

## Inhibición de incrustación en intercambiadores de calor en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

**Ismael Canchola Félix<sup>1</sup>, Othón Mora Pérez<sup>1</sup> y Raúl Alberto Sánchez Velasco<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Residencia General de Cerro Prieto, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE,

<sup>2</sup>Subgerencia de Desarrollo Tecnológico, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, CFE. Correo: [raul.sanchez@cfegob.mx](mailto:raul.sanchez@cfegob.mx)

### Resumen

Cerro Prieto cuenta con una capacidad instalada de 720 MW, para lo cual se requiere extraer del yacimiento más de 5,000 t/h de vapor. El campo, que es el segundo más grande del mundo por su potencia instalada, empieza en 1972 su aprovechamiento con Cerro Prieto Uno (CPU, 180 MW), incrementando su capacidad en 1986 con la construcción de Cerro Prieto Dos (CPD) y Cerro Prieto Tres (CPT) (440 MW) y en 2002 se pone en operación comercial Cerro Prieto Cuatro (CPC, 100 MW). A la fecha, el campo ha declinado en su producción de vapor y se requiere de un mayor número de pozos para extraer la misma cantidad de vapor, incrementando el costo de generación geotérmica. El vapor que se extrae del yacimiento viene acompañado de agua caliente que se utiliza parcialmente en el proceso geotérmico al realizar varias evaporaciones, mediante la reducción de presión, y que se utiliza en la operación de la Unidad 5 de CPU (30 MW) y en las unidades de 110 MW como vapor de media presión (CPD y CPT). El total de agua que se descarga a la laguna de evaporación solar es de 7,500 t/h, que en los separadores secundarios se encuentra a una temperatura de 150°C, aproximadamente. La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad ha invertido esfuerzos para aprovechar esta agua mediante el uso de tecnologías alternas, como es el ciclo binario, pero la incrustación de los intercambiadores de calor, que ocurre al bajar la temperatura del agua, ha presentado un reto aún no resuelto para integrar el aprovechamiento del agua en la generación de electricidad. La Residencia General de Cerro Prieto y la Subgerencia de Desarrollo Tecnológico han implementado un proyecto para probar diferentes tipos de inhibidores de incrustación en intercambiadores de calor para resolver este problema. Las pruebas empezaron en julio de 2009 y a la fecha se han probado tres inhibidores químicos con muy buenos resultados. En este trabajo se presenta el desarrollo de la prueba, el tipo de intercambiadores de calor a probar y los resultados que se obtuvieron. Las pruebas continúan en espera de que en 2009 se obtengan resultados satisfactorios para estar en posibilidad de aprovechar el agua caliente para generar electricidad en 2010.

### Introducción

El campo geotérmico de Cerro Prieto se explota por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) desde 1972, año en que comienza la operación comercial de dos unidades de 37.5 MW cada una en el sector conocido como Cerro Prieto Uno (CPU). En 1976 se incrementó la capacidad instalada para llegar a 150 MW con otras dos unidades de la misma capacidad.

El campo es de tipo de agua dominante, por lo que del yacimiento se extrae agua y vapor, prácticamente en una proporción de 1:1. Por ello, en 1986 y con la intención de incrementar la eficiencia del ciclo geotérmico, se decidió instalar una unidad de 30 MW que funcionaba con vapor

obtenido de la evaporación parcial (o *flasheo*) del agua que se separaba en los equipos que alimentaban a las cuatro unidades de 37.5 MW.



