

## **ANÁLISIS DE PROBLEMAS DE CORROSIÓN EN DOS COLECTORES SOLARES CON ACUMULACIÓN INTEGRADAS, CONSTRUIDOS CON SIMILARES MATERIALES Y MÉTODOS**

**Juan M. Lucchini<sup>1</sup>, Javier H. Garnica<sup>1</sup>, Jorge R. Barral<sup>1</sup>, Jorge M. Morsetto<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Grupo de Energía Solar – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto

Ruta Nac. 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto

Tel./Fax: (0358) 4029055 - e-mail: mlucchini@ing.unrc.edu.ar

**RESUMEN:** En este trabajo se analizan problemas de oxidación que ocurrieron en dos equipos de calentamiento de agua mediante energía solar, que son prototipos de colectores solares con acumulación integrada. Los equipos son geoméricamente diferentes, pero han sido construidos con materiales similares. Se concentra el estudio en cada absorbedor-almacenador, para los cuales se ha utilizado chapa de acero negro como materia prima principal. Dichos equipos, que funcionaron muy bien térmicamente, presentaron pérdidas de agua al cabo de unos años por perforaciones causadas por oxidación. La diferencia en los intervalos de tiempo en que ocurrieron las perforaciones motivó el presente estudio, ya que en uno de ellos el intervalo fue bastante más corto. En búsqueda de las razones que ocasionaron estos problemas, los equipos fueron desmontados de sus aplicaciones rutinarias, y sus componentes absorbedor-almacenador fueron cortados y abiertos en sectores críticos. Se analizaron los contenidos de las aguas que alimentaban los equipos y se recurrió a distintos índices característicos para observar si las aguas presentaban características corrosivas o incrustantes. También se analizaron posibles mecanismos de corrosión y mecanismos de protección, como pintado con antióxido y ánodos de sacrificio. Por último, se presentan conclusiones sobre posibles causas de corrosión, proponiéndose maneras de prevenirla.

**Palabras clave:** colector solar, acumulación integrada, dureza del agua, corrosión.

### **INTRODUCCIÓN**

Un colector acumulador integrado (CAI) es parte de una instalación de agua caliente domiciliar que combina las funciones de absorción de radiación solar y almacenamiento de energía. Consta de un tanque (o tanques), pintados de negro o con una cubierta selectiva, encerrados en una caja aislada, y cubiertos por una superficie transparente. El absorbedor-almacenador está permanentemente lleno de agua, y por la gran masa térmica de agua, almacena energía. Cuando el agua caliente es demandada, se extrae agua caliente de la parte superior del equipo, y ésta es reemplazada por agua proveniente de la red o tanque convencional de almacenamiento del edificio. (Duffie et al., 2020).

El Grupo de Energía Solar de la UNRC (GES) ha trabajado experimentalmente y analíticamente con distintos modelos de colectores solares con acumulación integrada (CAI): tubulares (Barral et al., 2002), mono tanques con varias cubiertas (Fasulo et al., 2001), bi tanques con superficies reflectantes (Stoll et al., 2007), de sección oval (Garnica et al., 2011) (Garnica et al., 2017) y parcialmente aislados (Garnica et al., 2019). Los aspectos constructivos, detalles de principios de funcionamiento y estudios realizados están detallados en cada una de las publicaciones mencionadas. En el avance de estos estudios surgieron como más convenientes los dos últimos modelos, el de sección oval (CAI oval) y el parcialmente aislado (CAI pa), por lo que, en pos del mejoramiento de la vida útil de los mismos, se realiza aquí este estudio sobre corrosión de estos dos equipos.

En los dos últimos modelos, CAI oval y CAI pa, se utilizó chapa de acero negra con un pintado interior; ya que este tipo de chapa se utiliza en calefones a leña que soportan duras condiciones de altas temperaturas y presentan diez o más años de uso. Desde la fabricación del prototipo CAI pa hasta la fecha han pasado cinco años (2019-2023), en dicho periodo el equipo funcionó continuamente y en los últimos meses presentó fugas de agua, lo que llevó a realizar la pregunta ¿A qué se debe estas fugas tempranas?, ya que estos equipos tienen una expectativa de vida útil superior a los diez años. Por otra parte, nos encontramos que el prototipo CAI oval, a pesar de tener más de doce años (2011-2023) de uso y estar construido con técnicas y materiales similares, presentaba menor degradación.

