

DISEÑO DE UN PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA UNA CALDERA PIROTUBULAR

Alexander Alfredo Taipe Izquierdo, *TECSUP, Perú*, alexander.taipe@tecsup.edu.pe

Resumen— En este proyecto se presenta dos alternativas para tratar el agua de alimentación de una caldera pirotubular. De acuerdo con los análisis el agua contiene Ca^{2+} , Mg^{2+} y oxígeno disuelto que sobrepasan las especificaciones técnicas de un agua de alimentación para un equipo de transferencia de calor provocando problemas operativos como incrustaciones y corrosión, además contiene aniones que podrían generar problemas a largo plazo. La experimentación se realice usando un ablandador con resinas catiónicas y un desmineralizador con resinas catiónicas y aniónica. Este último mostro mejores resultados, por este motivo fue el agua desmineralizada usada para pruebas con sulfito de sodio para así tener un agua de alimentación muy cercana a neutra.

Palabras Claves—incrustaciones, corrosión, resinas, desmineralización, caldera.

I. INTRODUCCIÓN

Las calderas pirotubulares son equipos utilizados para la producción de vapor debido a la transferencia de calor de los gases de combustión al agua ocurriendo el cambio de fase. La eficiencia con que operan las calderas de vapor, y por consiguiente el costo de operación que estas tienen, así como su seguridad y el tiempo de vida útil que poseen, depende en gran medida de la calidad del agua con que se alimentan. El tratamiento que se requiere dar al agua de alimentación tiene que ser analizado y efectuado con mucha precisión para asegurar que los efectos nocivos de los compuestos acarreados por el agua sean reducidos al mínimo.

El agua de alimentación usada tiene que cumplir ciertas especificaciones técnicas con la finalidad de evitar generar problemas operativos en el equipo, debido a esto se realizaron dos tratamientos de intercambio iónico a escala laboratorio ablandamiento y desmineralización.

El presente proyecto está enfocado en el tratamiento de agua proveniente de pozo, para que sirva como alimentación a una caldera y convertirse en vapor.

II. FUNDAMENTO

Problemas que se dan en la caldera Pirotubular si no se realiza el tratamiento del agua

El agua que ingresa a las calderas presenta normalmente cierta concentración de iones calcio y magnesio, los cuales al aumentar de temperatura precipitan por la formación de los iones carbonato que se generan de los bicarbonatos como se puede notar en las siguientes ecuaciones químicas:

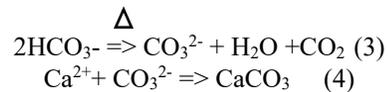


Fig. 1 Incrustaciones en las tuberías de las calderas

Los carbonatos de calcio y magnesio formados constituyen las llamadas incrustaciones que comúnmente en la industria se conoce como caliche.

Las incrustaciones causan la reducción de la eficiencia calórica en 0.1 a 0.2 %. Lo que anualmente puede significar pérdidas importantes de combustible por gastos adicionales. La carga económica que resulta es verdaderamente notable.

Altera peligrosamente la temperatura del metal superficial de los tubos. El incremento es tal que en calderos de media y alta presión puede causar rupturas y explosión de los mismos.

Obliga a hacer paros de mantenimiento, para cambiar los tubos, para hacer costosas y delicadas limpiezas químicas y otras reparaciones.

INDICE DE ESTABILIDAD DEL AGUA

Índice de Langelier:

Es un parámetro que sirve para evaluar la estabilidad del carbonato de calcio, para poder predecir si habrá formación de incrustaciones o habrá corrosión. Tiene que ver con los diversos equilibrios que presenta el ácido carbónico en el agua, además del pH, temperatura, concentración de calcio sólidos disueltos totales. Este número se determina restando al pH del medio, el pH de saturación que se obtiene en una tabla o mediante una formula.

$$IL = pH - pH_s$$

Donde:

IL: índice de Langelier

pH: pH del medio

pHs: pH de saturación en el equilibrio del carbonato de calcio - agua

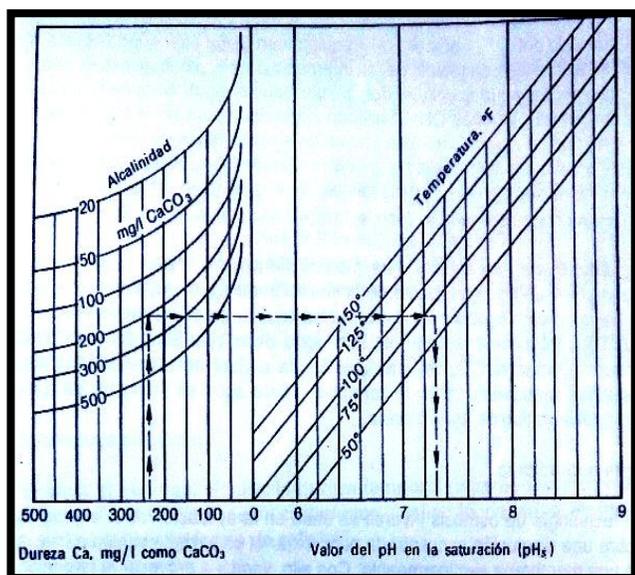


Fig. 2 Determinación del pH de saturación

El pH de saturación se calcula según la siguiente ecuación:

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (5)$$

Dónde: A, B, C y D son factores que dependen de la caracterización del agua, según:

TABLA I
Parámetros para el índice de saturación

$A = 1/10(\text{Log}(\text{STD}) - 1)$
$B = -13.12\text{Log}(T^{\circ}\text{C} + 273) + 34.55$
$C = \text{LogCa}(\text{mg/L CaCO}_3) - 0.4$
$D = \text{LogALK}(\text{mg/L CaCO}_3)$

STD: Sólidos disueltos totales

T°C: Temperatura

Ca²⁺: Concentración de calcio en mg/L

ALK: Alcalinidad total

TABLA II

Interpretación de los valores del índice de Langelier(IL)

IL	INTERPRETACIÓN
IL < 0	El agua es corrosiva
IL = 0	Se considera que el agua es neutra. Ni la formación de incrustaciones ni la eliminación de incrustaciones. Saturado, CaCO ₃ está en equilibrio. Potencial de escala límite.
IL > 0	El agua está sobresaturada con respecto al carbonato de calcio (CaCO ₃) y la formación de incrustaciones y la precipitación de CaCO ₃ va a ocurrir.

III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Caracterización del agua de alimentación de la caldera Pirotubular

Los parámetros más importantes del agua se cuantificaron mediante análisis volumétricos, la alcalinidad total (método de Warder y Winkler), cloruros (método de Mohr), dureza total y dureza cálcica (complexometría con EDTA).

TABLA III

Caracterización del agua de alimentación de la caldera

Caracterización inicial	
Alcalinidad P	0 mg/L
Alcalinidad M	180 mg/L
HCO₃⁻	180 mg/L
CO₃²⁻	0 mg/L
OH⁻	0 mg/L
Cl⁻	60 mg/L
Dureza Total	295 mg/L
Dureza Temporal	180 mg/L
Dureza no carbonatada	110 mg/L
Ca²⁺	83 mg/L
Mg²⁺	50.88 mg/L
PH	7.76
Conductividad	669 uS
TSD	1067 mg/L
Turbidez	0.79 NTU
OD	8.7 mg/L
IL	0.3675

Como se puede observar en la TABLA III la dureza total del agua es de 295 mg/L , la dureza cálcica es 83 mg/L , la magnésica 50.88 mg/L , la dureza temporal es 180 mg/L y la dureza no carbonata es 110mg/L , las cuales se encuentra muy elevadas pudiendo ser formadoras de caliche por lo explicado anteriormente en la ecuación (5), además el índice de langelier es de 0.3675 la cual nos indica que agua está sobresaturada con respecto al carbonato de calcio (CaCO₃) y la formación de incrustaciones y la precipitación de CaCO₃ va a ocurrir. Por lo tanto esta agua no sirve como alimentación de una caldera; ya que ocasionara problemas operativos.

