

Análisis técnico económico y financiero de implementación de sistema osmosis inversa para el tratamiento del agua de alimentación de la caldera pirotubular de 400 BHP marca Apin para aumentar la producción de vapor en la empresa Alicorp S.A.A – Trujillo.

Technical economic and financial analysis of the implementation of a reverse osmosis system for the treatment of the feed water of the pirotubular boiler of 400 BHP brand Apin to increase steam production in the company Alicorp S.A.A – Trujillo.

Willian Rafael Cotrina Castañeda¹

RESUMEN:

El presente estudio de investigación, pretende determinar la factibilidad técnica económica de implementación de sistema de osmosis inversa en reemplazo de ablandadores de resina sintética para el tratamiento de la dureza del agua de alimentación del caldero pirotubular de 400 BHP de la empresa Alicorp S.A.A y lograr aumentar la generación de vapor saturado. El análisis actual, determino que el flujo másico de purgas con ablandadores es 1692 Kg/h con un rendimiento energético de 74.92%. Con la implementación de un sistema de osmosis inversa, se redujo el flujo másico de purgas a 54.18 Kg/h, permitiendo que el flujo másico de vapor incremente a 4917.82 Kg/h, con un ahorro en petróleo residual N°6 de 5 gal/h, incrementando el rendimiento energético a 81.55%. El análisis económico, permitió obtener un beneficio de 105807.56 S./año, con una inversión inicial de 124040.00 S./ y un periodo de retorno de la inversión de 1.17 años. El análisis financiero, arrojó un valor actual neto de 85431 \$, con una tasa interna de rentabilidad de 81%, estableciendo que el proyecto es factible.

Palabras claves: Sistema de osmosis inversa, Producción de vapor, Caldero pirotubular

ABSTRACT:

The present research study aims to determine the economic technical feasibility of implementing a reverse osmosis system in replacement of synthetic resin softeners for the treatment of the hardness of the feed water of the 400 BHP pirotubular cauldron from the company Alicorp SAA and to increase the generation of saturated steam. The current analysis, determined that the mass flow of purges with softeners is 1692 Kg / h with an energy efficiency of 74.92%. With the implementation of a reverse osmosis system, the mass flow of purges was reduced to 54.18 Kg / h, allowing the mass flow of steam to increase to 4917.82 Kg / h, with a saving in residual oil No. 6 of 5 gal / h, increasing the energy yield to 81.55%. The economic analysis allowed to obtain a profit of 105807.56 S./year, with an initial investment of 124040.00 S. / and a return period of the investment of 1.17 years. The financial analysis showed a net present value of \$ 85431, with an internal rate of return of 81%, establishing that the project is feasible.

Key words: Reverse osmosis system, Steam production, Pirotubular cauldron

¹ Universidad César Vallejo - Estudiante de Ingeniería Mecánica Eléctrica
E-mail: Rafael_02_29@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN:

La planta fuerza de la empresa Alicorp S.A.A, dedicada a la generación de vapor saturado para los distintos procesos de transformación, tiene problemas con la producción de vapor del caldero de 400BHP a 120Psig, el cual está diseñado para producir 6264 Kg/h, pero solo produce 3280 Kg/h, es decir trabaja al 52.40% de la carga máxima, existiendo deficiencia de producción de vapor debido al mal tratamiento del agua de alimentación que actualmente se hace a través de ablandadores de resina sintética zeolita, (Departamento de Mantenimiento Empresa Alicorp S.A.A, 2014).

En actual sistema de tratamiento de agua de alimentación del caldero, a través de 2 ablandadores, los cuales tratan el agua de pozo con una dureza en solidos disueltos totales de 1350ppm, reduciéndola solo a 1020ppm, conduciendo que el caldero tenga un exceso de flujo másico en purgas continuas (figura 01). Según lo establecido en la norma UNE 9075 y en las NTP 350.301, la dureza del agua de alimentación permisible en caldera debe ser 300ppm con ablandadores y 16 ppm con sistemas de osmosis inversa, (Ministerio Energía y Minas, 2010).

El deficientemente tratamiento del agua de alimentación, trae dificultades en la operación del caldero de 400 BHP, como la elevación de la temperatura de los gases de chimenea de 265°C, sobrepasando los valores permisibles de 150°C a 200°C, originando el incremento del flujo másico de petróleo industrial N°6 y la caída de la eficiencia energética, (Ministerio Energía y Minas, 2010).

A consecuencia de lo expuesto, se plantea el diseño de un sistema de tratamiento de agua por osmosis inversa capaz de retener el 95% de la dureza contenida en los sólidos disueltos del agua de pozo, para obtener un mínimo de 48.75 ppm en el agua de alimentación (figura 02), logrando de esta manera

aumentar la producción de vapor satura, incrementar la eficiencia y reducir los costos en consumo de combustible.

