversity.aspx>
- De la Rosa, C; Torres, D. (2019) “Análisis de fallas y confiabilidad de sellos mecánicos en bombas de lodos” (Trabajo de investigación, Universidad de Piura) 8 – 11. Recuperado de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/22083>
- Delgado, D. (2018). *Evaluación técnica económica de la implementación del sexto molina para la extracción de sacarosa en el área de trapiche de la empresa azucarera Agropucalá SAA – 2016*. (Tesis de titulación, Universidad Señor de Sipan). Repositorio institucional de la Universidad Señor de Sipan. Recuperado de

<https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/4943/Delgado%20G%c3%a1lvez,%20Danty%20Aladino.pdf?sequence=1>

Fluid Sealing Association, FSA (2008) *What determines Seal Leakage?* Pumps & Systems Magazine. May, 2008.

Fluid Sealing Association, FSA (2008) *Elements of a successful sealing program.* Pumps & Systems Magazine. May, 2008.

Inga, J (2003). *Industria azucarera peruana, evolución y perspectivas.* (Tesis de titulación, Universidad de Piura) 5, 16 – 19. Repositorio Institucional Pirhua. Recuperado de <https://hdl.handle.net/11042/1312>

ITT Pumps, 2009. Goulds Pumps. *Manual de instalación, operación y mantenimiento bombas modelos 3180, 3181,3185 y 3186.* 20 – 43. Recuperado de <https://www.gouldspumps.com/es-CL/Products/3180/#>

Moya, J (2000). *Difusión vs Molida.* Technical Report. 2 – 3, 8. Universidade Federal da Bahia. DOI: [10.13140/RG.2.1.3534.4404](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3534.4404)

North Ride Pumps. (2002). *Como leer la curva de rendimiento de una bomba.* Recuperado de https://www.northridgepumps.com/article-261_como-leer-la-curva-de-rendimiento-de-una-bomba

Oficina de estudios Económicos y Estadísticos OEEE. MINAGRI. (2011). *La Industria Azucarera 2004 – 2011.* 6 – 8, 12 – 13, 23. Lima, Perú. Imprenta Servicios Generales-UL-OA Ministerio Agricultura.

Pump&Bombas (2021). *Tipo de bombas roto dinámicas.* Tutorial. Academy for pumps. <https://pumpsbombas.com/tutorial-tipos-bombas-rotodinamicas/>

Rein, P. (2007). *Cane sugar engineering.* 31 – 38. Bartens.

Romero, G. (2010). *El proceso de elaboración de azúcar de caña.* (Tesis de titulación, Universidad Nacional de Trujillo). Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Trujillo. Recuperado de <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9189>

Sandoval, M. (2002). *Balance de materiales en la industria azucarera.* (Tesis de titulación, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua) 38, 44 – 47. Repositorio:<http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/retrieve/3736>

Serrano, J; Gonzáles, L; Orozco, J. 2017. *Análisis del proceso de producción de azúcar crudo en un central de la provincia de matanzas.* Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos” Unidad de Monografías. Cuba. Recuperado de <http://monografias.umcc.cu/monos/2017/FCT/mo17183.pdf>

- Superintendencia de Mercados y Valores, SMV (2014 – 2016) *Portal de información financiera*. Recuperado de https://www.smv.gob.pe/Frm_InformacionFinanciera?data=A70181B60967D74090DCD93C4920AA1D769614EC12
- Swagelok, 2020. *Sistemas de apoyo al sello mecánico. Planes de sellado API*. TM Swagelok Company (MS 02 482)
- Vega, R. 2018. *Estudio preliminar del comportamiento de azúcares reductores en las etapas de cocimiento y su impacto en la recuperación de sacarosa*. Academia.edu. Recuperado de [Estudio preliminar del comportamiento de azúcares reductores en las etapas de cocimiento y su impacto en la recuperación de sacarosa](#)
- Zavaleta, R. 2011. *Preparación de jarabes de sacarosa mediante mediciones volumétricas*. Acta Nova, Revista de Ciencias y Tecnología. Universidad Católica Boliviana. Recuperado de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892011000100006

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Registro fotográfico de las pérdidas de jugo crudo en bombas de circulación



Anexo 2: Tabla de densidades en soluciones azucaradas en función del °Brix y la temperatura

122 · Zabaleta R.: Preparación de jarabes de sacarosa mediante mediciones ...

Tabla 5. Densidades de las soluciones en función de °Bx y la temperatura. Valores calculados por aplicación del Subprograma 4.

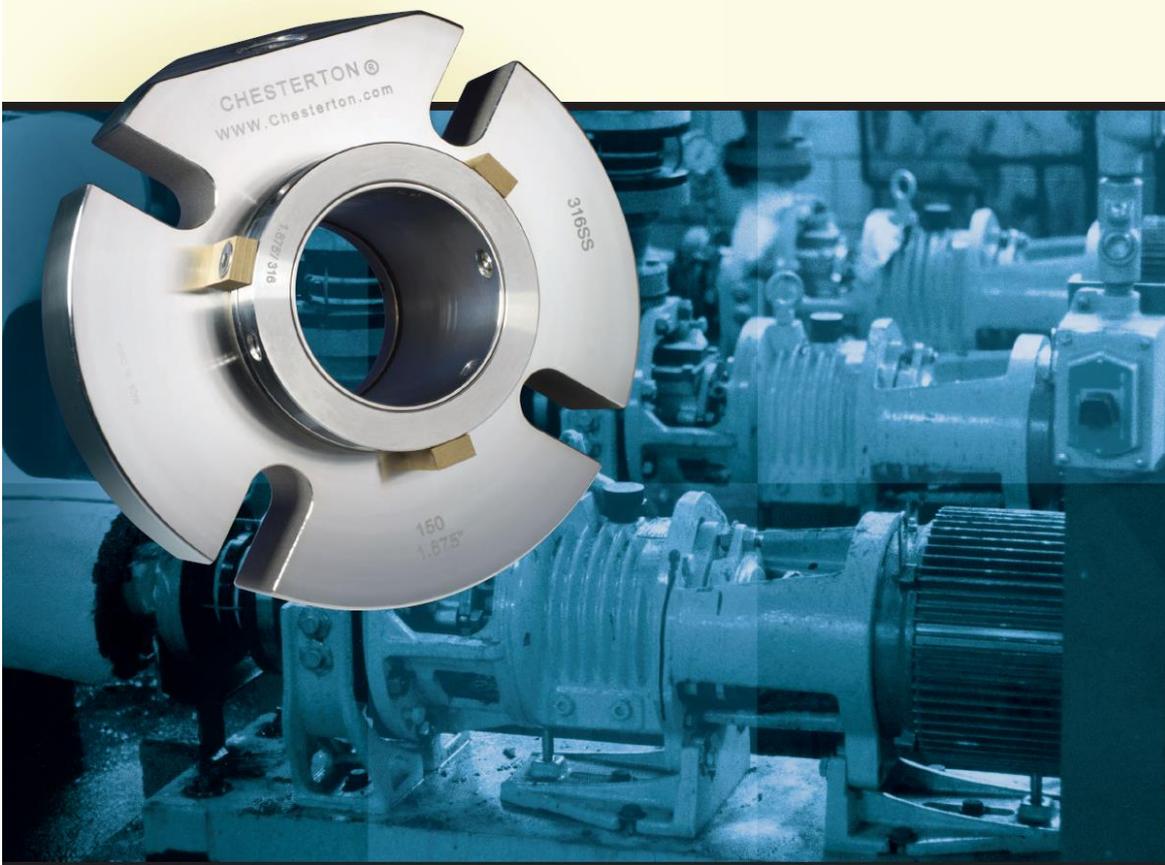
T, °C	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
°Br	Densidad, (g/mL) °Br												
0	0,99992	0,99929	0,99842	0,99733	0,99601	0,99447	0,99270	0,99072	0,98851	0,98608	0,98342	0,98054	0,97743
5	1,01996	1,01914	1,01810	1,01685	1,01540	1,01373	1,01185	1,00976	1,00745	1,00494	1,00221	0,99928	0,99613
10	1,04071	1,03969	1,03848	1,03707	1,03546	1,03366	1,03165	1,02945	1,02705	1,02445	1,02165	1,01866	1,01547
15	1,06221	1,06101	1,05963	1,05806	1,05630	1,05436	1,05223	1,04992	1,04741	1,04472	1,04183	1,03877	1,03552
20	1,08449	1,08315	1,08163	1,07993	1,07804	1,07597	1,07371	1,07127	1,06865	1,06584	1,06285	1,05968	1,05633
25	1,10759	1,10618	1,10457	1,10276	1,10077	1,09858	1,09621	1,09364	1,09088	1,08794	1,08480	1,08148	1,07797
30	1,13156	1,13015	1,12851	1,12666	1,12460	1,12232	1,11983	1,11713	1,11422	1,11110	1,10777	1,10424	1,10050
35	1,15642	1,15512	1,15355	1,15173	1,14964	1,14730	1,14471	1,14187	1,13878	1,13544	1,13186	1,12804	1,12397
40	1,18222	1,18116	1,17976	1,17804	1,17600	1,17364	1,17096	1,16797	1,16467	1,16107	1,15716	1,15295	1,14846
45	1,20900	1,20832	1,20722	1,20571	1,20378	1,20145	1,19870	1,19555	1,19201	1,18807	1,18376	1,17906	1,17401
50	1,23679	1,23666	1,23601	1,23482	1,23310	1,23084	1,22805	1,22474	1,22091	1,21658	1,21175	1,20645	1,20069
55	1,26563	1,26626	1,26621	1,26547	1,26405	1,26193	1,25913	1,25564	1,25148	1,24667	1,24123	1,23518	1,22855
60	1,29557	1,29715	1,29789	1,29776	1,29674	1,29484	1,29205	1,28838	1,28385	1,27847	1,27229	1,26534	1,25767
65	1,32663	1,32941	1,33114	1,33177	1,33129	1,32968	1,32694	1,32308	1,31811	1,31208	1,30503	1,29701	1,28810
70	1,35886	1,36310	1,36603	1,36761	1,36780	1,36656	1,36391	1,35984	1,35439	1,34760	1,33954	1,33027	1,31990