El agua que se necesita para la caldera debe caracterizarse con los siguientes parámetros.

TABLA IV
Especificaciones técnicas del agua de alimentación de una caldera

Parámetro	Valor Limite
STD	4200 ppm
Alcalinidad Total	420 ppm CaCO ₃
Dureza Total	10 mg/L
Sílice	250 ppm
Sólidos en suspensión	360 ppm
Oxígeno	<0,05 mg/L
Dióxido de carbono	<25 mg/L
Turbidez	20 NTU
pH en la alimentación	8.5 – 9.5
pH en la caldera	10.5 – 11.5

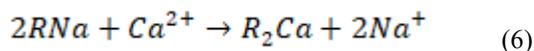
TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES POR ABLANDAMIENTO

En este tipo de tratamiento se utilizan resinas catiónicas que son partículas granuladas e insolubles en agua, en este caso este tipo de resina tiene la particularidad de solo intercambiar cationes. La ventaja de este tipo de producto es que tienen la habilidad de recuperar su capacidad puede ser una sal, un ácido o una base. En este caso la solución regeneradora es el cloruro de sodio al 10% que hace que los cationes retenidos en la resina sean remplazados por un catión deseado.

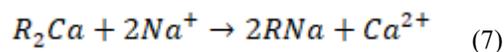
Debido a la concentración elevada de dureza se recurrió al tratamiento por ablandamiento que es la eliminación de la dureza causada por los iones calcio y magnesio. El mecanismo de este tratamiento es el intercambio de iones calcio y magnesio que forman las incrustaciones por iones sodio que no

precipitan, como se puede observar en las siguientes reacciones:

Reacción de saturación



Reacción de regeneración



Donde:

RNa: resina saturada con iones sodio

R₂Ca: resina saturada de cationes

Como se puede observar en la figura 3 la resina suturada con una solución de NaCl al 10% está depositada en una columna .Por medio de una conexión de mangueras el agua de pozo ingresa por la parte superior de la columna , sobre el lecho de la resina se encuentra una capa de algodón , esta es con el fin de que haya una mejor homogeneidad en el intercambio iónico , para evitar la canalización , una vez que el agua fuera de la columna se realiza los mismos análisis químicos mencionado en la caracterización , del cual de obtuvieron los resultados de la TABLA V



Fig. 3 ablandador a escala laboratorio

TABLA V
Caracterización del agua ablandada

Caracterización del agua a la salida del ablandador	
Alcalinidad P	0
Alcalinidad M	220
HCO_3^-	220
CO_3^{2-}	0
OH^-	0
Cl^-	90
Dureza Total	10
Ca^{2+}	10
Mg^{2+}	0
Ph	7.95
Conductividad	989 uS
TDS	701
Salinidad	348
Temperatura	22.3 °C
OD	8.7 mg/L
IL	-0.6