2. TRABAJOS PREVIOS:

Andrade (2005), detalla el estudio de una caldera pirotubular de 800BHP, el cual en condiciones iniciales con ablandadores produce 7516.8 Kg/h, trabajando a un 60% de su carga máxima, con una presión de 130Psig, con agua de alimentación de 850ppm proveniente de agua de río, con una dureza en purgas de 3500ppm, con un consumo de combustible de 120 gal/h, con un rendimiento energético de 72%. Pero con la implementación de un sistema de osmosis inversa la dureza del agua de alimentación se redujo 60ppm, la capacidad del caldero incremento a 81%, incrementando el rendimiento del caldero a 83%, con un beneficio económico de 55000.00 \$/año, con una inversión de 58000.00 \$/año y un periodo de retorno de la inversión de 1.05 años.

Pírela (2008), expone el estudio de 4 calderas pirotubulares con una potencia de instalación total de 3000BHP, las cuales cuentan con un sistema de tratamiento de agua por 3 ablandadores, los cuales tratan el agua de pozo de 800ppm a 500ppm, con una capacidad de carga de los calderos de producción de vapor de 72%, con un rendimiento energético de 70%, implementando un sistema de osmosis inversa reduciendo la dureza del agua de alimentación hasta el valor medio de 25ppm, aumentando el rendimiento del caldero a 85% y la producción de vapor saturado a 86%, con un beneficio en ahorro en sal de 220000.00 S./año.

Piña (2010), describe el análisis general comparativo de análisis de sistemas de tratamiento de agua de alimentación por ablandadores y osmosis inversa en calderas pirotubulares con petróleo residual N°6, detallando que con la implementación de osmosis inversa el aumento de producción de vapor es en

promedio del 10 a 15%, el rendimiento energético de 5 a 8% y el ahorro de combustible de 3 a 7 gal/h.

3. TEORÍAS RELACIONADAS AL TEMA

- Eficiencia energética de una caldera: Se fundamenta en determinar las 6 pérdidas principales ocurridas en un caldero, tales como: pérdida por gases residuales, pérdida por convección pared – medio ambiente, pérdida por acumulación de hollín en tubos de fuegos, pérdida por combustión incompleta, pérdida por radiación y pérdida por purgas, (Broatch, 2010).

$$\eta_{\text{energ}} = 100\% - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6) \%$$

Dónde:

- L_1 : Pérdida de calor por gases residuales [%]
- L_2 : Pérdida de calor por combustión incompleta [%]
- L_3 : Pérdida de calor por calor hollín [%]
- L_4 : Pérdida de calor por purgas [%]
- L_5 : Pérdida de calor por convección [%]
- L_6 : Pérdida de calor por radiación [%]

Pérdida de calor por gases residuales: Es la pérdida más relevante y de mayor porcentaje en una caldera, (Beltrán, 2008).

$$L_1 = \frac{H_1}{H_T} * 100\%$$

Dónde:

- H_1 : Es la potencia pérdida por gases residuales [KW]
- H_T : Es la potencia total de la combustión aire y combustible [KW]

$$H_1 = \dot{m}_{wg} * \overline{C_{Pwg}} * (T_{wg} - T_e)$$

Dónde:

- \dot{m}_{wg} : Flujo másico de gases residuales [Kg/s]
- $\overline{C_{Pwg}}$: Calor específico promedio de la mezcla gas y aire [KJ/Kg°C]

- T_{wg} : Temperatura de gases residuales [°C]
- T_e : Temperatura del medio ambiente [°C]

Pérdida de calor por combustión incompleta:

Involucra los gases presentes en la combustión, tales como: monóxido de carbono, hidrogeno y metano (CO , H_2 y CH_4), (Beltrán, 2008).

$$L_2 = \frac{H_2}{H_T} * 100\%$$

Dónde:

- H_2 : Es la potencia pérdida por combustión incompleta [KW]
- H_T : Es la potencia total de la combustión aire y combustible [KW]

$$H_2 = \dot{V}_{wg} * r_{co} * PCI_{co}$$

Dónde:

- \dot{V}_{wg} : Flujo volumétrico de los gases residuales [$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$]
- r_{co} : Participación volumétrica del monóxido de carbono.
- PCI_{co} : Poder calorífico inferior volumétrico del monóxido de carbono [KJ/Kg], teniendo un valor promedio de $12720 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}$

Pérdida de calor por Hollín: Se debe a la acumulación de hollín en las paredes de los tubos de fuego, debido a la mala calidad del combustible, (Beltrán, 2008).

$$L_3 = \frac{H_3}{H_T} * 100\%$$

Dónde:

- H_3 : Es la potencia pérdida por Hollín [KW]
- H_T : Es la potencia total de la combustión aire y combustible [KW]

$$H_3 = \dot{m}_{wg} * g_c * PCI_c$$

Dónde:

- \dot{m}_{wg} : Flujo másico de gases residuales [Kg/s]
- g_c : Participación másica del carbono.
- PCI_c : Poder calorífico inferior del carbono [$\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$], tiene el valor de 32714.7 KJ/Kg

Pérdida de calor por purgas: Se debe a la acumulación de una capa de caliche en la superficie lateral exterior de los tubos de fuego, que impide la completa transferencia de calor de los gases de combustión hacia el agua, (Beltrán, 2008).

$$L_4 = \frac{H_4}{H_T} * 100\%$$

Dónde:

H_4 : Es la potencia pérdida por purgas [KW]

H_T : Es la potencia total de la combustión aire y combustible [KW]

$$H_4 = \dot{m}_{\text{purgas}} * (h_f - h_{\text{agua}})$$

Dónde:

- \dot{m}_{purgas} : Flujo másico de purgas [Kg/s].

- h_f : Entalpia especifica del líquido saturado de purgas [KJ/Kg].

- h_{agua} : Entalpia del agua de alimentación [KJ/Kg].

El flujo másico de purgas, se determina en base a los sólidos disueltos totales del agua de alimentación y purga, (Beltrán, 2008):

$$\dot{m}_{\text{purgas}} = \dot{m}_s * \left(\frac{SDT_w}{SDT_b - SDT_w} \right)$$

Dónde:

- \dot{m}_s : Flujo másico de vapor saturado [Kg/s].

- SDT_w : Sólidos disueltos totales del agua de alimentación [ppm].

- SDT_b : Sólidos totales disueltos permisibles en la caldera [ppm].

Pérdida de calor por convección: Es provocada por la elevada temperatura de las paredes exteriores de los calderos y a la exposición de ráfagas de vientos, (Beltrán, 2008).

$$L_5 = \frac{H_5}{H_T} * 100\%$$

Dónde:

H_5 : Es la potencia pérdida por convección [KW]

H_T : Es la potencia total de la combustión aire y combustible [KW]

$$H_5 = \frac{S_b * h_{wb \rightarrow e} * (T_{wb} - T_e)}{1000}$$

Dónde:

S_b : Superficie lateral exterior de la caldera [m^2].

$h_{wb \rightarrow e}$: Coeficiente de transferencia de calor [$W/m^2 \cdot ^\circ C$].

T_{wb} : Temperatura de la pared exterior lateral del caldero [$^\circ C$].

T_e : Temperatura del medio ambiente [$^\circ C$].

Pérdida de calor por radiación: Se origina debido a la deficiencia de la llama de combustión, la cual pierde temperatura en la cámara de combustión debido a la superficie lateral del hogar, (Beltrán, 2008):

$$L_6 = \frac{H_6}{H_T} * 100\%$$

Dónde:

H_6 : Es la potencia pérdida por radiación [KW]

H_T : Es la potencia total de la combustión aire y combustible [KW]

$$H_6 = \frac{\epsilon_h * \sigma * S_h * (T_{hg}^4 - T_{p_{cc}}^4)}{1000}$$

Dónde:

- ϵ_h : Emisividad del hogar

- σ : Constante de Stefan-Boltzmann, $5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

S_h : Superficie lateral del hogar [m^2].

T_{hg} : Temperatura de gases calientes [$^\circ K$].

$T_{p_{cc}}$: Temperatura de la pared del hogar [$^\circ K$].

- **Calor de combustión:** Es la suma de los calores en combustión aire y combustible, (Beltrán, 2008)

$$H_T = H_a + H_f$$

Es decir:

$$H_T = (\dot{m}_a * C_{p_a} * T_a) + \dot{m}_f * (PCI + C_{p_f} * T_f)$$

Dónde:

- H_T : Potencia calorífica total [KW]

- H_a : Potencia calorífica del aire [KW]

- H_f : Potencia calorífica del combustible [KW]
- PCI: Poder calorífico inferior [KJ/Kg]
- \dot{m}_a : Flujo másico de aire [Kg/seg]
- $\dot{m}_f = \dot{m}_c$: Flujo másico de combustible [Kg/seg]
- C_{p_f} : Calor específico a presión constante del aire [KJ/Kg°C]
- C_{p_c} : Calor específico a presión constante del combustible. [KJ/Kg°C]
- T_a : Temperatura del aire en quemador [°C]
- T_f : Temperatura del combustible [°C]

- **Poder calorífico inferior de combustible:** El poder calorífico se define como la cantidad de calor que entrega una unidad de masa de combustible al oxidarse en su totalidad, (Amau, 2010).