Fuente: Tomado de Zabaleta, R. 2011

Anexo 3: Hoja técnica del sello mecánico Chesterton 150

150

SELLO DE CARTUCHO SIMPLE
PARA APLICACIONES INDUSTRIALES GENERALES



 **CHESTERTON**
Global Solutions, Local Service.

<<Continuación>>

150

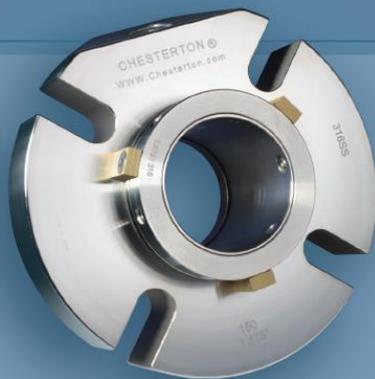
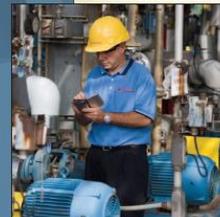
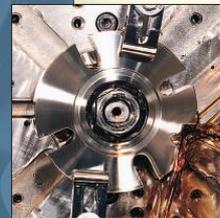
SIMPLE, FIABLE Y ECONÓMICO

Con la comprobada calidad de Chesterton, el 150 es un líder de valor en su clase. Es la opción ideal para reducir los altos costos de mantenimiento y evitar los derroches causados por fugas, los daños por desgaste de los ejes y el ineficiente tiempo improductivo.

Diseñado para aplicaciones de referencia y para actualizar equipos con empaques o sellos de componentes, el sello 150 simplifica el sellado industrial para usos generales, resultando a la vez fiable y económico.

Ventajas de actualizarse al diseño de cartucho preensamblado del sello 150:

- Evita el desgaste de los ejes y los daños a los aros tóricos
- Elimina la necesidad de realizar mediciones, minimizando los errores de instalación
- Aumenta la vida útil del sello con un diseño comprobado y equilibrado
- Evita el desgaste de los empaques en las camisas de los ejes
- Elimina las fugas asociadas con bombas empacadas



El 150 es la solución económica para satisfacer las necesidades de la industria de hoy.

- Construido a partir de materiales de alta calidad
- Sirve para las populares bombas ANSI/ISO y verticales
- Instalación rápida y sencilla
- Capacidad de reparación en terreno y en la fábrica
- Capacidades opcionales de templado y drenaje
- Disponibilidad mundial en paquetes listos para el uso

<<Continuación>>



- 1 Se instala de manera fácil y precisa**
Los ganchos de centrado multidireccionales posicionan el sello de manera automática y establecen una presión constante del resorte.
- 2 Enfriamiento mejorado**
El anillo del prensaestopas proporciona una cantidad significativamente mayor de fluido de proceso en la interfaz del sello para lograr un enfriamiento eficaz. Esto brinda beneficios particulares cuando existen holguras estrechas en las bombas.
- 3 Evita el taponamiento**
Los resortes de varios espirales proporcionan una carga uniforme y constante en la cara, y se colocan fuera del fluido de sellado para evitar el taponamiento.
- 4 Mejoras capacidades de los momentos torsores**
Las orejas de accionamiento para servicio pesado reducen los daños por desgaste y manejan un momento torsor de arranque más alto.
- 5 Geometría optimizada de la cara de sellado**
Por medio del análisis de elementos finitos, el diseño de la cara de sellado compuesto se optimiza para mejorar la lubricación y extender la vida útil del sello.
- 6 Opción de templado y drenaje**
La opción de templado y drenaje permite aplicar el 150 a una mayor variedad de aplicaciones.

Ofertas estándar

Rango de tamaños	1 pulg (25 mm) a 4,75 pulg (120 mm)
Quincallería	Acero inoxidable 316
Dos ofertas estándar de prensaestopas	Sólo de enjuague Enjuague, templado y drenaje
Combinación de cara de sellado	CB/SSC SSC/SSC
Aros tóricos	EP, FKM y Aflas™ como opción estándar Chemlast™ disponible a pedido del cliente

Parámetros de operación

Velocidad de operación	Hasta 3600 RPM
Valor nominal de presión*	Vacío hasta 300 psig (20 bar g)
Temperatura	-20°F a 400°F (-30°C a 200°C)

*Las capacidades de presión del sello dependen de las combinaciones de fluido sellado, temperatura, velocidad y cara del sello.



Anexo 4: Hoja técnica de buje restrictivo 14K

14K Restriction Bushings

Robust, restriction bushing for rotary equipment

Chesterton® 14K restriction bushings are designed for use in rotary equipment to form a barrier between the sealing device in the stuffing box or the pump impeller housing and the fluid in the mixing tank. The restriction that is produced reduces flush requirements and helps to prevent suspended abrasive particles from entering the stuffing box area.

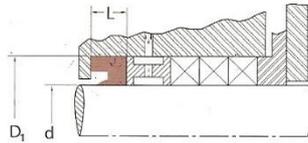
The 14K restriction bushings are manufactured using a machining process which allows the flexibility to create any size, based on equipment dimensions. Each bushing is individually manufactured and provides excellent performance in pumps, agitators, mixers, refiners, and other equipment.

The 14K's tapered lip design conforms to equipment eccentricities to minimize the annular gap formed around the rotating shafts, thereby creating the smallest possible free flow area for controlling flush flow rates. A secondary beneficial effect of increasing pressure drop with the 14K is that the flush around the shaft becomes very uniform, which is critical in preventing particulates from entering the stuffing box envelope.

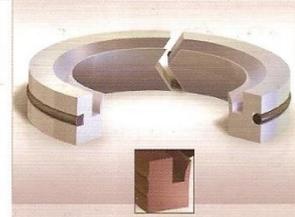
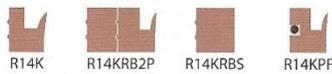
SPECIFICATIONS			
Material (designation)	Size Range mm (inch)	Temperature °C (°F)	pH range
AWC520 (PTFE)	25 to 355 (1 to 14)	Up to 200 (400)	0-14
AWC800 (EU)	25 to 355 (1 to 14)	Up to 185 (185)	4-10

Flow rates - approximated for water by the following formulas

Flow rate, liter/min = $((0.115 \times \Delta \text{ pressure, bar}) + [0.064]) \times \text{shaft diameter, mm}$
 Flow rate, gallon/min = $((0.053 \times \Delta \text{ pressure, psi}) + [0.43]) \times \text{shaft diameter, inch}$



PRODUCT PROFILES:



- Split design, simplifies installation
- Prevents particles from entering the stuffing box, extending packing and seal life
- Tapered lip design controls fluid bypass and helps increase pumps efficiency
- Dual materials available, plant-wide usage
- Designed for pumps of all types including agitators, mixers, and refiners