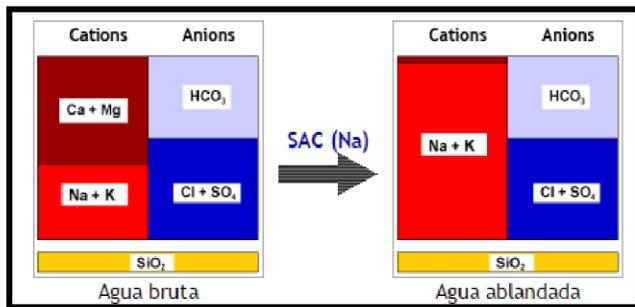


Fig. 4 Representación grafica de lo que ocurre en el ablandamiento de agua

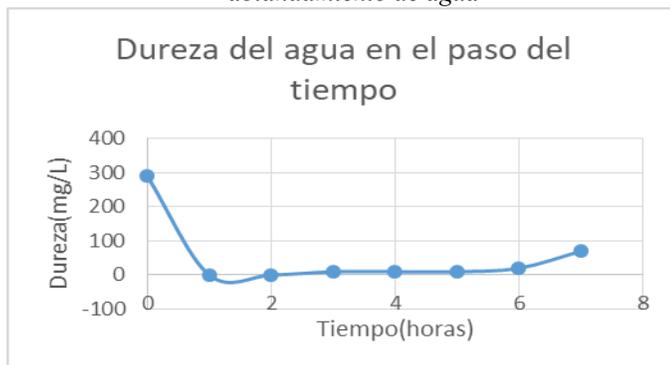


Fig. 5 Disminución de la dureza del agua de pozo respecto al tiempo

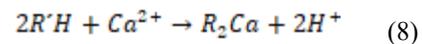
Después de haber pasado el agua por la resina catiónica durante 7 horas esta se satura, debido a que la dureza comenzó a incrementar, esto nos quiere decir que la resina está dejando pasar cationes calcio y magnesio que son los responsables de la dureza total presente en el agua. Por lo tanto si se quiere volver a usar se necesita una regeneración con solución de cloruro de sodio al 10% durante 15 minutos como mínimo.

El agua pasa por la columna durante 5 horas antes de que se sature, con un caudal de agua de 5.4 L/h, con lo que se dice que con 100 g de resina se puede tratar 27 L de agua de pozo antes de que esta se sature.

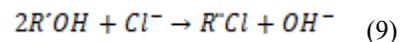
TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES POR DESMINERALIZACIÓN

El tratamiento de agua por desmineralización consiste en cambiar todos los cationes disueltos en el agua por iones H^+ y todos los aniones por iones OH^- . Para conseguir esto, necesitamos una resina intercambiadora de cationes en la forma H^+ (saturada con ácido clorhídrico al 10%) y una resina intercambiadora de aniones en la forma OH^- (saturada con hidróxido de sodio al 10%). Todos los cationes y aniones del agua se intercambian y el resultado neto es una desaparición completa de las impurezas ionizadas, como se pueden observar en las siguientes reacciones.

Reacción de saturación de la resina catiónica



Reacción de saturación de la resina aniónica



Donde:

- $2R'H$: Resina saturada con iones hidronio
- $2R'OH$: Resina saturada con iones hidroxilo
- R_2Ca : Resina saturada de cationes
- $R'Cl$: Resina saturada de aniones

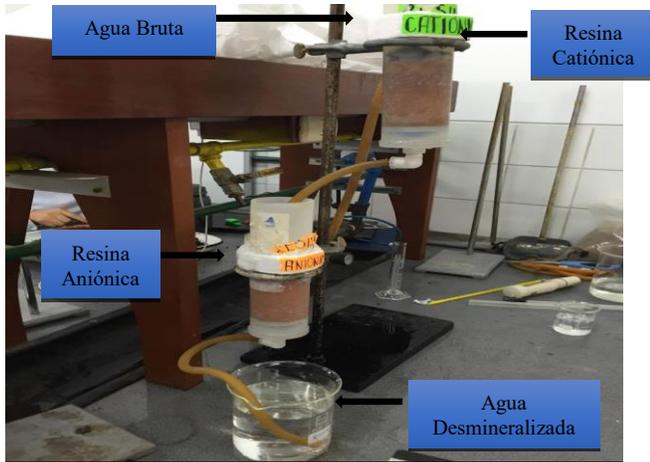


Fig. 6 desmineralizador a escala laboratorio

Como se puede observar en la Figura 5 se tiene dos columnas la columna superior contiene resinas catiónicas saturadas con ácido clorhídrico y la columna inferior contiene resinas aniónica saturadas con hidróxido de sodio , por la parte superior de la columna catiónica ingresaba el agua de pozo , y por la parte inferior de esta sale un agua libre de cationes pero con un PH de aproximadamente 2 , el agua se dirige a la columna con resinas aniónica donde sale libre de aniones , es aquí donde se da una reacción de neutralización ; ya que hay presencia de iones hidronio e hidroxilo , como se muestra en la siguiente reacción.