El poder calorífico inferior para un combustible líquido, (Amau, 2010):

$$PCI = PCS - 1030$$

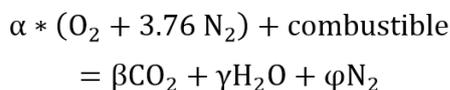
Dónde:

- PCS: Poder calorífico inferior [BTU/Lb]

$$PCS = 18320 + 40 * (^{\circ}API - 10)$$

- $^{\circ}API$: Instituto Americano del Petróleo.

- **Balance en combustión completa:** Refiere a que existe la cantidad completa de comburente para oxidar todas las partículas del combustible como el carbono, hidrogeno y nitrógeno, (Capcha, 2007):



Donde:

- α : Número de moles del oxigeno [Kg/Kmol]
- β : Número de moles del dióxido de carbono [Kg/Kmol]
- γ : Número de moles del agua [Kg/Kmol]
- φ : Número de moles del nitrógeno [Kg/Kmol]

- **Ratio de combustión:** Es la relación de la masa de aire en combustión incompleta y la masa del com-

bustión incompleta y la masa del combustible. Refleja el consumo másico de aire en referencia a un 1 Kg de combustible, (Incropera, 2009):

$$r_{(a/c)} = \frac{m_a}{m_c} = \frac{\theta * a_t * (O_2 + 3.76 N_2)}{m_c}$$

Dónde:

- $r(a/c)$: Relación aire combustible [Kgaire/Kgcble]

- **Periodo de retorno de la inversión:** Es una medida de cuantificación que determina el periodo de tiempo que se requiere para que los flujos netos de efectivo de una inversión recuperen su inversión inicial, (Sowell, 2013).

$$PRI = \frac{I}{B}$$

Dónde:

- ROI: Retorno operacional de la inversión [años]
- I: Inversión para la ejecución del proyecto [\$]
- B: Beneficio logrado por el proyecto [\$/año]

- **Valor actual neto:** Es un método de valoración de inversiones que puede definirse como la diferencia entre el valor actualizado de los cobros y de los pagos generados por una inversión, (Sowell, 2013).

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+r)^t} - I_0$$

Dónde:

- VAN : Valor actual neto [\$]
- V_t : Flujos de caja en cada tiempo [€]
- r: Interés [%]
- t: Número de períodos considerados [años]
- I_0 : Valor del desembolso inicial de la inversión [€]

- **Tasa interna de retorno:** Es la tasa efectiva anual o tasa de descuento que hace que los valores actuales netos de todos los flujos de efectivo de una determinada inversión sean igual a cero, (Sowell, 2013).

$$\sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 = 0$$

Dónde:

- TIR: Tasa interna de retorno [%]
- VAN: Valor actual neto [\$]
- V_t : Flujos de caja en cada tiempo [\$]
- t: Número de períodos considerados [años]
- I_0 : Valor del desembolso inicial de la inversión [\$]

4. OBJETIVOS:

4.1 Objetivo General:

- Implementar un sistema de osmosis inversa para el tratamiento de agua de alimentación de la caldera pirotubular Apin de 400 BHP en la empresa Alicorp S.A.A, Trujillo.

4.2 Objetivos Específicos:

- Realizar un análisis actual al caldero pirotubular de 400 BHP con sistema de tratamiento de agua por ablandadores, determinando el flujo másico de purgas y rendimiento energético por el método indirecto.

- Realizar un análisis de mejora al caldero pirotubular de 400 BHP con sistema de tratamiento de agua por osmosis inversa, determinando flujo másico de purgas, incremento de flujo másico de vapor, ahorro de flujo másico de combustible y rendimiento energético.

- Dimensionar y seleccionar la bomba hidráulica, de transporte de agua de alimentación entre el equipo de osmosis de inversa y el caldero pirotubular de 400BHP.

- Realizar un análisis económico, para determinar el beneficio útil, mediante el ahorro en sal, agua y combustible. Asimismo, el cálculo de la inversión en activos fijos y periodo de retorno de la inversión.

- Realizar un análisis financiero de factibilidad del proyecto, mediante el valor actual neto y la tasa interna de rentabilidad.

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES:

- Análisis actual al caldero pirotubular de 400 BHP con ablandadores:

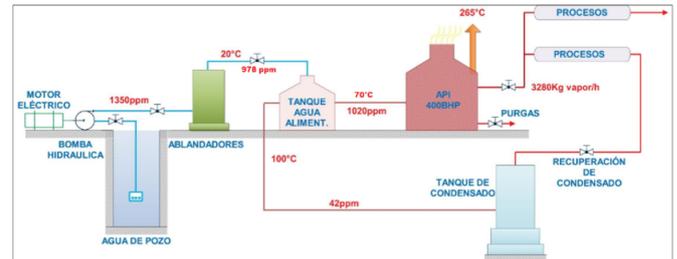


Figura 01: Sistema actual de tratamiento de agua de alimentación por ablandadores para caldero pirotubular de 400BHP, empresa Alicorp S.A.A, 2014.