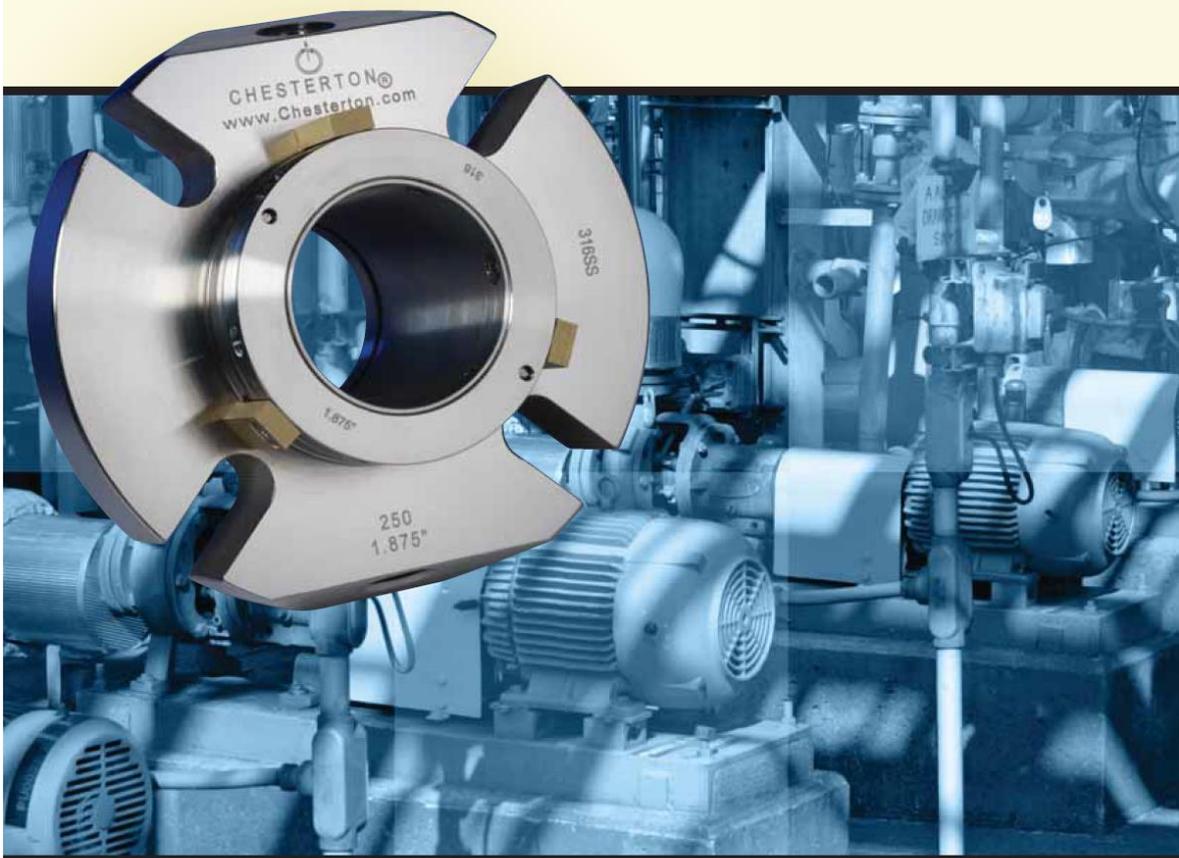
To place an order:

Product profile: _____
 Material: _____
 Rod shaft diameter (d): _____
 Bore diameter (D_i): _____
 Groove height (L): _____

Anexo 5: Hoja técnica de sello Chesterton 250

250

SELLO DE CARTUCHO DOBLE
PARA APLICACIONES INDUSTRIALES GENERALES



 **CHESTERTON**
Global Solutions, Local Service.

<<Continuación>>

250

SENCILLO, FIABLE Y ECONÓMICO

El sello de cartucho doble 250 de Chesterton es un líder del valor en su clase. Con la calidad comprobada de Chesterton, resulta ser la opción ideal para aumentar el rendimiento del sello cuando el método actual de sellado no está cumpliendo con las expectativas.

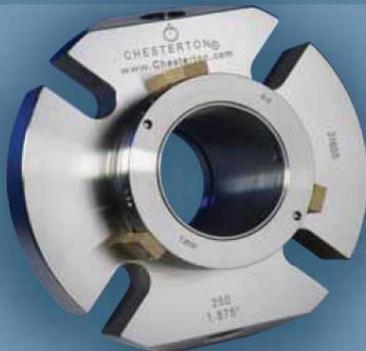
El sello doble 250 proporciona seguridad de sellado que los sellos simples convencionales no pueden igualar. Un sello secundario durable brinda la oportunidad de realizar mantenimiento programado, evitando de este modo el tiempo improductivo no planificado y las pérdidas de producción.

Ventajas de actualizarse al diseño de sello de cartucho doble preensamblado 250:

- Proporciona un fluido de barrera limpio para la lubricación de la cara del sello
- Mejora el enfriamiento para aplicaciones de temperaturas más altas
- Aumenta la vida útil del sello con un diseño doble comprobado y equilibrado
- Elimina las fugas asociadas con los fallos de sellos simples



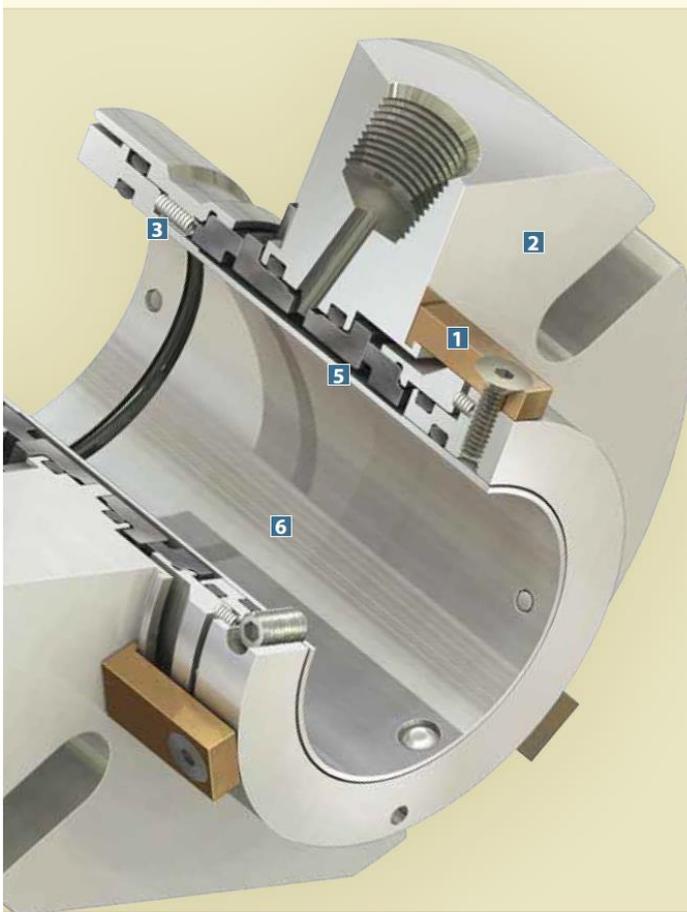
4



El sello de cartucho doble 250 es la solución económica para satisfacer las necesidades de la industria de hoy.

- Construido a partir de materiales de alta calidad
- Sirve para las populares bombas ANSI/ISO y verticales
- Instalación rápida y sencilla
- Capacidad de reparación en campo y en la fábrica
- Disponibilidad mundial en paquetes listos para el uso

GENERAL



- 1 Se instala de manera fácil y precisa**
Los ganchos de centrado multidireccionales posicionan el sello de manera automática y establecen una presión constante del resorte.
- 2 Mejora la circulación**
El diseño del prensaestopos produce un incremento del flujo del fluido de barrera, proporcionando una mejor capacidad de enfriamiento. Esto resulta beneficioso en el caso de instalaciones que utilizan tanques de fluidos de barrera.
- 3 Evita el taponamiento**
Los resortes de varios espirales proporciona una carga uniforme y constante en la cara, y se colocan fuera del fluido de sellado para evitar el taponamiento.
- 4 Mejoras capacidades de los momentos torsores**
Las orejas de accionamiento para servicio pesado reducen los daños por desgaste y manejan un momento torsor de arranque más alto.
- 5 Geometría optimizada de la cara de sellado**
Por medio del análisis de elementos finitos, el diseño de la cara de sellado compuesto se optimiza para mejorar la lubricación y extender la vida útil del sello.
- 6 Diseño durable y equilibrado**
El diseño de equilibrio doble proporciona un mejor rendimiento de sellado cuando ocurren fluctuaciones de la presión.