En este trabajo se dilucida el motivo del acelerado deterioro del equipo CAI pa. Para ello se revisó el estado de los dos equipos, realizando inspecciones visuales y con cámara endoscópica sin desarmar el equipo para después, desarmarlos y realizar disecciones de las partes atacadas a fin de estudiar el proceso de oxidación. En lo que sigue del artículo, se hace una descripción de los equipos, se identifican los problemas de oxidación, los cuales se documentan con fotos, y se analizan las probables causas de los mismos.

## DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

Los dos equipos fueron pintados con pintura antióxido al agua, a fin de cuidar la calidad del agua por la posible contaminación, tanto en la parte interior como la exterior (tanto el colector-acumulador como el colector y tanque). Luego, en el exterior de ambos equipos, se colocó una capa extra de pintura sintética de color negro mate. También a los dos equipos se colocaron dos ánodos de magnesio de 0,5 m cada uno, como protección galvánica. A diferencia del CAI oval, el CAI pa fue provisto de dos resistencias calefactoras (de 1500 W) en la parte baja del tanque, a fin de contar con un respaldo térmico en situaciones de días de baja radiación y/o elevada demanda de consumo. En ambos equipos se procedió a aislarlos con lana de vidrio de 0,05 m y encapsularlos en una carcasa de chapa galvanizada (el equipo oval además posee como aislante una capa de poliestireno expandido), mientras que la parte que enfrenta al sol para captar la energía, en ambos equipos fue cubierta con un policarbonato alveolar de 0,006 m de espesor, en las Fig. 1 y Fig. 2 se observan los equipos y esquemas.

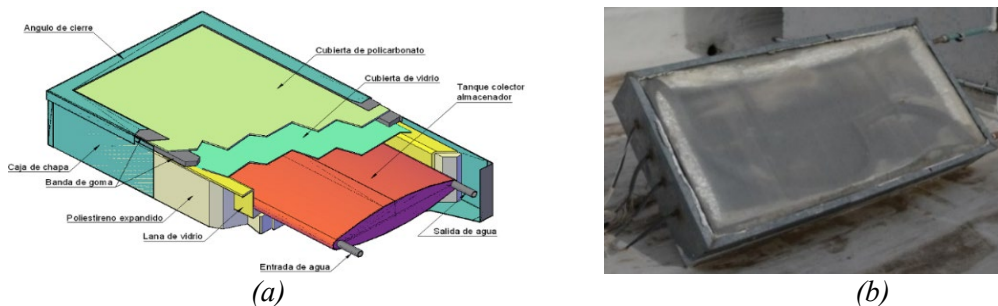


Figura 1: CAI oval (a) Corte esquemático (b) Equipo armado en plataforma de medición

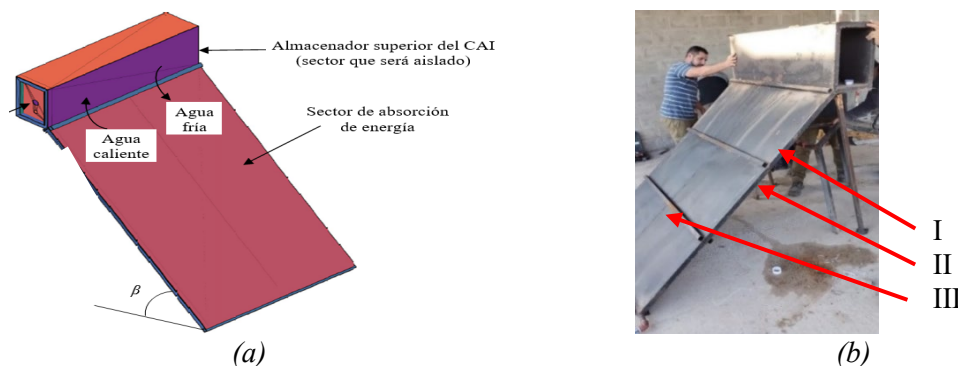


Figura 2 CAI pa (a) Esquema del interior (b) Foto del cuerpo interior

### Problemas de corrosión identificados.

Se identifican en la Fig. 2 b, tres puntos (I, II y III) en los cuales se localizaron pérdidas de agua. Estos lugares de pérdidas se muestran ampliados en la Fig. 3a, 3b y 3c.