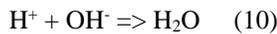


TABLA V
Caracterización del agua desmineralizada

Caracterización del agua a la salida del desmineralizado	
Alcalinidad P	10
Alcalinidad M	40
HCO_3^-	10
CO_3^{2-}	20
OH^-	0
Cl^-	20
Dureza Total	10
Ca^{2+}	10
Mg^{2+}	0
Ph	8.81
Conductividad	1010uS
TDS	513
Salinidad	369
Temperatura	21°C
OD	8.7 mg/L
IL	-0.3342

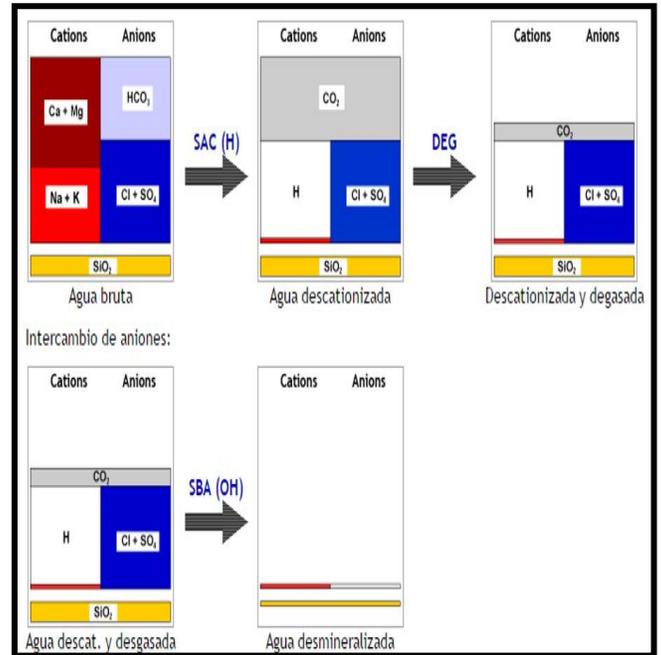


Fig. 7 Representación gráfica de lo que ocurre en la desmineralización del agua

La figura 7 da a conocer cómo está cambiando la dureza total con respecto al tiempo, se puede ver que la dureza baja de 290 mg/L a 0 mg/L, con esto podemos decir que la resina catiónica está trabajando bien. Después de haber pasado el agua por la resina catiónica durante 6 horas la resina comenzó a saturarse debido a que en la séptima hora la dureza aumento a 20mg/L. Por lo tanto si se quiere volver a usar se necesita una regeneración con una solución de ácido clorhídrico al 10% durante 15 minutos como mínimo.