Ofertas estándar

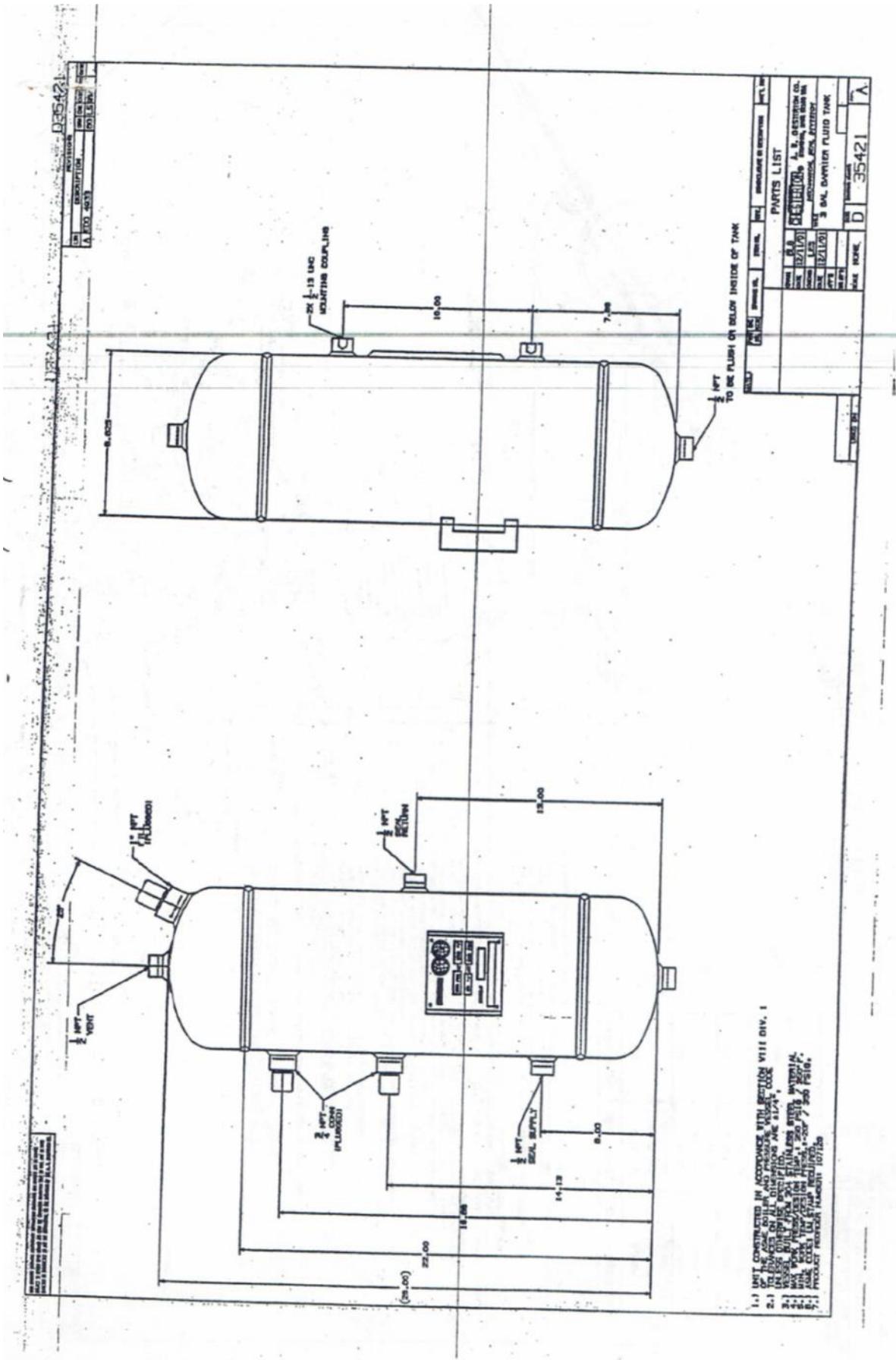
Rango de tamaños	1 pulg. (25 mm) a 4,75 pulg. (120 mm)
Quincallería	Acero inoxidable 316
Combinación de cara de sellado	CB/SSC/SSC/CB SSC/SSC/SSC/CB
Aros tóricos	EP, FKM y Aflas™ como opción estándar Chemlast™ disponible a pedido del cliente

Parámetros de operación

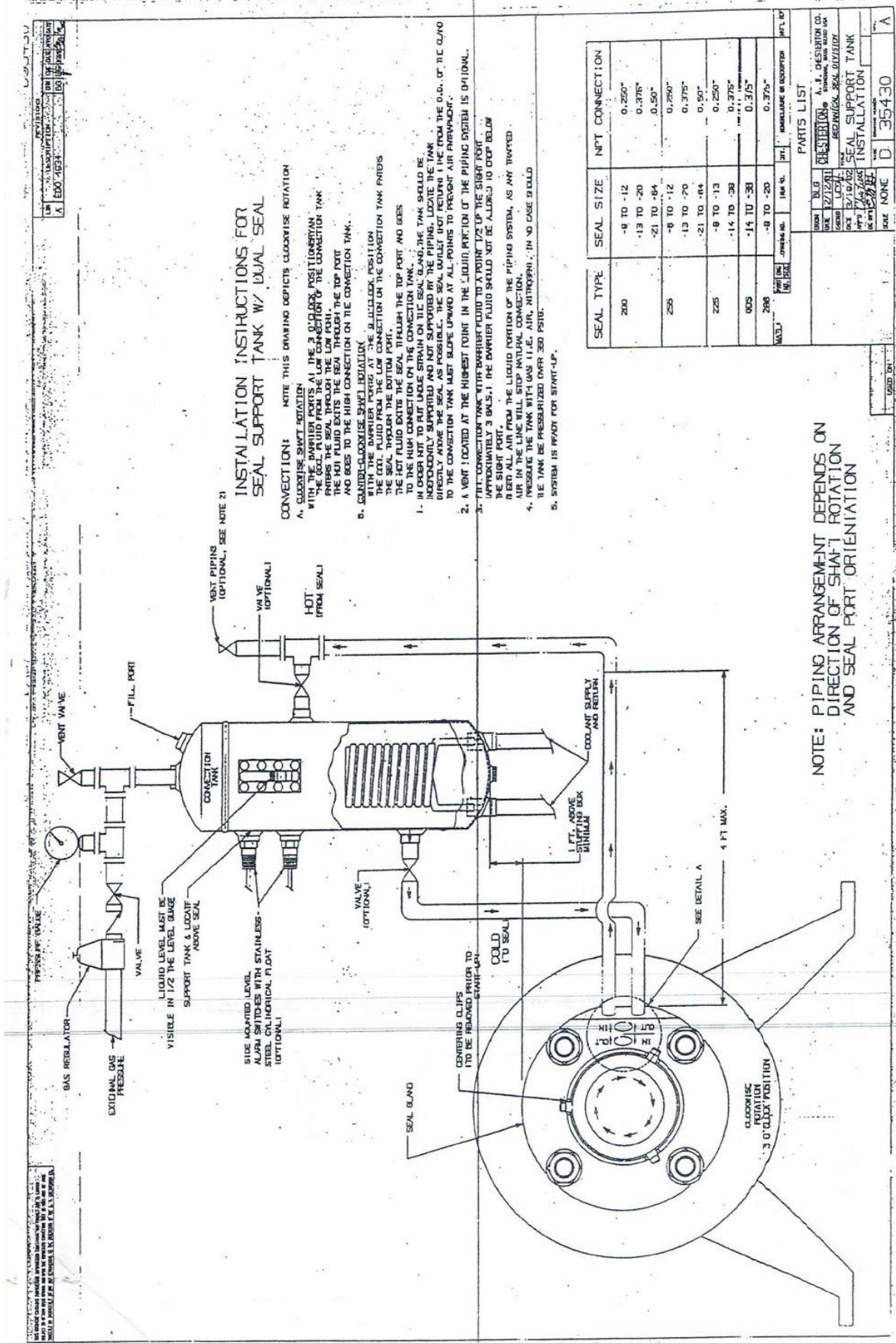
Velocidad de operación	Hasta 3600 RPM
Valor nominal de presión*	Vacío hasta 300 Psig (20 bar g) presión de proceso 150 Psig (10 bar g) máxima presión de barrera
Temperatura	-20°F a 400°F (-30°C a 200°C)

*Las capacidades de presión del sello dependen de las combinaciones de fluido sellado, temperatura, velocidad y cara del sello.