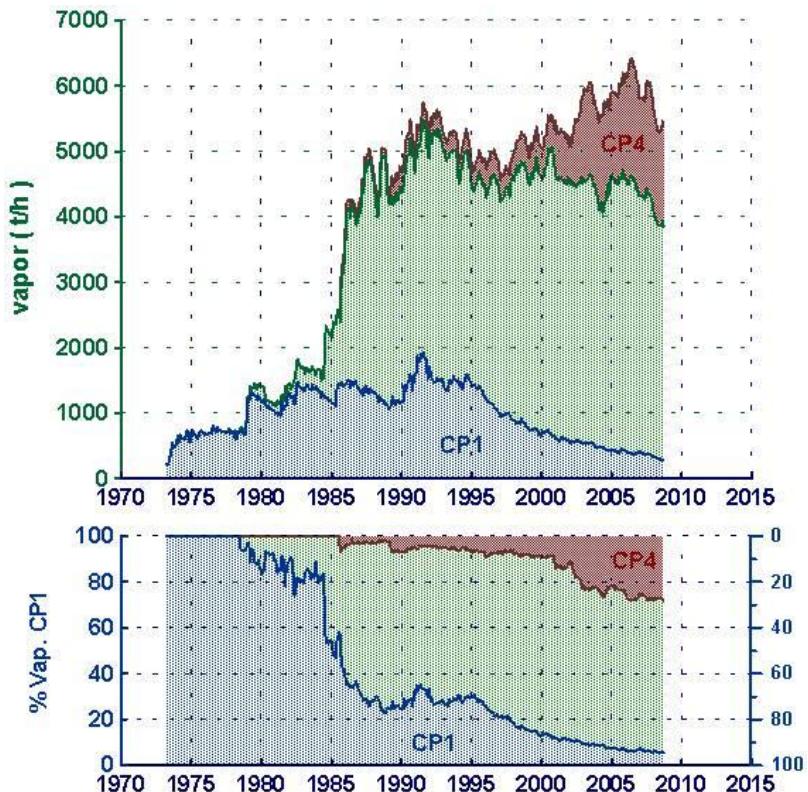
*Fig. 1. Incrustación en una descarga de salmuera hacia un silenciador.*

atmosférica.

En 1986 la CFE pone en operación comercial las centrales de Cerro Prieto Dos (CPD) y Cerro Prieto Tres (CPT), ambas de la misma capacidad (220 MW). Se decide que las unidades sean de doble presión y que el vapor secundario tenga una presión de admisión de 3.5 bar. Finalmente en 2002 empezó la operación de Cerro Prieto Cuatro (CPC) con 4 unidades de 25 MW, las cuales operan con una sola presión de admisión.

La cantidad de vapor que hay que extraer del subsuelo para alimentar estas unidades alcanza las 5,000 toneladas por hora (t/h) y el yacimiento presenta ya signos de declinación importantes, lo cual se puede observar en las gráficas de producción de vapor (Fig. 2), donde

esta agua se encontraba a 165°C, que corresponde a la temperatura de saturación para la presión de operación de los separadores, que es de 6.5 bar. Se realizaban dos evaporaciones, la última a 2.5 bar, y se identificó que al disminuir la temperatura del agua por debajo de los 135°C se registraba una precipitación excesiva de sales, principalmente sílice, lo cual provocaba incrustación en los silenciadores donde se descargaba el agua a la atmósfera. Este problema obligó a instalar dos silenciadores en la plataforma de los pozos, de manera que mientras uno se encontraba en operación el otro estaba en mantenimiento para limpieza y remoción de la sílice. En la Figura 1 se muestra la incrustación típica en la tubería de un silenciador de descarga



*Fig. 2. Producción histórica de vapor en Cerro Prieto.*

se identifica que el sector de CPU tiene una aportación de vapor marginal para las necesidades actuales del campo.

Ante este escenario, se hace necesario incrementar la eficiencia en el aprovechamiento del recurso geotérmico, con el objetivo de aumentar la generación eléctrica, manteniendo el ritmo de extracción de energía del yacimiento. La Residencia General de Cerro Prieto ha identificado varios proyectos con este objetivo y se ha enfocado a disminuir las pérdidas de vapor en las instalaciones superficiales, mediante la sustitución de aislamientos en mal estado, aislando ductos que se encontraban sin él y mediante un proyecto de control automático de nivel de agua dentro del separador, que evita que el vapor se descargue con el agua hacia la atmósfera.