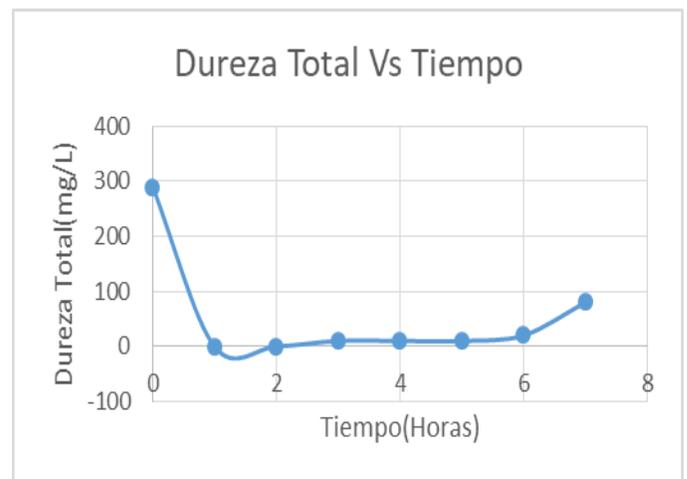


Fig. 8 Dureza total Vs Tiempo

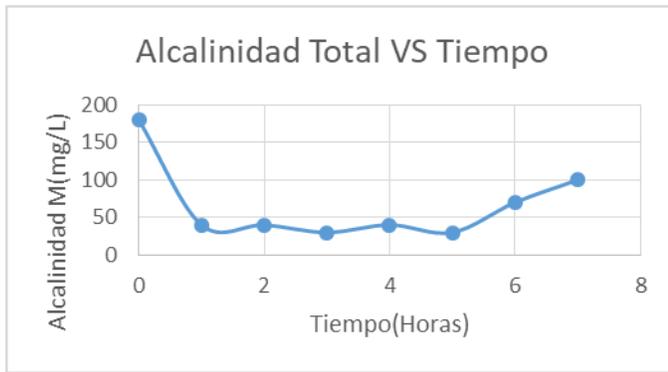


Fig. 9 Alcalinidad total Vs Tiempo

La figura 9 da a conocer cómo va cambiando la alcalinidad con respecto al tiempo, se puede ver que la alcalinidad baja de 180 mg/L a 40 mg/L, con esto podemos decir que la resina Aniónica está trabajando bien. Pero después de estar pasando agua durante 6 horas la resina comenzó a saturarse debido a que en la séptima hora aumento la alcalinidad a 70 mg/L es por eso que ahora necesita una regeneración una solución de hidróxido de sodio al 10%.

El agua pasó por las dos columnas durante 5 horas antes de que se sature, con un caudal de agua de 5.4 L/h, con lo que decimos que con 100 g de resina catiónica y aniónica se puede tratar 27L de agua de pozo antes de que esta se sature.

Se sabe que los principales componentes de la caldera son metálicos, y los agentes que atacan y disuelven son los gases corrosivos (oxígeno y dióxido de carbono).

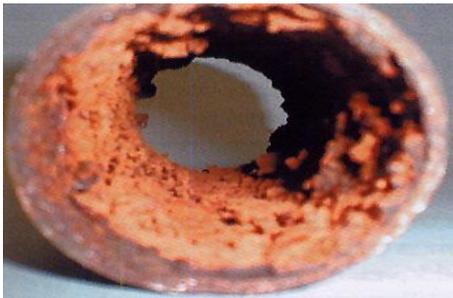
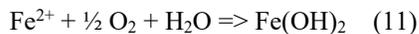
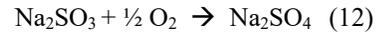


Fig. 10 corrosión en las tuberías de las calderas

Durante los dos tratamientos usados el agua perdió el carácter incrustante, pero ahora el índice de langelier tiene un valor

negativos el cual indica que es un agua de carácter corrosivo, la corrosión en calderas se debe a el oxígeno y dióxido de carbono disuelto, por este motivo se usó un secuestrante de oxígeno para inhabilitar su efecto corrosivo que le genera a los metales, este reactivo es el sulfito de sodio.



Se realizó un comparación entre los dos tratamiento realizados debido a que ambos tienen un carácter corrosivo, pero el agua tratada por desmineralización posee un valor menor de índice de Langelier por el cual se realizó pruebas para reducir el oxígeno disuelto y obtener un índice de langelier cercano a 0; ya que este valor nos indica la neutralidad que quiere decir que no es ni de carácter incrustante ni corrosiva.

TABLA VI

Parámetros para la inhibir la corrosión del agua tratada

Datos Experimentales	
Volumen de muestra de agua desmineralizada	500 mL
Masa de sulfito de sodio usada	1.311 g
Tiempo de Residencia	10 min
Oxígeno Disuelto inicial	8.7 mg/L
Oxígeno Disuelto final	0 mg/L

TABLA VII

Parámetros para determinar el carácter del agua tratada

Parámetros en la determinación del índice de Langelier	
Ca ⁺² mg/L de CaCO ₃	10
Alcalinidad Total (mg/L de CaCO ₃)	90
TDS (ppt)	2.99
Temperatura(°C)	26
Ph	8.81
A=1/10(log(TDS)-1)	0
B=-13.12Log(T(°C)+273)+34.55	2.06
C=Log (Ca ⁺² mg/L de CaCO ₃)	0.6
D=Log alcalinidad total mg/L de CaCO ₃	1.9542

Índice de Langelier

$$IL = PH - PH_s$$
$$PH_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$$
$$PH_s = (9.3 + 0 + 2.06) - (0.6 + 1.9545)$$
$$PH_s = 8.8055$$
$$IL = 8.81 - 8.8055$$
$$IL = 0.0045$$

El valor obtenido de índice de langelier es de 0.0045, es un valor muy cercano a 0, el cual nos indica que el agua tratada por desmineralización y posteriormente eliminando el oxígeno disuelto es casi neutra, y podrá ser utilizada como agua de alimentación de una caldera Piro tubular sin problemas.