Anexo 6: Hoja técnica de tanque auxiliar de barrera



- 1.1 UNIT CONSTRUCTED IN ACCORDANCE WITH SECTION VIII DIV. 1
- 2.1 TO BE USED ON ALL PRESSURE VESSELS
- 3.1 MAXIMUM WORKING PRESSURE 150 PSIG
- 4.1 MAXIMUM WORKING TEMPERATURE 300°F
- 5.1 ASME CODE, SECTION VIII, DIV. 1
- 6.1 PRODUCT DESIGNER: HANSON 107126



INSTALLATION INSTRUCTIONS FOR SEAL SUPPORT TANK W/ DUAL SEAL

- CONVECTION:** NOTE THIS DRAWING DEPICTS COUNTERSEAL ROTATION
- A. COUNTERSEAL ROTATION WITH THE DIVERTER PORTS AT THE 3 O'CLOCK POSITION (VIEW FROM THE CONNECTION TANK) PREVENTS THE SEAL THROUGH THE CONNECTION TANK AND GOES TO THE HIGH CONNECTION ON THE CONNECTION TANK.
 - B. COUNTERSEAL ROTATION WITH THE DIVERTER PORTS AT THE 9 O'CLOCK POSITION (VIEW FROM THE CONNECTION TANK) PREVENTS THE SEAL THROUGH THE CONNECTION TANK AND GOES TO THE HIGH CONNECTION ON THE CONNECTION TANK.
 1. IN ORDER NOT TO FIT TIGHT STRAIN ON THE SEAL GLAND, THE TANK SHOULD BE INDEPENDENTLY SUPPORTED AND NOT SUPPORTED BY THE PIPING. LOCATE THE TANK WITH THE SEAL PORTS AT THE HIGHEST POINT FROM THE O.D. OF THE COLD TO THE CONNECTION TANK MUST BE ABOVE UPWARD AT ALL POINTS TO PREVENT AIR ENTRAPMENT.
 2. A VENT LOCATED AT THE HIGHEST POINT IN THE LIQUID PORTION OF THE PIPING SYSTEM IS OPTIONAL.
 3. FIT CONNECTION TANK WITH DIVERTER FLUID TO A POINT 1/2 UP THE SIGHT PORT. THE SIGHT PORT IS 3 GALS. IF THE DIVERTER FLUID SHOULD NOT BE ALLOWED TO DROP BELOW THE SEAL PORT.
 4. PRESSURE THE TANK WITH GAS (I.E. AIR, NITROGEN) IN NO CASE SHOULD THE TANK BE PRESSURIZED OVER 300 PSIG.
 5. SYSTEM IS READY FOR START-UP.

SEAL TYPE	SEAL SIZE	NPT CONNECTION
200	-8 TO -12	0.250"
	-13 TO -20	0.375"
	-21 TO -84	0.50"
255	-8 TO -12	0.250"
	-13 TO -70	0.375"
	-21 TO -84	0.50"
225	-8 TO -13	0.250"
	-14 TO -38	0.375"
605	-14 TO -38	0.375"
	-14 TO -38	0.375"
268	-8 TO -20	0.375"
	-8 TO -20	0.375"

PARTS LIST

QTY	ITEM NO.	DESCRIPTION	UNIT
1	35430	SEAL SUPPORT TANK	
1	35431	INSTALLATION	
1	35432	SEAL SUPPORT TANK	
1	35433	INSTALLATION	

SCALE: NONE D 35430 A

NOTE: PIPING ARRANGEMENT DEPENDS ON DIRECTION OF SHAFT ROTATION AND SEAL PORT ORIENTATION

<<Continuación>>

THE VISCOSITY OF THE BARRIER / BUFFER FLUID SHOULD BE CHECKED OVER THE ENTIRE OPERATING TEMPERATURE RANGE WITH SPECIAL ATTENTION BEING GIVEN TO START UP CONDITIONS. THE VISCOSITY SHOULD BE LESS THAN 500cSt AT THE MINIMUM OPERATING TEMPERATURE.

1. FOR SERVICES ABOVE 50F, HYDROCARBON BARRIER / BUFFER FLUIDS HAVING A VISCOSITY BELOW 100cSt AT 100F AND BETWEEN 1 AND 10cSt AT 212F HAVE DEMONSTRATED PROPER OPERATING CLIMATE.
2. FOR SERVICES BELOW 50F, HYDROCARBON BARRIER / BUFFER FLUIDS HAVING A VISCOSITY BETWEEN 5 AND 40cSt @ 100F AND BETWEEN 1 AND 10cSt HAVE DEMONSTRATED PROPER OPERATING CHARACTERISTICS.
3. FOR AQUEOUS STREAMS, MIXTURES OF WATER AND ETHYLENE GLYCOL OR PROPYLENE GLYCOL ARE USUALLY ADEQUATE. COMMERCIALY AVAILABLE AUTOMOTIVE ANTI-FREEZE SHOULD NEVER BE USED. THE ADDITIVES IN ANTI FREEZE TEND TO PLATE OUT ON SEAL PARTS AND CAUSE FAILURE AS A RESULT OF GEL FORMATION.
4. THE FLUID SHOULD NOT FREEZE AT THE MINIMUM SITE AMBIENT TEMPERATURE.

FLUID VOLATILITY AND TOXICITY OF THE FLUID MUST BE SUCH THAT THE LEAKAGE TO THE ATMOSPHERE OR DISPOSAL DOES NOT IMPOSE AN ENVIRONMENTAL PROBLEM.

1. THE FLUID SHOULD HAVE AN INITIAL BOILING POINT AT LEAST 50 DEG. F ABOVE THE TEMPERATURE TO WHICH IT WILL BE EXPOSED.
2. HAS A FLASH POINT HIGHER THAN THE SERVICE TEMPERATURE IF OXYGEN IS PRESENT.
3. ETHYLENE GLYCOL MAY BE CONSIDERED A HAZARDOUS MATERIAL AND / OR HAZARDOUS WASTE WHEN USED AS A BARRIER FLUID.

BE ABLE TO MEET THE MINIMUM 3-YEAR CONTINUOUS SEAL OPERATION CRITERIA WITHOUT ADVERSE DETERIORATION. IT SHOULD NOT FORM SLUDGE, POLYMERIZE, OR COKE AFTER EXTENDED USE.

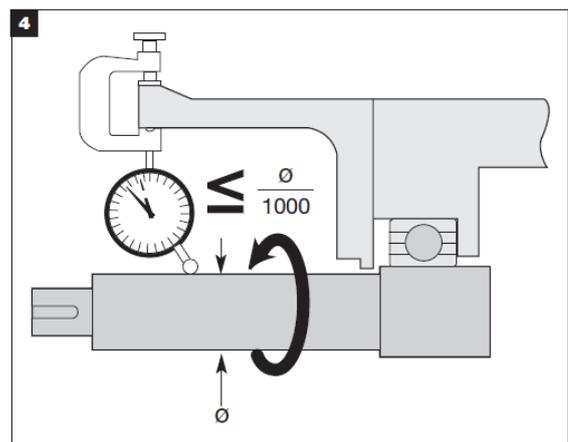
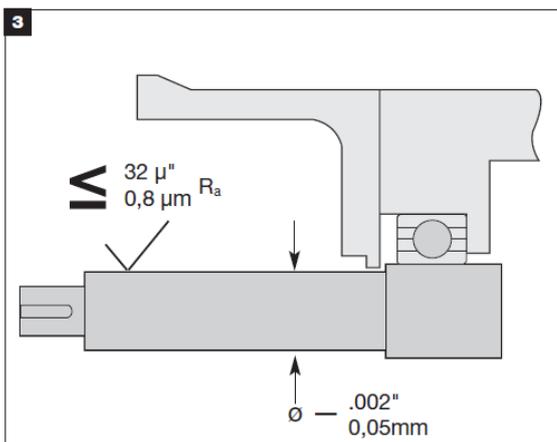
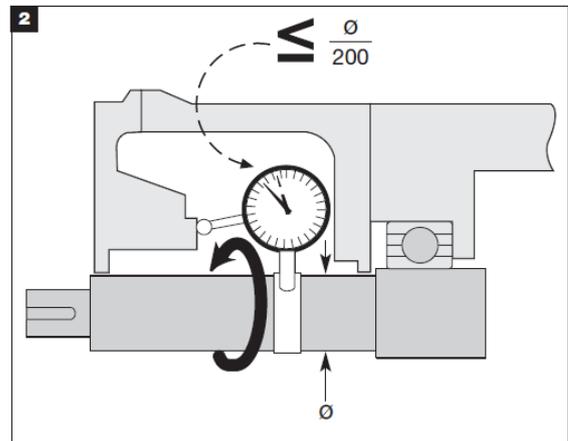
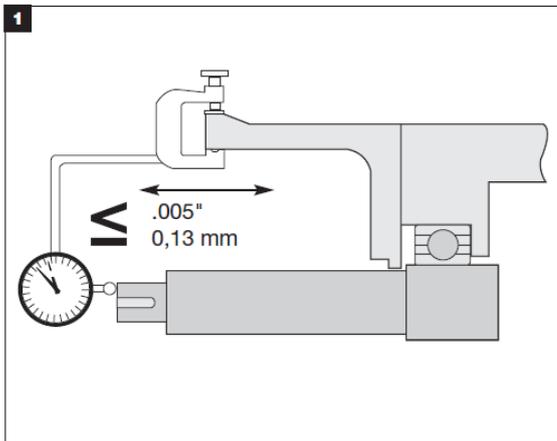
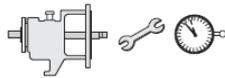
1. FOR HYDROCARBON STREAMS, PARAFFNIC BASED HIGH PURITY OILS HAVING LITTLE OR NO ADDITIVES FOR WEAR / OXIDATION RESISTANCE OR SYNTHETIC BASED OILS HAVE BEEN USED SUCCESSFULLY.
2. ANTI-WEAR / OXIDATION RESISTANT ADDITIVES IN COMMERCIAL TURBINE OILS HAVE BEEN KNOWN TO PLATE OUT ON SEAL FACES.