*Fig. 3. Vista de la unidad de 300 kW.*



*Fig. 4. Incrustación en tuberías del intercambiador de calor de la unidad de 300 kW.*

### **Pruebas con una Unidad de Ciclo Binario de 300 kW**

En 2000 la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la CFE adquirió cuatro unidades de ciclo binario de 300 kW de capacidad para experimentar esta tecnología en aplicaciones rurales. Dos de estas unidades estaban equipadas con condensadores enfriados por aire y dos con condensadores enfriados por agua. En Cerro Prieto se decidió instalar una de estas unidades enfriadas por aire (Fig. 3), con el fin de probar la eficiencia de diferentes inhibidores para evitar la incrustación en el intercambiador de calor al disminuir la temperatura de la salmuera. La unidad se instaló en el pozo 138 en CPU y se empezaron las pruebas en 2002. Se probaron inhibidores químicos como el Geospedse CSX5110, con dosificaciones que variaron desde 20 ml/min hasta 56 ml/min, el Drew 11-710, con una dosificación de 20 ml/min hasta 27 ml/min, el DP-8045 y el DP-3385. Sin embargo los resultados no fueron satisfactorios. En la Figura 4 se presenta el grado de incrustación registrado en las tuberías del intercambiador de calor.

En 2006 se decidió dar por terminado el experimento sin haber alcanzado los resultados deseados.

### **Pruebas recientes (2009) con diferentes intercambiadores de calor**

Después de varias reuniones técnicas con proveedores de inhibidores de incrustación y de intercambiar ideas con el fabricante de la unidad de ciclo binario, se llegó a la conclusión que el diseño del intercambiador de calor no era el adecuado para el tipo de salmuera de Cerro Prieto, ya que la turbulencia, la velocidad del fluido en el interior de los tubos y la disminución de la temperatura de la salmuera eran factores muy importantes para favorecer el depósito de sales. Para resolver esta problemática se decidió realizar una prueba únicamente con el intercambiador de calor, sin incluir el grupo turbogenerador, a fin de facilitar su implementación. Se diseñó un equipo de manera tal que evitara la turbulencia, por lo que los cambios de dirección combinados con cambios de sección, y por consiguiente de velocidad del fluido, se evitaron, eliminando entonces las cajas de agua que son característicos de los intercambiadores de calor de pasos múltiples.

En ese diseño (Fig. 5) se dio continuidad a la tubería en los extremos mediante codos de 180° que se instalaron con conexiones rápidas para facilitar la limpieza del equipo en caso de que hubiese incrustación. También se seccionó con válvulas una de las hileras de tubos para poder inspeccionar el



*Fig. 5. Vista del intercambiador de calor experimental y del arreglo en plataforma del pozo M-157.*

interior y verificar el grado de incrustación sin necesidad de sacar de operación el equipo.

El sistema se instaló en el pozo M-157 (Fig. 5) y la disminución de temperatura se simuló con el uso de agua de uno de los drenes agrícolas, bombeando el agua hasta un tanque y mediante un ingenioso sistema de niveles se logró que la evaporación que se registrara en el tanque del intercambiador se repusiera de manera natural desde el tanque de almacenamiento de 20 m<sup>3</sup> de capacidad.

### **Instalaciones sobre la plataforma del pozo M-157**

En el cabezal del pozo se implementó una boquilla para inyectar el inhibidor mediante una bomba accionada por motor eléctrico. El agua geotérmica para la prueba se tomó a presión de la descarga del segundo separador y se envió mediante una tubería de 3" de diámetro en acero al carbón hasta el intercambiador de calor. Después de pasar por el intercambiador, el agua se descarga a un silenciador fabricado de acero inoxidable, para finalmente conducir el agua hasta el canal revestido de concreto.

En la tubería de descarga de la salmuera se instaló una válvula para controlar el flujo de agua que pasa por el intercambiador y para controlar la presión en los tubos del equipo. Tanto en la entrada como en

la salida del agua geotérmica, en el intercambiador se instalaron manómetros de carátula tipo bourdón y termómetros a fin de registrar la diferencial de temperatura y de presión, esta última relacionada de manera directa con el grado de incrustación del equipo.

Para disminuir la temperatura de la salmuera se implementó un tanque metálico de 20 m<sup>3</sup> equipado con tubería y bomba accionada por motor eléctrico para llenarlo con agua del dren agrícola que se ubica en la parte norte de la plataforma. Este tanque descarga hacia un segundo recipiente que se fabricó con una tubería de 20". En la parte inferior del tanque se instaló una tubería de 2", cuyo extremo se equipó con una válvula con flotador. El nivel de flotador que permite el paso del agua desde el tanque hacia este segundo recipiente se hizo coincidir con el nivel superior del intercambiador, de manera que al evaporar el agua se redujera el nivel y de manera automática se llenara el segundo recipiente al bajar el flotador. Este segundo recipiente y el intercambiador se conectaron con tubería de acero al carbón de 2" de diámetro.