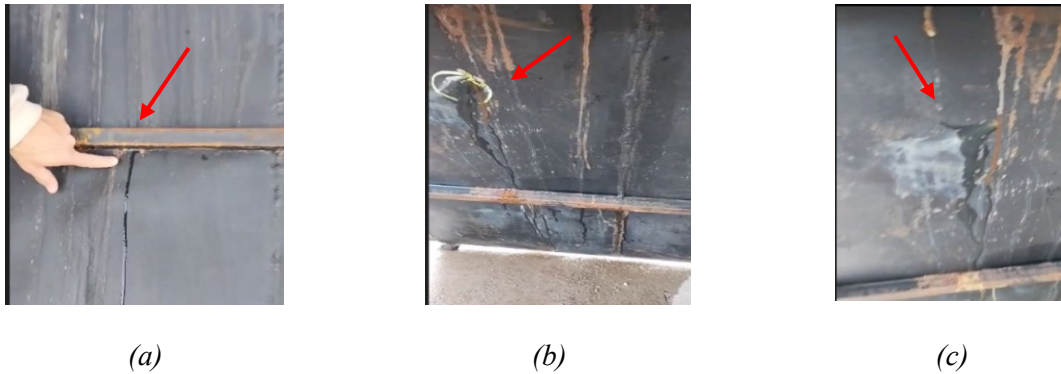


Figura 3 Pérdidas de agua en el CAI pa (a) en la parte anterior (b) y (c) en la parte posterior

Al CAI oval, que sólo mostraba problemas de haberse movido los burletes aislantes de su posición, al no poder obtener imágenes con la cámara endoscópica por la entrada o salida de agua, se decidió desarmarlo a fin de exponer el tanque oval y poder extraer el ánodo de sacrificio para su análisis.

En los dos CAI, las distintas partes del equipo se fijan entre sí por piezas de madera. En el CAI oval estos soportes (principalmente los inferiores estaban deteriorados por el contacto permanente con las pérdidas de agua). En las Fig. 4 a b y c, se muestra el estado de deterioro de la parte inferior de la abrazadera que unía el tanque oval con el chasis y la madera.

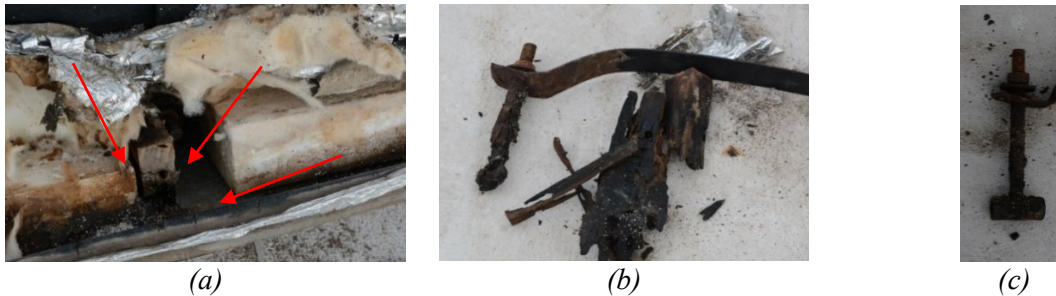


Figura 4 CAI oval (a) Indicio de deterioro en soportes de madera (b) y (c) anclajes deteriorados.

Continuando con el análisis, al extraer los ánodos de sacrificio de magnesio en sendos tanques, que se muestran en las Fig. 5 a, b, c y Fig. 6 a, se observó que el magnesio había reaccionado totalmente y se consumido, por lo que ya no brindaba protección anódica. Cabe destacar que en otro equipo CAI pa (gemelo al estudiado), a los tres años se le realizó el cambio del ánodo de sacrificio y todavía tenía más de la mitad de magnesio, por lo que la protección catódica debería durar como mínimo más de 5 años. En el caso mostrado, se deduce que el ataque al ánodo de sacrificio fue más intenso.