INSTALLATION

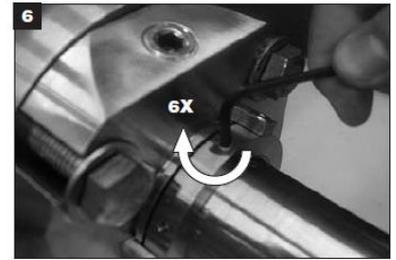
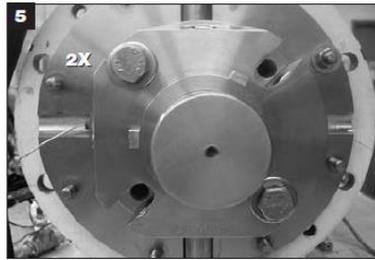
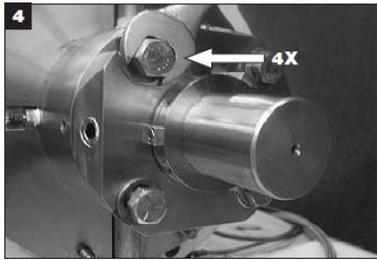
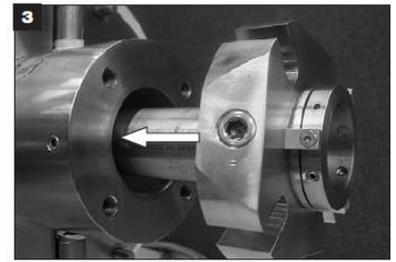
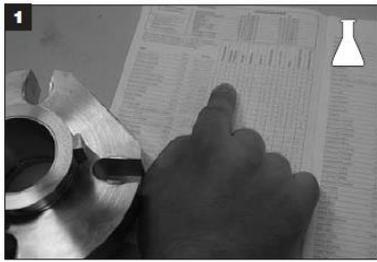
1. THE RESERVOIR IS MOUNTED VERTICALLY NOT MORE THAN 2 TO 3 FEET FROM THE VERTICAL CENTERLINE OF THE STUFFING BOX TO THE VERTICAL CENTERLINE OF THE RESERVOIR. THE BOTTOM OF THE RESERVOIR IS MOUNTED 12 TO 24 INCHES ABOVE THE HORIZONTAL CENTERLINE OF THE PUMP.
2. ALL LINES FROM THE SEAL CAVITY TO THE RESERVOIR SHOULD SLOPE UPWARD AT ALL POINTS. THE UPWARD SLOPE SHOULD BE A MINIMUM OF ¼" PER FOOT WITH ALL BENDS BEING LARGE RADIUS. A MINIMUM ½" PIPE OR 5/8" TUBING SHOULD BE USED.
3. CONNECT THE SUPPLY CONNECTION (LOWER SEAL CONNECTION ON THE RESERVOIR) TO THE BOTTOM (INLET) GLAND CONNECTION.
4. CONNECT THE RETURN CONNECTION (UPPER SEAL CONNECTION ON THE RESERVOIR) TO THE UPPER (OUTLET) GLAND CONNECTION.
5. IF VALVES ARE USED TO ISOLATE THE SEAL CHAMBER AND THE RESERVOIR MAKE SURE THESE ARE FULLY OPEN WHILE FILLING AND DURING OPERATION.
6. IF THE RESERVOIR IS EQUIPPED WITH COOLING COILS CONNECT WATER LINES TO RESERVOIR.
7. CONNECT WIRING TO ANY INSTRUMENTS INCLUDED WITH THE SYSTEM SUCH AS A PRESSURE SWITCH OR LEVEL SWITCH.
8. IF THE SYSTEM IS EQUIPPED WITH A WELD PAD LEVEL GAUGE THE BOLTS ON THE COVER SHOULD BE RETORQUED TO 20 FT/LBS. (TIGHTEN IN 5 FT/LB INCREMENTS STARTING WITH THE CENTER BOLTS AND WORKING OUT)
9. CONNECT VENT CONNECTION TO FLARE OR VAPOR RECOVERY SYSTEM. DO NOT OPEN VENT VALVE UNTIL RESERVOIR HAS BEEN FILLED WITH BARRIER FLUID.
10. FILL RESERVOIR WITH BARRIER FLUID TO THE MIDDLE OF THE SIGHT GLASS. THE GAS VOLUME OF THE SYSTEM SHOULD BE AT LEAST 25 PERCENT OF THE RESERVOIR VOLUME TO ALLOW FOR THERMAL EXPANSION DURING OPERATION.
11. BEFORE STARTING THE SYSTEM, BLEED ALL AIR FROM HIGHEST POINT IN THE SYSTEM.
12. CONNECT EXTERNAL PRESSURIZATION TO RESERVOIR ON PLAN 53 (DOUBLE SEAL). A PRESSURE REGULATOR AND CHECK VALVE ARE REQUIRED TO MAINTAIN A CONSTANT PRESSURE ON THE SYSTEM. THE PRESSURE IN THE RESERVOIR SHOULD BE MAINTAINED AT LEAST 25 PSI ABOVE THE SEAL CAVITY PRESSURE. **MAKE SURE RESERVOIR IS FILLED BEFORE PRESSURIZING.**

Anexo 7: Instrucciones de instalación sello mecánico 150

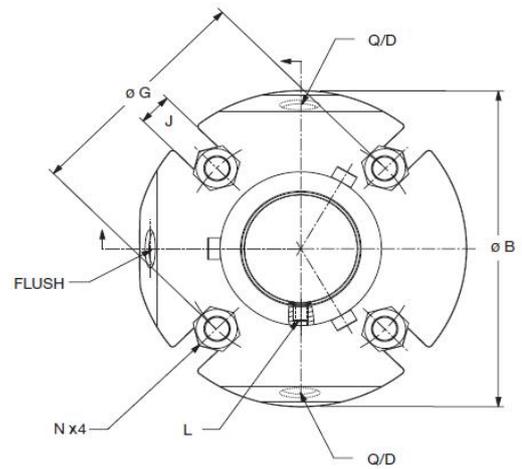
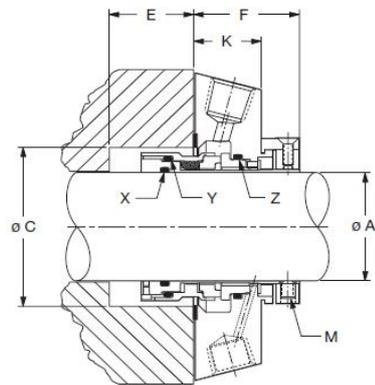
150™ Single Cartridge Seal



<<Continuación>>



A	25 mm — 60 mm (1" — 2.50")	65 mm — 120 mm (2.625" — 4.75")
L 	5,7 — 6,8 Nm (50 — 60 in-lbf)	7,3 — 8,3 Nm (65 — 75 in-lbf)
M 	5,7 — 6,8 Nm (50 — 60 in-lbf)	7,3 — 8,3 Nm (65 — 75 in-lbf)
N 	27 — 40 Nm (20 — 30 in-lbf)	34 — 48 Nm (25 — 35 in-lbf)