## Pruebas y Resultados

A principios de julio de 2009 se empezó la primera prueba con el inhibidor DP-8045 con una dosis de 16 ml/min y con una duración de una semana, después de la cual se suspendió el flujo y se revisó el intercambiador de calor. En la Tabla 1 se presentan las condiciones de operación registradas y en la Figura 6 se muestra el grado de incrustación que se observó en el intercambiador de calor.

#	FECHA	HORA	P (SEPA)	P (out)	T (in)	T (out)	$\Delta P$ (out-SEPA)	$\Delta T$ (OUT-IN)	AFORO	Q = L/S	Ph	INHIBIDOR	
			lb/in <sup>2</sup>	lb/in <sup>2</sup>	°C	°C	lb/in <sup>2</sup>	°C	SEG			TIPO	DOSIS ml/min
1	07/08/09	10.3	59	58	148	92	-1	-56	18	1.1111	7.89	DP-8045 KENTHO	16
2		1	60	58	146	88	-2	-58	21	0.9524			
3		2.3	60.5	58	148	90	-2.5	-58	22	0.9091			
4	10/08/09	7.18	70	50	144	56	-20	-88	52	0.3846	8.23	DP-8045 KENTHO	16
5		8	70.5	72	152	98	1.5	-54	21	0.9524			
6		11.3	73	75	154	94	2	-60	17	1.1765			
7	11/08/09	2.3	73.5	73	154	98	-0.5	-56	17	1.1765	8.03	DP-8045 KENTHO	16
8		7.15	62.5	63	140	100	0.5	-40	19	1.0526			
9		11.3	64	65.5	148	82	1.5	-66	24	0.8333			
10	12/08/09	1.5	65	64	150	94	-1	-56	22	0.9091	8.07	DP-8045 KENTHO	16
11		7.15	76	79	156	110	3	-46	21	0.9524			
12		11.3	76.5	78	154	102	1.5	-52	22	0.9091			
13	13/08/09	2.15	77	77	152	102	0	-50	22	0.9091	7.63	DP-8045 KENTHO	16
14		7.15	76	60	154	62	-16	-92	40	0.5			
15		7.3	76	79	154	98	3	-56	22	0.9091			
16	14/08/09	11.3	67	70	148	100	3	-48	23	0.8696	8.1	DP-8045 KENTHO	16
17		2.15	67	68	150	104	1	-46	22	0.9091			
18		7.15	65	72	150	98	7	-52	21	0.9524			
19	14/08/09												

Tabla 1. Resultados de la prueba realizada con el inhibidor DP-8045 del 7 al 14 de julio de 2009

El 24 de julio se inició otra prueba con otro inhibidor, el Argón 7420-G con una dosificación de 26 ml/min. Los resultados de esta segunda prueba se presentan en la Tabla 2.



*Fig. 6. Vista de una tubería del intercambiador de calor, limpio (izquierda) y después de la primera prueba (derecha).*

y con una configuración de 7 hileras, con lo que se define una velocidad de flujo dentro de los tubos de aproximadamente 3.2 m/s.

La continuidad de la tubería, incluso cuando tenga un desarrollo de 18 m, favorece que no se presente incrustación. De igual manera el acero inoxidable que se utilizó para los tubos parece ser el adecuado para esta aplicación.

La dosificación del inhibidor sugiere ser la correcta, de entre 16 y 20 ml/min, lo cual da un consumo anual de inhibidor de 8,500 litros por año para tratar 3.5 t/h de salmuera. El costo del kilogramo de inhibidor es de 50 pesos, lo cual arroja un costo operativo unitario de 120,000 pesos anuales por tonelada de salmuera a tratar. Considerando el consumo de una central de ciclo binario operando bajo estas condiciones, de 130 t/h por MW, se tendría un costo anual de operación por tratamiento químico de 15.6 millones de pesos (equivalente a poco más de 1 millón de dólares por año).