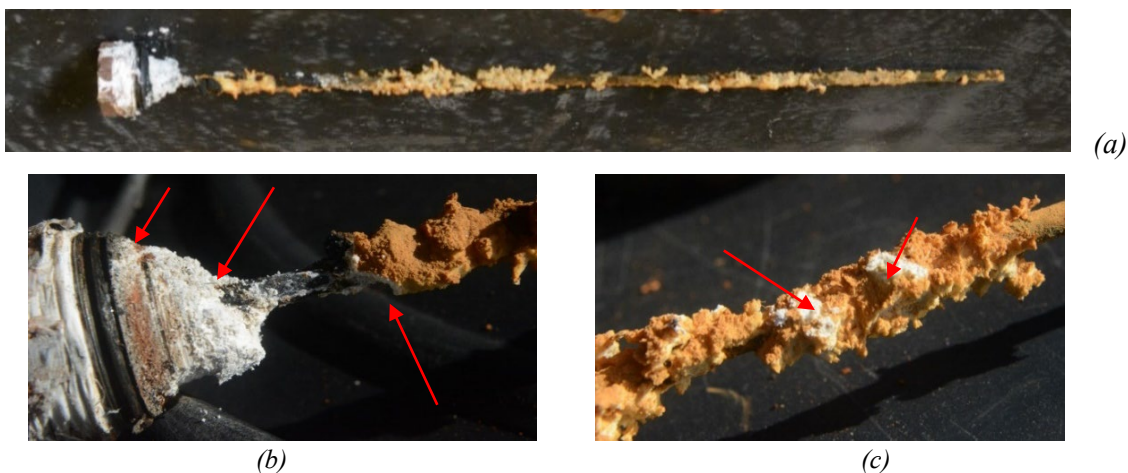


Figura 5 Ánodo de sacrificio (a) Vista total (b) Sales de magnesio (c) Óxidos marrones depositados

En el caso de las resistencias eléctricas, Fig. 6 b y c, en el CAI pa, se observó que estaban en funcionamiento y no presentaban incrustaciones de sarro. Lo que llamó la atención es que las incrustaciones se encontraban en la vaina que portaba la termocupla para censar la temperatura, ésta presentaba un color blancuzco (probablemente sarro incrustado).

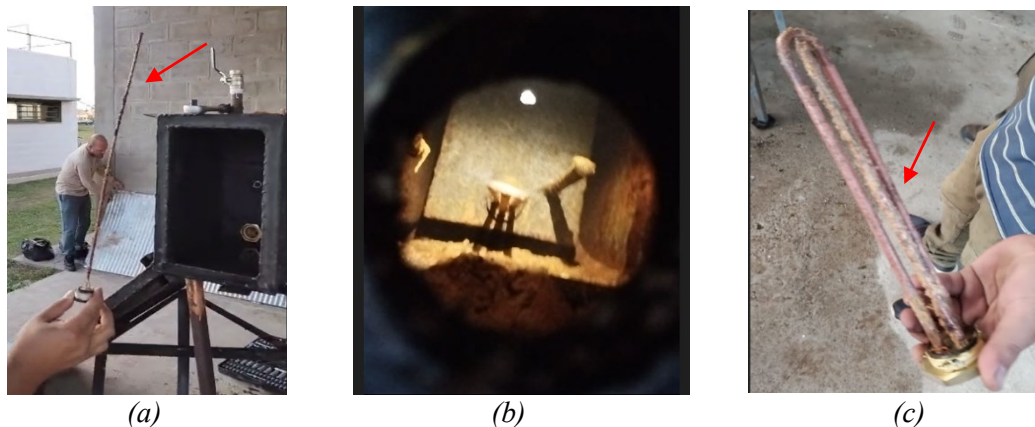


Figura 6 CAI pa (a) Ánodo de sacrificio (b) Vista al tanque desde el acople de la resistencia (c) Resistencia con la vaina de termocupla

Cabe también mencionar el proceso de pintado en el interior de los equipos, el cual fue realizado con pintura antióxido con base acuosa. Dicho proceso consistió en colocar un volumen de cinco litros de pintura dentro del equipo, cerrar todas las entradas del mismo y una vez suspendido mediante aparejos, mover el equipo de manera de mojar con pintura todas las superficies interiores, para asegurarse la correcta impregnación de dichas superficies. Este procedimiento se realizó dos veces, dejando suficiente tiempo para el secado de la pintura en el interior.

También el CAI oval presentó problemas de aislación térmica, producto de un sobrecalentamiento en verano que no estuvo en funcionamiento, ello se evidencia por la degradación térmica del poliestireno expandido (Fig. 7 a, b y c). Al extraer el tanque oval se notó que, en la parte posterior, (Fig. 8 a, b y c), presentaba una zona de herrumbre y posibles perforaciones causadas por oxidación por lo que se decidió examinarlo también por disección.