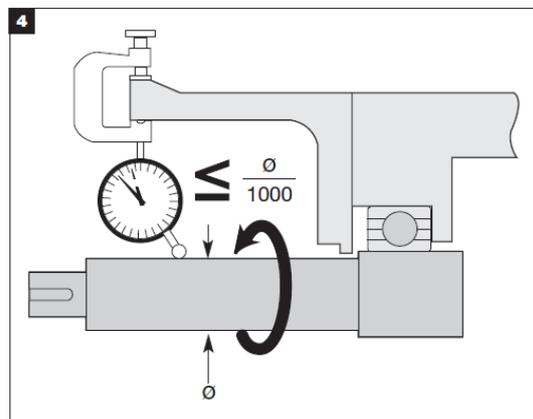
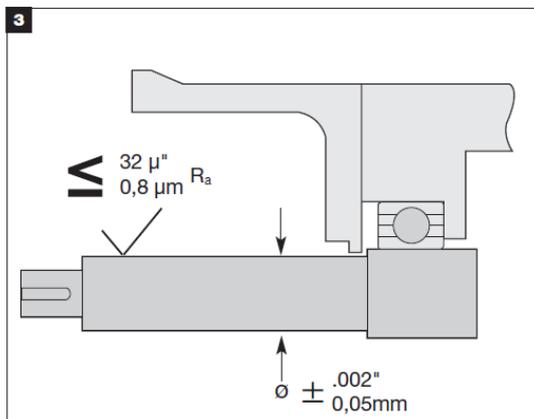
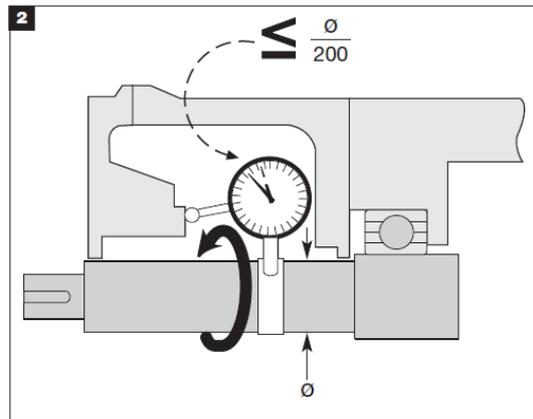
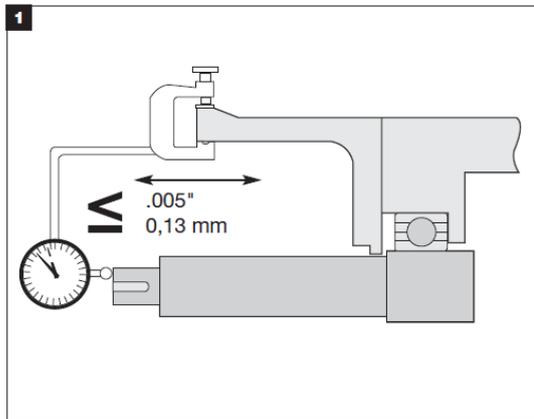
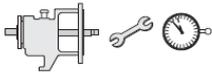
<<Continuación>>

INCH (XS - SM - OS)

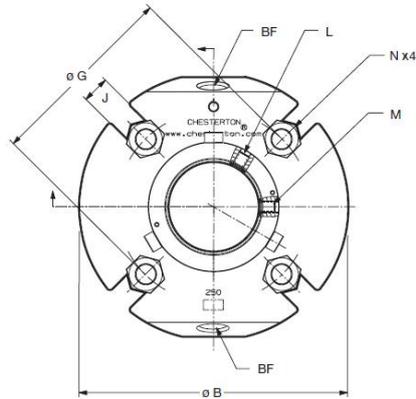
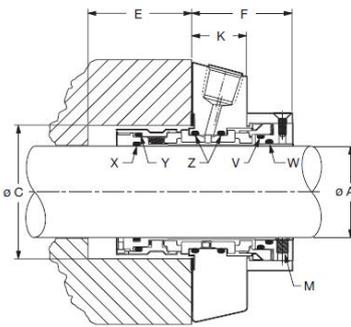
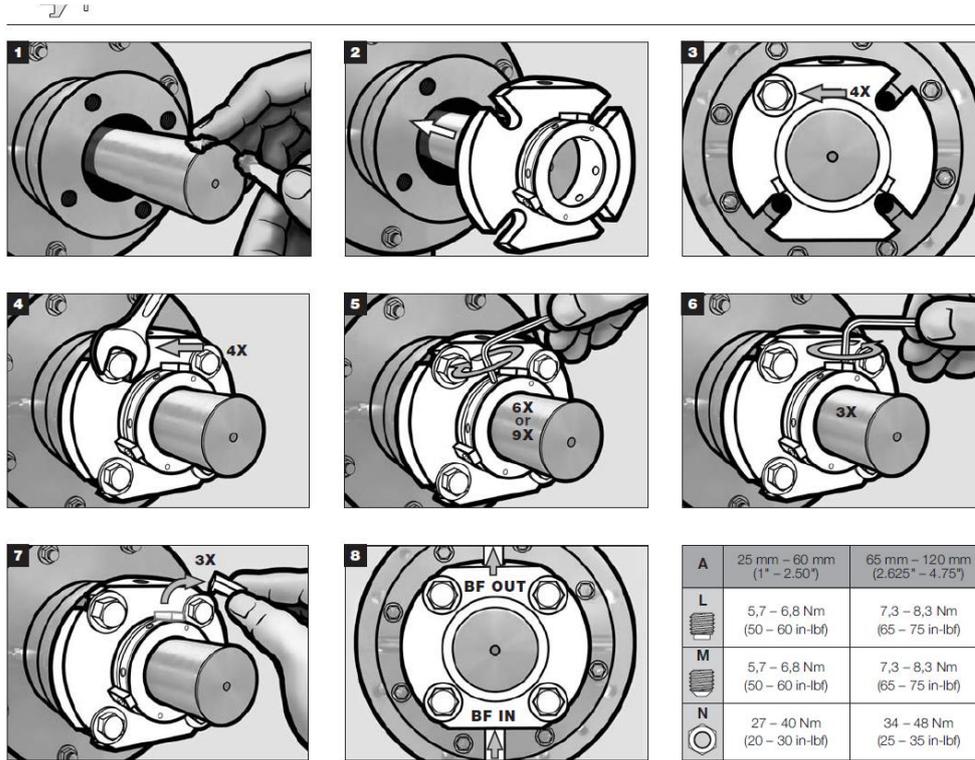
A	B	C		E MIN	F	G MIN				J	K	X	Y	Z
		MIN	MAX			3/8"	1/2"	5/8"	3/4"					
0.938	4.11	1.63	2.01	0.78	1.81	2.88	-	-	-	0.44	1.12	119	027	126
1.000	4.11	1.63	2.01	0.78	1.81	2.88	-	-	-	0.44	1.12	120	027	126
1.063	4.11	1.75	2.04	0.78	1.81	2.88	-	-	-	0.44	1.12	121	028	128
1.125	4.11	1.75	2.04	0.78	1.81	2.88	-	-	-	0.44	1.12	122	028	128
1.125 OS	4.49	2.50	2.75	0.78	1.81	3.71	-	-	-	0.44	1.12	122	028	128
1.188	4.11	1.88	2.27	0.78	1.81	3.12	-	-	-	0.44	1.12	123	029	130
1.250	4.11	1.88	2.27	0.78	1.81	3.12	-	-	-	0.44	1.12	124	029	130
1.313	4.36	2.00	2.33	0.78	1.81	3.13	3.25	-	-	0.57	1.12	125	030	132
1.375	4.36	2.00	2.33	0.78	1.81	3.13*	3.25*	-	-	0.57	1.12	125	030	132
1.375 OS	5.39	2.68	3.00	0.78	1.81	4.03	-	-	-	0.44	1.12	126	030	132
1.438	4.49	2.25	2.62	0.86	1.75	3.33	3.45	-	-	0.57	1.12	128	134	135
1.500	4.49	2.25	2.62	0.86	1.75	3.33	3.45	-	-	0.57	1.12	128	134	135
1.563	4.99	2.38	2.68	0.86	1.75	3.52	3.65	-	-	0.57	1.12	129	135	137
1.625	4.99	2.38	2.68	0.86	1.75	3.52	3.65	-	-	0.57	1.12	130	136	137
1.688	5.49	2.50	2.81	0.86	1.75	3.62	3.75	-	-	0.57	1.12	131	137	139
1.750	5.49	2.50	2.81	0.86	1.75	3.62	3.75	-	-	0.57	1.12	132	138	139
1.750 OS	6.64	3.37	3.75	0.86	1.75	5.21	5.33	-	-	0.57	1.12	132	138	139
1.813	5.49	2.63	2.94	0.86	1.75	3.75	3.87	-	-	0.57	1.12	134	140	141
1.875	5.49	2.63	2.94	0.86	1.75	3.75*	3.87*	-	-	0.57	1.12	134	140	141
1.875 OS	5.99	3.42	3.81	0.86	1.75	-	4.80	-	-	0.57	1.12	134	140	141
1.938	5.49	2.75	3.19	0.86	1.75	4.00	4.13	-	-	0.57	1.12	136	141	143
2.000	5.49	2.75	3.19	0.86	1.75	4.00	4.13	-	-	0.57	1.12	136	142	143
2.063	5.99	2.88	3.44	0.86	1.75	4.25	4.38	4.50	-	0.69	1.12	138	144	145
2.125	5.99	2.88	3.44	0.86	1.75	4.25	4.38	4.50	-	0.69	1.12	138	144	145
2.125 OS	6.99	3.75	4.25	0.86	1.75	-	-	5.37	-	0.69	1.12	138	144	145
2.188	5.99	3.00	3.56	0.86	1.75	4.37	4.50	4.62	-	0.69	1.12	140	146	147
2.250	5.99	3.00	3.56	0.86	1.75	4.37	4.50	4.62	-	0.69	1.12	140	146	147
2.313	5.99	3.13	3.59	0.86	1.75	4.43	4.56	4.68	-	0.69	1.12	142	148	149
2.375	5.99	3.13	3.59	0.86	1.75	4.43	4.56	4.68	-	0.69	1.12	142	148	149
2.375 OS	8.40	4.13	4.50	0.86	1.75	-	-	5.62	-	0.69	1.12	142	148	149
2.438	6.49	3.25	3.81	0.86	1.75	4.62	4.75	4.87	-	0.69	1.12	144	150	151
2.500	6.49	3.25	3.81	0.86	1.75	4.62	4.75	4.87	-	0.69	1.12	144	150	151
2.500 OS	7.77	4.37	4.75	0.86	1.75	-	-	6.37	-	0.69	1.12	144	150	151
2.563	6.45	3.38	3.94	0.86	1.75	4.90	5.02	5.15	-	0.69	1.12	146	151	152
2.625	6.45	3.38	3.94	0.86	1.75	4.90	5.02	5.15	-	0.69	1.12	146	151	152
2.625 OS	6.98	4.38	4.78	0.86	1.75	-	-	5.90	-	0.69	1.12	146	151	152