### **Pruebas Adicionales**

Pese a los alentadores resultados alcanzados con estas tres pruebas, se requiere continuar con más pruebas para otras marcas de inhibidor, incluyendo el electromagnético que resulta el de menor costo operativo.

Adicionalmente a lo anterior, se requiere hacer la prueba sin inhibidor y evaluar el grado de incrustación que se presenta bajo estas condiciones.

El 24 de agosto se probó el tercer inhibidor (Ashland Drew 11-608) y en esta ocasión la dosificación fue de 20 ml/min con una duración de 11 días. Desgraciadamente durante la evaluación se tuvieron problemas con la bomba dosificadora y se dejó de inyectar inhibidor y aun cuando se eliminó la incrustación exterior de los tubos, no se pudo recuperar la diferencial de temperatura de entre 48 y 58°C, tal como se muestra en la Tabla 3.

Como puede observarse en las Tablas 1, 2 y 3, se logró alcanzar una diferencial de temperatura superior a los 50°C sin que se presentaran evidencias de incrustación, lo cual se refleja también en la diferencial de presión que fue insignificante. El flujo que se manejó fue de alrededor 3.5 t/h y el número de tubos de 3/4" con espesor de pared de 0.065" en acero inoxidable 316L

#	FECHA	HORA	P (SEPA)	P (out)	T (in)	T (out)	$\Delta P$ (out-SEP)	$\Delta T$ (OUT-IN)	AFORO	Q = L/S	Ph	INHIBIDOR	
			lb/in^2	lb/in^2	°C	°C	lb/in^2	°C	SEG			TIPO	DOSIS ml/min
1	23/07/2009		63	62	146	73	-1	-73	36	0.5556	-	ARGON 7420-G	26
2		11:30	62	61.5	147	83	-0.5	-64	23	0.8696	-		
3		14:00	68	73	150	86	5	-64	-	-	-		
4	24/07/2009	07:15	61.5	65	146	66	3.5	-80	46	0.4348	-	ARGON 7420-G	26
5		11:15	60	63	142	57	3	-85	47	0.4255	-		
6		14:20	76.5	80	156	94	3.5	-62	19	1.0526	-		
7	27/07/2009	07:30	71.5	74.5	153	100	3	-53	25	0.8	-	ARGON 7420-G	22
8		11:30	72.5	74	154	104	1.5	-50	20	1	7.9		
9		02:15	61.5	64	147	102	2.5	-45	23	0.8696	7.85		
10	28/07/2009	07:30	59	61	146	102	2	-44	24	0.8333	7.9	ARGON 7420-G	22
11		11:30	61	64	144	103	3	-41	25	0.8			
12		02:15	61.5	62	148	104	0.5	-44	20	1			
13	29/07/2009	7.3	59	61	148	94	2	-54	22	0.9091	8.05	ARGON 7420-G	22
14		11.3	59.5	61	146	94	1.5	-52	29	0.6897			
15		2.15	61	64	148	84	3	-64	45	0.4444			
16	30/07/2009	7.15	58.5	61	148	98	2.5	-50	24	0.8333	8.06	ARGON 7420-G	22
17		11.3	60	64	148	100	4	-48	24	0.8333			
18		2.15	61	62	148	102	1	-46	25	0.8			
19	31/07/2009	7.3	59	61	148	100	2	-48	26	0.7692	8.05	ARGON 7420-G	22
20													
21													

Tabla 2. Resultados de la prueba realizada del 24 al 31 de julio con el inhibidor ARGON 7420-G.

Conviene realizar otra serie de pruebas con el inhibidor que arroje el mejor resultado por un periodo más largo (dos meses por ejemplo) y evaluar la evolución del grado de incrustación que pueda desarrollarse.

Se considera también muy conveniente variar el flujo, para observar el nivel de incrustación del intercambiador en función de la velocidad del fluido dentro de los tubos.

Una vez terminadas esas pruebas, es conveniente cambiar a un intercambiador tipo placas para repetir las pruebas que se llevaron a cabo con el intercambiador de tubos. El intercambiador de placas presenta la ventaja de ser más compacto, de tener un costo asociado mucho más bajo que el de tubos y una simplicidad para su limpieza y modificación de capacidad, ya que solamente se requiere el incrementar el número de placas.