TABLA VIII
Comparación de parámetros iniciales y finales

Caracterización	Antes del tratamiento	Después del tratamiento
Alcalinidad P	0 mg/L	0 mg/L
Alcalinidad M	180 mg/L	90 mg/L
HCO_3^-	180 mg/L	90 mg/L
CO_3^{2-}	0 mg/L	0 mg/L
OH^-	0 mg/L	0 mg/L
Cl^-	60 mg/L	20 mg/L
Dureza Total	295 mg/L	10 mg/L
Dureza Temporal	180 mg/L	10 mg/L
Dureza no carbonatada	110 mg/L	0 mg/L
Ca^{2+}	83 mg/L	10 mg/L
Mg^{2+}	50.88 mg/L	0 mg/L
PH	7.76	8.8
Conductividad	669uS	1010 uS
TSD	1067 mg/L	2.99 ppt
Turbidez	0.79 NTU	- NTU
OD	8.7 mg/L	0 mg/L
IL	0.3675	0.0045

IV. Discusión de Resultados

Como se puede observar en la TABLA III la dureza y el oxígeno disueltos superan las especificaciones técnicas que debe cumplir el agua de alimentación de la caldera Piro tubular que se encuentran en la TABLA IV, por este motivo esta agua necesita un tratamiento para la disminución de los contaminantes que tiene; ya que si este agua se usa traería consigo problemas como incrustaciones o corrosión que disminuyen la eficiencia del equipo.

Usando el tratamiento de ablandamiento se redujo la dureza del agua, pero ahora el índice de Langelier es un valor negativo el cual nos indica que perdió el carácter incrustante pero ahora tiene un carácter corrosivo como se observa en la TABLA V, lo mismo sucedió con el agua tratada por desmineralización, pero en una comparación de los índices de Langelier obtenidos con ambos tratamientos, el agua tratada por desmineralización presenta un carácter menos corrosivo; ya que su índice de Langelier es menor.

Como se mencionó anteriormente el agua tratada por desmineralización tiene un carácter corrosivo y esto es debido al elevado oxígeno disuelto que contiene (8.7 mg/L), como se observa en la TABLA III, es por este motivo que se utilizó un secuestrante de oxígeno el cual es el sulfito de sodio, del que se gastó 1.311 g por 500 mL de muestra de agua para obtener un valor de OD de 0 mg/L, después se determinó nuevamente el índice de Langelier obteniendo un valor de 0.0045, este valor es muy cercano a 0 el cual nos indica que el agua es prácticamente neutra y no generara problemas de incrustaciones ni de corrosión.

V. Conclusiones

El agua de pozo presenta una elevada dureza de 295 mg/L, el cual indica que no sirve como un agua de alimentación

El índice de langelier inicial de 0.3675 nos indica que el agua era de carácter incrustante

Tratando el agua por ablandamiento y desmineralización hace que esta pierda el carácter incrustante

Tratando el agua por desmineralización se obtuvieron los mejores resultados

El sulfito de sodio ayudo a que el agua tratada por intercambio iónico pierda el carácter corrosivo

VI. Referencias Bibliográficas

[1]Perry.J.(1980).Manual del ingeniero. Químico. España..McGraw Hill book Company . Tomo II. págs. (1426-1427)

[2]Nalco(1989).Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Editorial Mc Graw Hill. México. Tomo I.

[3]Rigola, M. (1990).Tratamiento de aguas Industriales. Editorial Marcombo. Madrid

[4]Russel, D. (2012).Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverte. Madrid

[5] **Rodríguez. J & Galvín. R.**(1999).*Fisicoquímica del agua*. Madrid: Ediciones Díaz santos