En la figura 01, se muestra el actual sistema de tratamiento de agua por ablandadores, donde el caldero pirotubular de 400 BHP produce 3280 Kg/h de vapor saturado, con agua de alimentación a 70°C. La dureza del agua de pozo promedio es 1350 ppm la cual se reduce a 978 ppm, el condensado tiene una contaminación de 42 ppm, obteniendo una dureza de en el agua de alimentación de 1020 ppm.

Poder calorífico superior e inferior de combustión:

$$PCS = 18320 + 40 * (11.5 - 10) = 18380 \frac{BTU}{lb}$$

Y el poder calorífico inferior, seria:

$$PCI = 18320 - 1030 = 17350 \frac{BTU}{lb} \\ = 40353.28 \text{ KJ/Kg}$$

Ratio de combustión: Mediante el analizador TESTO, obtenemos los parámetros de medición de gases evacuados por el caldero pirotubular:



Figura 02: análisis de gases de chimenea al caldero pirotubular de 400 BHP.

Fuente: Testo, Empresa Alicorp SAA, 2013.

Tabla 01: Parámetros de medición en gases residuales

Parámetro de medición	Valor medio
Temperatura de gases residuales	265°C
Concentración de dióxido de carbono máximo	16.70%
Concentración de oxígeno	8.85%
Exceso de aire en combustión	71.58%
Concentración de dióxido de carbono media.	9.73%

Fuente: Testo, Empresa Alicorp SAA, 2013.

Tabla 02: Composición másico del petróleo residual N°6

Componente	Símbolo	Valor promedio
Carbono	C	86.60%
Azufre	S	1.43%
Hidrogeno	H2	9.27%
Agua	H2O	0.24%
Cenizas	Z	0.06%
		100%

Fuente: Petroperú, 2010.

Tabla 03. Participaciones másicas del petróleo residual N°6

Componente	Masa (Kg)	Peso atómico (Kg/Kmol)	Número de moles (n=m/M)	%n
C	86.6	12	7.216	59.95
S	1.43	32	0.045	0.374
H	9.27	2	4.635	38.508
H O	2.4	18	0.133	1.105
O	0.24	32	0.0075	0.062
Z	0.06		12.0365	100

Fuente: Petroperú, 2010.

$$R_{\text{comb.}}^{\text{aire}} = \frac{X \cdot \lambda \cdot (O_2 + 3.76N_2)}{0.5995C + 0.00374S + 0.38508H_2 + 0.01105H_2O + 0.00062O_2}$$

$$R_{\text{comb.}}^{\text{aire}} = \frac{0.795 \cdot 1.7158 \cdot (32 + 3.76 \cdot 28)}{0.5995 \cdot 12 + 0.00374 \cdot 32 + 0.3850 \cdot 2 + 0.01105 \cdot 18 + 0.00062 \cdot 32}$$

$$R_{\text{comb.}}^{\text{aire}} = 22.6 \text{ Kg aire/Kg comb.}$$

Pérdidas energéticas iniciales en el caldero pirotubular de 400 BHP:

- Pérdida por gases residuales: $(q_p)_{GR} = 14.92\%$
- Pérdida por purgas del caldero: $(q_p)_P = 7.73\%$
- Pérdida por Hollín o inquemados: $(q_p)_H = 0.78\%$
- Pérdida por combustión incompleta: $(q_p)_{ci} = 1.10\%$
- Pérdida por convección: $(q_p)_c = 0.47\%$
- Pérdida por Radiación: $(q_p)_R = 0.91\%$

Donde, el rendimiento energético del caldero en condiciones iniciales:

$$\eta_{\text{cald}} = 100\% - ((q_p)_{GR} + (q_p)_P + (q_p)_H + (q_p)_{ci} + (q_p)_c + (q_p)_R)$$

$$\eta_{\text{cald}} = 100\% - (14.92 + 7.73 + 0.78 + 1.10 + 0.47 + 0.91)\%$$

$$\eta_{\text{cald}} = 74.09\%$$

Y el flujo másico de purgas, con ablandadores es:

$$\dot{m}_{\text{purga}} = 0.911 \cdot \left(\frac{1020}{3000 - 1020} \right) = 0.47 \frac{\text{Kg}}{\text{seg}}$$

$$= 1692 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

- Análisis del caldero pirotubular de 400 BHP con osmosis inversa:

En la figura 03, se detalla la implementación del sistema de osmosis inversa con agua de pozo a 1350ppm que al pasar por las membranas con un rendimiento promedio de 99.5% para retener los SDT, se reduce a 6.75ppm, más los 42ppm del condensado, tendríamos un total en SDT de 48.75-ppm en agua de alimentación a la caldera. También se detalla que en un sistema de osmosis inversa del 100% de flujo de agua, el 40% se rechaza por arras-

tre conteniendo sales que han sido separadas por las membranas, obteniendo 60% de permeado siendo este el porcentaje de flujo de agua útil.