## Conclusiones

1. Se desarrolló en el campo de Cerro Prieto una prueba para inhibir la incrustación en los intercambiadores de calor. Del resultado de esta prueba depende el aprovechar el agua residual del campo para generar electricidad mediante plantas de ciclo binario.

#	FECHA	HORA	P (SEPA)	P (out)	T (in)	T (out)	$\Delta P$ (out-SEPA)	$\Delta T$ (OUT-IN)	TIEMPO	Q = L/S	Ph	INHIBIDOR	
			lb/in^2	lb/in^2	°C	°C	lb/in^2	°C				TIPO	DOSIS ml/min
1	24/08/2009	10.3	61.5	61	148	90	-0.5	-58	23	0.87	8.05	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
2		2.15	63	62	148	94	-1	-54	25	0.8			
3	25/08/2009	7.15	60	60	146	96	0	-50	25	0.8	7.99	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
4		11.3	62	61	148	98	-1	-50	26	0.77			
5	26/08/2009	2	63	62	150	98	-1	-52	25	0.80	8.13	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
6		7.3	60	60	148	100	0	-48	25	0.8			
7	26/08/2009	11.3	63	60.5	148	104	-2.5	-44	23	0.87	8.13	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
8		1.15	63	60	148	104	-3	-44	23	0.87			
9	27/08/2009	7.3	61	60	148	106	-1	-42	24	0.83	8.07	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
10		11.15	63	61	146	108	-2	-38	24	0.83			
11	27/08/2009	1.3	64.5	62	148	106	-2.5	-42	23	0.87	8.03	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
12		7.3	62	61	148	110	-1	-38	25	0.8			
13	28/08/2009	11.3	64	62	146	100	-2	-46	22	0.91	8.03	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
14		2.1	65	63	150	102	-2	-48	23	0.87			
15	31/08/2009	7.3	66	65	148	106	-1	-42	25	0.8	8.06	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
16		11.15	66	65	150	108	-1	-42	25	0.8			
17	31/08/2009	2.15	68	66	150	110	-2	-40	25	0.8	8.06	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
18		7.15	62	61	146	110	-1	-36	26	0.77			
19	01/09/2009	11.1	63.5	62	144	106	-1.5	-38	26	0.77	8.08	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
20		1.15	63.5	62	148	110	-1.5	-38	27	0.74			
21	02/09/2009	7.3	64	64	146	110	0	-36	26	0.77	8.02	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
22		11.3	75	76.5	152	90	1.5	-62	30	0.67			
23	02/09/2009	3	78.5	79	154	94	0.5	-60	29	0.69	8.02	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
24		3.1	78.5	76	154	102	-2.5	-52	20	1			
25	03/09/2009	3.1	81	78	156	110	-3	-46	20	1	8.1	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
26		11	83	80	156	112	-3	-44	20	1			
27	03/09/2009	2.15	84	80	158	112	-4	-46	21	0.95	7.92	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
28		7.15	82	79.5	156	116	-2.5	-40	21	0.95			
29	04/09/2009										7.92	DREW™ 11-608 ASHLAND	20
30													

Tabla 3. Resultado de la prueba realizada con el inhibidor Ashland Drew™ 11-608.

2. Se implementó una prueba experimental en el pozo M-157 y se instaló un intercambiador de tubos y coraza fabricado en acero inoxidable 316L.
3. Se probaron tres tipos de inhibidores con resultados satisfactorios. No se identificaron problemas de incrustación.

4. Se operó con una velocidad del fluido de 3.2 m/s lo cual arrojó resultados satisfactorios.
5. A pesar de que el desarrollo total de la tubería en el intercambiador es de 18 m aproximadamente, el evitar cambios de sección y el consiguiente cambio de velocidad de flujo, favoreció que el equipo no se incrustara.
6. De la dosificación que se aplica se desprende un costo de operación por inyección de inhibidores de 1 millón de dólares por MW por año, considerando un factor de planta de 100%.
7. Se continuarán las pruebas con otros tipos de inhibidores y por períodos más largos, para obtener mayor representatividad y validez.