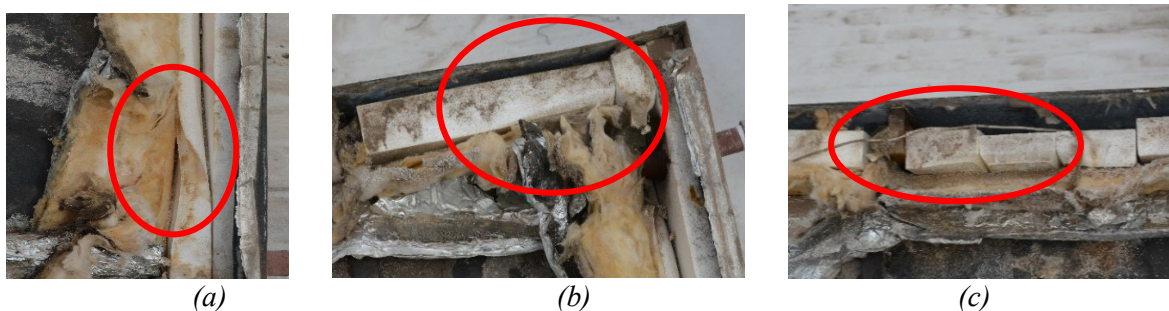


Figura 7: CAI oval (a) (b) y (c) Vista de la degradación térmica del poliestireno expandido.

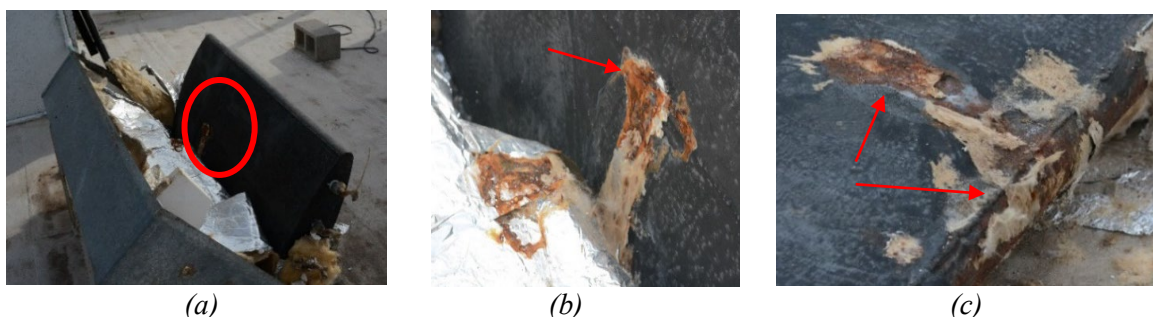
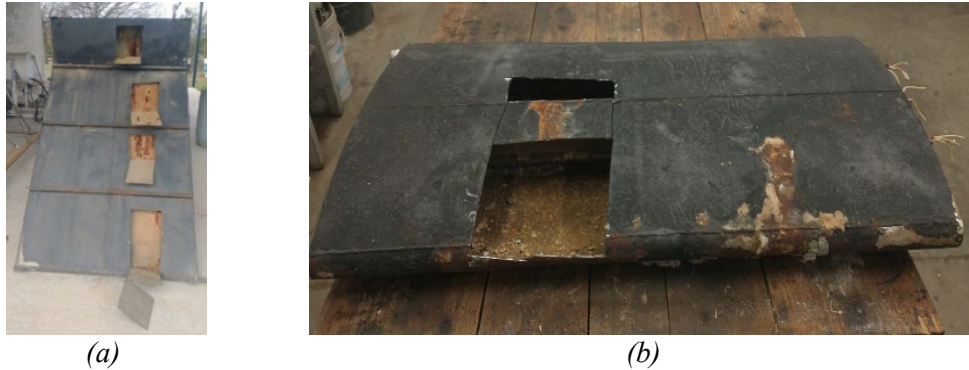


Figura 8: CAI oval (a) Vista de la parte posterior (b) y (c) zona de óxido localizada.