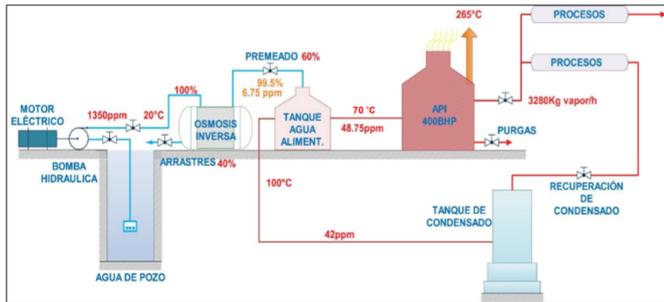


Figura 03: Sistema propuesto de tratamiento de agua de alimentación por osmosis inversa para caldero piro-tubular de 400BHP, empresa Alicorp S. A. A, 2014.

Flujo másico de purgas: Con el sistema de osmosis inversa, el agua de alimentación ingresa a la caldera con una dureza de 48.75ppm y las purgas se evacuarán del caldero cuando el agua tenga una dureza de 3000ppm

$$\dot{m}_{\text{purgas}} = \left(\frac{48.75 \text{ ppm}}{3000 \text{ ppm} - 48.75 \text{ ppm}} \right) * 3280 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{\text{purgas}} = 54.18 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Flujo másico de vapor saturado: Para determinar el incremento del flujo másico de producción del vapor, se debe evaluar la reducción del flujo másico de purgas:

$$\Delta \dot{m}_{\text{purgas}} = 1692 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} - 54.18 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 1637.82 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Podemos decir que al instalar un sistema de osmosis inversa podemos recuperar 1637.82Kg/h, obteniendo un nuevo flujo másico de vapor de:

$$\dot{m}_v = 3280 \frac{\text{vapor}}{\text{h}} + 1637.82 \frac{\text{vapor}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_v = 4917.82 \frac{\text{Kg vapor}}{\text{h}}$$

El ahorro de combustible petróleo residual N°6: Depende del flujo másico de purgas recuperado, para el caso 1637.82 Kg/h.

$$\Delta \dot{m}_{\text{comb}} = \frac{1637.82 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * (742.83 - 292.98) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}}{(22.6 * 1.005 * 20 + 40353.28 + 100 * 2.75) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}}$$

$$\Delta \dot{m}_{\text{comb}} = 17.93 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 5 \frac{\text{Gal}}{\text{h}}$$

Rendimiento energético del caldero piro-tubular de 400 BHP en condiciones de mejora: Empleando el mismo análisis del método indirecto. Podemos decir que la pérdida en mejora de esta tesis, es la reducción de las pérdidas térmicas por purgas.

- Potencia perdida por purgas:

$$(\dot{Q}_P)_P = \frac{54.18 \text{ kg}}{3600 \text{ seg}} * (742.83 - 292.98) \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$(\dot{Q}_P)_P = 6.77 \text{ KW}$$

- Porcentaje de pérdida por purgas:

$$(q_P)_P = \frac{(\dot{Q}_P)_P}{\dot{Q}_{\text{total}}} * 100\%$$

$$(q_P)_P = \frac{6.77 \text{ KW}}{\frac{221.894}{3600} * (22.6 * 1.005 * 20 + 40353.28 + 100 * 2.75)}$$

$$(q_P)_P = 0.27\%$$

Finalmente, el rendimiento del caldero en condiciones de mejora es:

$$\eta_{\text{cald}} = 100\% - ((q_P)_{GR} + (q_P)_P + (q_P)_H + (q_P)_{c,i} + (q_P)_c + (q_P)_R)$$

$$\eta_{\text{cald}} = 100\% - (14.92 + 0.27 + 0.78 + 1.10 + 0.47 + 0.91)\%$$

$$\eta_{\text{cald}} = 81.55\%$$

- Dimensionamiento de la bomba hidráulica: La altura de bombeo desde el eje de la bomba hacia el pozo de succión es 8.5m, por lo tanto, del catálogo Hidrostral, seleccionamos el modelo: 32-160 con una potencia de 0.3 HP y una velocidad de 1700RPM según se muestra en la figura 04.