Anexo 8: Instrucciones de instalación de sello mecánico 250

250™ Double Cartridge Seal



<<Continuación>>



METRIC (XS - SM)

A	B	C		E	F	G MIN			J	K	V	W	X	Y	Z
		MIN	MAX			10 mm	12 mm	16 mm							
25 mm	104	41	51	36.6	52.3	73	-	-	11.2	28	123	122	120	027	126
28 mm	104	44	52	36.6	52.3	73	-	-	11.2	28	125	123	122	028	128
30 mm	104	46	57	36.6	52.3	78	-	-	11.2	28	126	125	123	028	129
32 mm	104	48	58	36.6	52.3	80	-	-	11.2	28	127	126	124	029	130
33 mm	113	49	59	36.6	52.3	81	83	-	14.5	28	128	127	125	029	131
35 mm	111	51	59	36.6	52.3	80	82	-	14.5	28	129	128	126	030	132
38 mm	114	57	67	38.8	52.3	85	87	-	14.5	29	133	130	128	134	135
40 mm	126	59	68	38.8	52.3	90	92	-	13.6	29	134	131	129	135	137
43 mm	126	62	69	38.8	52.3	91	93	-	13.6	29	136	133	131	137	139
45 mm	139	64	73	38.8	52.3	95	97	-	13.6	29	137	134	133	138	140
48 mm	139	67	73	38.8	52.3	95	97	-	13.6	29	139	136	134	140	142
50 mm	139	69	78	38.8	52.3	100	102	-	13.6	29	140	137	136	141	143
53 mm	152	73	87	38.8	52.3	109	111	115	17.5	29	143	140	138	144	145
55 mm	152	74	83	38.8	52.3	105	107	111	17.5	29	143	141	139	145	146
58 mm	152	80	91	38.8	52.3	114	116	120	17.5	29	147	144	141	148	149
60 mm	152	80	91	38.8	52.3	114	116	120	17.5	29	147	144	142	148	149
63 mm	165	83	97	38.8	52.3	119	121	125	17.5	29	149	146	144	150	151
65 mm	164	86	100	38.8	52.3	125	127	131	17.5	29	150	148	145	151	152
68 mm	165	86	100	38.8	52.3	125	127	131	17.5	29	151	149	147	151	152

Anexo 9: Registro fotográfico de la evolución del desempeño propuesta de sellado 150 + 14K

- Inspección a los 03 meses de funcionamiento



- Inspección a los 15 meses de funcionamiento



- Inspección a los 20 meses de funcionamiento



- Inspección a los 21 meses de funcionamiento



**Anexo 10: Registro fotográfico de la evolución del desempeño propuesta de sellado
250 + tanque auxiliar de fluido de barrera**

- Sistema de sellado instalado



Sello mecánico
propuesto
250 + tanque

Sello antiguo 06 meses funcionamiento



Sello 250 15 meses funcionamiento



- Sellos con 15 meses de funcionamiento



- Sello mecánico con 26 meses de funcionamiento



Anexo 11: Formato de seguimiento propuesta de sellado 150 + 14K

FORMATO B004

SEGUIMIENTO DE SELLO MECANICO INSTALADO



EMPRESA	CASAGRANDE S.A.	AREA	LAVADEROS
FECHA DE INSTALACION	23/04/2014	INFORME N°	

IDENTIFICACION DE EQUIPO

EQUIPO	CIRCULACION JUGO # 17	MARCA	GOULDS	FLUIDO	JUGO CRUDO
MODELO	3198 S	N° SERIE		CONCENTRACION	13°BRIX
RPM	1750	P. DESCARGA	3 bar	T. °C	60°C

SISTEMA DE SELLADO ANTERIOR

ESTOPAS SELLO MECANICO

MARCA	EMPAQUETADURAS	FRECUENCIA RECAMBIO	SEMANAL
ESTILO/MODELO	PILOTPACK 5051	MBTR	2 MESES

SELLO MECANICO INSTALADO CHESTERTON 150 + 14K

RANGOS DE OPERACIÓN:		
205°C	20 BAR	Hasta 3600 rpm

CARA ESTACIONARIA	SSC	O'RING	AFLAS	PRISIONEROS	318
CARA ROTATIVA	SSC	RESORTES	HASTELLOY	DURACION	21 MESES

FECHA DE INSPECCION	Año	2014		2014		2014		2014		2015		2015		2015		2015		2015		2016	
	Mes	04	06	08	11	12	01	04	06	08	07	08	09	11	01						
	Día	23	18	26	05	10	21	21	27	22	20	20	26	17	27						
PIEZAS METALICAS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
CARA ESTACIONARIA	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	REVISAR
CARA ROTATIVA	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	REVISAR
O'RING	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	REVISAR
RESORTES	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	REVISAR
PRISIONEROS	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	REVISAR
BUJE RESTRICTIVO 14 K	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	REVISAR
FUGA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	LIGERA

Observaciones

SE INSTALA SISTEMA DE SELLADO 150 + 14K EN BOMBAS DE CIRCULACION DE DIFUSOR, EL SISTEMA INCLUYE UNA LINEA DE AGUA (FLUSHING) DIRECTA AL SELLO MECANICO (PUERTO DE FLUSHING).

SE TOMA LA LINEA DE AGUA DESPUES DEL MANOMETRO DE CONTROL, DE MANERA QUE NO SE AFECTA EL BALANCE DE INGRESO DE AGUA

* SE OBSERVO OBSTRUCCION EN LA LINEA DE SUMINISTRO DE AGUA DE FLUSHING AL SELLO; ESTO PUEDE AFECTAR EL DESEMPEÑO DEL SELLO MECANICO, AL NO TENER UNA LIMPIEZA CONSTANTE.

EN LA INSPECCION DEL 27/01/2016 SE OBSERVA LIGERA CAMELIZACION EN EL ANILLO DE ARRASTRE DEL SELLO MECANICO, LO QUE PUEDE SIGNIFICAR UNA LIGERA FUGA POR DESGASTE DE LAS CARAS DEL SELLO. SE RECOMIENDA REVISAR SELLO MECANICO Y CAMBIAR KIT DE REPARACION ANTES QUE LA FUGA AUMENTE.

LA BOMBA EN EVALUACION HA TRABAJADO DE MANERA CONSTANTE SIN SER REPARADA Y/O DESMONTADA DURANTE TODO ESTE PERIODO.