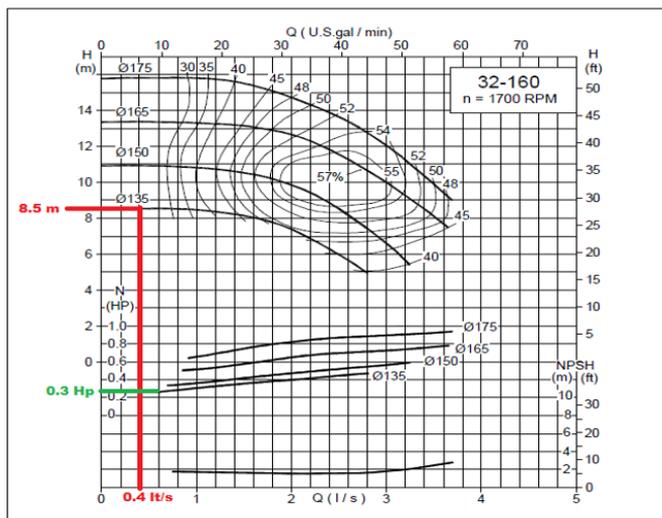


Figura 04: Curva característica de la bomba hidráulica modelo 32-160.

Fuente: Hidrostaal, 2014

- Análisis económico y financiero: El análisis de implementación de osmosis inversa en reemplazo de ablandadores, entrego los siguientes resultados:

Tabla 04: Resultados del análisis económico y financiero

Beneficio útil	37788.41 \$/año
Inversión	\$ 44300.00
Periodo de retorno	1.17 años
Valor actual neto	\$ 85431.00
Tasa interna retorno	81%

En el estudio de Andrade (2005), “Mantenimiento preventivo para calderas y circuitos de refrigeración en función del tratamiento del agua de alimentación”. Explico el análisis de una caldera pirotubular de 800BHP, el cual en condiciones iniciales con ablandadores produce 7516.8 Kg/h, trabajando a un 60% de su carga máxima, con una presión de 130Psig, con agua de alimentación de 850ppm proveniente de agua de río, con una dureza en purgas de 3500ppm, con un consumo de combustible de 120 gal/h, con un rendimiento energético de 72%. Pero con la implementación de un sistema de osmosis inversa la dureza del agua de alimentación

se redujo 60ppm, la capacidad del caldero incremento a 81%, incrementando el rendimiento del caldero a 83%, con un beneficio económico de 55000.00 \$/año, con una inversión de 58000.00 \$ y un periodo de retorno de la inversión de 1.05 años. En similitud con el presente estudio la caldera pirotubular en evaluación es de una potencia de 400 BHP, la cual opera inicialmente a 52.40% de su carga nominal con una presión de 120Psig, con agua de alimentación de 1020ppm proveniente de agua de pozo, consumiendo 66.20 gal/h de petróleo residual N°6 con un rendimiento energético de 74.09%, pero con la implementación de un sistema de osmosis inversa la dureza del agua de alimentación se redujo a 48.75ppm, incrementando la capacidad del caldero a 78.50% con aumento en el rendimiento energético de 81.55%, con un beneficio útil de 37788.41 \$/año, inversión en activos fijos 44300.00 \$ y un periodo de retorno de la inversión de 1.17años.

En el estudio de Pírela (2008), “Evaluación del sistema de generación de agua desmineralizada de la planta de tratamiento de aguas blancas para la alimentación de las calderas de una cervecería”. Expone el estudio de 4 calderas pirotubulares con una potencia de instalación total de 3000BHP, las cuales cuentan con un sistema de tratamiento de agua por 3 ablandadores, los cuales tratan el agua de pozo de 800ppm a 500ppm, con una capacidad de carga de los calderos de producción de vapor de 72%, con un rendimiento energético de 70%, implementando un sistema de osmosis inversa reduciendo la dureza del agua de alimentación hasta el valor medio de 25ppm, aumentando el rendimiento del caldero a 85% y la producción de vapor saturado a 86%, con un beneficio en ahorro en sal de 220000.00 S./año. En comparación con el análisis a la caldera de 400BHP, el sistema de tratamiento de agua de alimentación inicialmente cuenta con 2

ablandadores de resina sintética, los cuales tratan agua de pozo de 1350ppm a 1020ppm, operando el caldero al 52.40% de la producción máxima de diseño, con un a eficiencia energética de 74.09%, pero con un sistema osmosis inversa la capacidad de producción de vapor aumento a 78.50%, con un rendimiento de 81.55%, reduciendo los SDT del agua de alimentación a 48.75ppm, logrando un beneficio en ahorro de sal de 45625 S./año.

En el estudio de Piña (2010), “Desalación de agua de mar, efectos de la temperatura y concentración del agua de alimentación en el proceso de desalación por ósmosis inversa. Describe el análisis general comparativo de análisis de sistemas de tratamiento de agua de alimentación por ablandadores y osmosis inversa en calderas pirotubulares con petróleo residual N°6, detallando que con la implementación de osmosis inversa el aumento de producción de vapor es en promedio del 15 a 30%, el rendimiento energético de 5 a 10% y el ahorro de combustible de 3 a 7 gal/h. En semejanza al presente estudio la caldera pirotubular de 400 BHP, se encontró que, con el cambio de sistema de tratamiento de agua de ablandadores de resina a osmosis inversa, la producción de vapor aumento 26.10%, el rendimiento energético incremento en 7.46% y redujeron 5 gal/h de petróleo industrial.

6. CONCLUSIONES:

- El análisis actual al caldero pirotubular de 400 BHP, determino que el flujo másico de purgas con el sistema de tratamiento de agua con ablandadores es 1692 Kg/h con agua de alimentación de una dureza de 1020ppm. Para la evaluación del rendimiento energético se evaluó de manera indirecta, calculando que las pérdidas en gases residuales son 14.92%, seguido de las pérdidas en purgas de 7.73%, pérdidas de combustión incompleta 1.10%, pérdidas por

convección 0.47%, obteniendo un rendimiento energético de 74.92%.

- Con la implementación de un sistema de osmosis inversa para el tratamiento del agua de alimentación del caldero pirotubular de 400 BHP, se redujo el flujo másico de purgas a 54.18 Kg/h con agua de alimentación con una dureza de 48.75ppm, permitiendo que el flujo másico de vapor incremente a 4917.82 Kg/h (78.50% del flujo máximo), con un ahorro en petróleo residual N°6 de 5 gal/h, ocasionando que las pérdidas en las purgas se minimicen a 0.27%, incrementando el rendimiento energético a 81.55%.

- Para el transporte del agua de alimentación desde el equipo de osmosis inversa hacia el caldero pirotubular de 400 BHP, con un caudal de 0.4 Lt/s, con una altura energética de 8.5 m, se necesita de una bomba hidráulica modelo 32 -160 Hidrostral con una potencia de 0.3 HP con una velocidad de 1700RPM.

- El análisis económico, con la implementación del sistema de osmosis inversa, permitió un ahorro en consumo de sal de 45625.00 S./año, en agua de alimentación 33854.44 S./año y en combustible 26327.62 S./año, obteniendo un beneficio de 105807.56 S./año, con una inversión inicial de 124040.00 S./ y un periodo de retorno de la inversión de 1.17 años.

- El análisis financiero, arrojó un valor actual neto de 85431 \$, con una tasa interna de rentabilidad de 81%, estableciendo que el proyecto es factible

7. AGRADECIMIENTOS:

El presente trabajo de tesis primeramente me gustaría agradecerle a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

A mi profesor de tesis, Ing. Felipe Eduardo De La Rosa Bocanegra por su esfuerzo y dedicación, quien, con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito.

De igual manera agradecer a mi profesor de Investigación y de Tesis de Grado, Ing. Martín Teófilo Sifuentes Inostroza por su visión crítica de muchos aspectos cotidianos de la vida, por su rectitud en su profesión como docente, por sus consejos, que ayudan a formarte como persona e investigador.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] Amau, José. 2010. Ejercicios resueltos de máquinas térmicas. Valencia : Universidad Politécnica de Valencia. 9788483635919
- [2] Beltrán, Rafael. 2008. Conversión Térmica de Energía. Bogotá : Uniandes. 9789586953856.
- [3] Broatch Jacobi, Alberto. 2010. Ejercicios Resueltos de Maquinas Térmicas : Universidad Politécnica , 978-84-8363-591-9.
- [4] Capcha, Meliton. 2007. Termodinámica II. Lima : Ciencias. 15010520022131.
- [5] Cengel, Yunus. 2007. Transferencia de calor y masa. México, D.F : McGraw-Hill, 2007. 9789701061732.
- [6] Incropera, Frank y Witt, David. 2009. Fundamentos de transferencia de calor. México :Prentice Hall. 0471304603.
- [7] Kenneth, Wark y Donald, E. 2001. Termodinámica . Madrid : Concepción Fernández Madrid , 2001. 844812829.
- [8] Martines, Juan. 2010. Energías eléctricas y renovables. Madrid : Limusa-Wiley, 2010. 9786070501760.
- [9] MEM. 2010. Balance Nacional de Energía, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2010. 752814833.
- [10] MITINCI. 2012. Análisis comparativo de metodologías de medición de eficiencia energética. España: Organización Latinoamericana de Energía, 2012. 9485423589127.
- [11] Sowell, Tomas. 2013. Economía Basica. España : Deusto SA, 2013. 9788423412648.