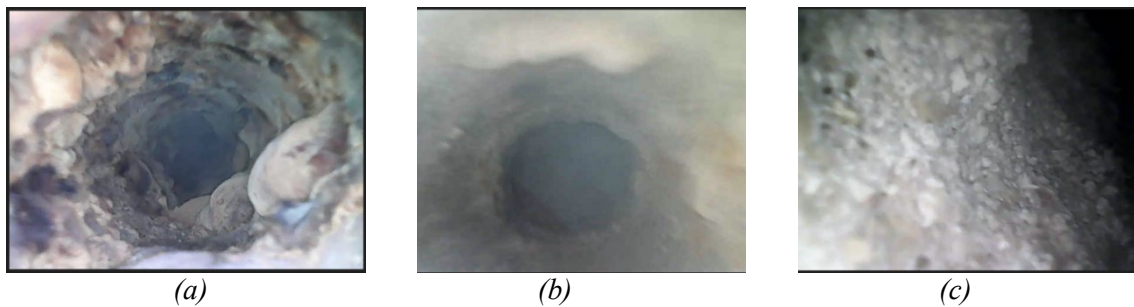
### ***Análisis de problemas identificados mediante disección***

En las Fig. 9 a y b se muestran las distintas disecciones realizadas a los dos equipos. En el CAI pa se decidió por un corte a la altura del tanque y tres en el colector a distintas alturas, la primera para ver el interior del tanque y las otras para poder observar la corrosión en las distintas alturas y la presencia de precipitados en el fondo del colector. En el CAI oval se realizaron dos cortes a fin de exponer la principal picadura, luego de su análisis visual en el exterior.



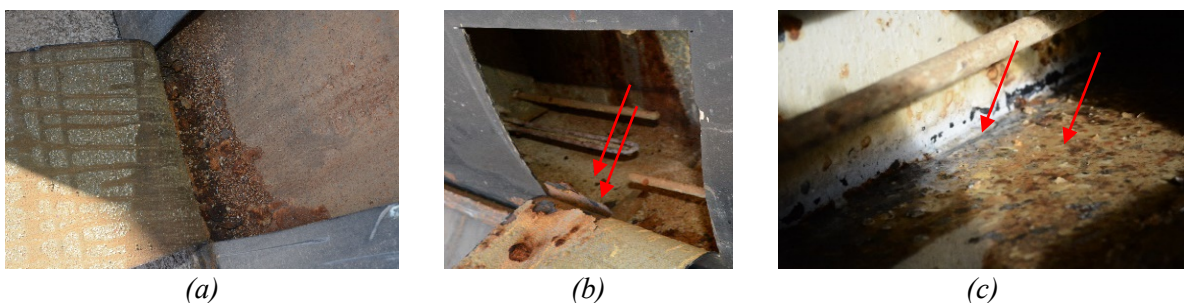
*Figura 9 Cortes de inspección (a) en el CAI pa y (b) en el CAI oval*

En el CAI pa se observaron, primero por una cámara endoscópica, distintas situaciones, (Fig. 10 a b y c). La primera, es que en la entrada de agua fría hay una deposición de gran cantidad de sarro en el interior de la cañería, lo cual se debe al contacto de dicha cañería con el agua muy caliente del tanque. Por otro lado, se observa que la cañería de salida de agua caliente no presenta mayormente incrustaciones. Por último, se ve que en el tanque debajo de los ánodos de sacrificio se encuentra gran cantidad de precipitados blanquecinos (se presume que son sales de magnesio).



*Figura 10 CAI pa (a) Entrada de agua con sarro (b) Salida de agua sin sarro (c) Fondo del tanque.*

En el CAI oval, con la cámara endoscópica se observó una entrada y salida sin mucha incrustación. Fue dificultoso obtener imágenes del interior por la existencia de un difusor colocado en la entrada para evitar que el flujo entrante rompa la estratificación. Luego, al revisar los interiores de los CAIs, Fig. 11 a, b y c, se observaron con mayor claridad los indicios de precipitados y deterioros por oxidación, los precipitados fueron más abundantes en el fondo del tanque del CAI pa que en el CAI oval, lo mismo que las ampollas formadas por óxidos.



*Figura 11: Precipitados (a) en el fondo colector del CAI pa (b) en el fondo del tanque del CAI pa (c) Interior del CAI oval con precipitados.*

Los tanques estaban ubicados en dos sitios diferentes de la ciudad de Río Cuarto, El CAI pa en el barrio Castelli (ubicado al Sur Oeste de la ciudad) provisto de agua de red de la ciudad de Río Cuarto, la cual proviene principalmente, de una galería filtrante ubicada bajo el nivel del río a 25 km de Río Cuarto hacia el Oeste (estando clorada) y el CAI oval en la locación del GES dentro de la UNRC y el agua es provista por un pozo de 30 metros de profundidad ubicado en el predio.

### ***Causas probables de la corrosión***

Según Trujillo (Trujillo et al., 2008) que explica los fenómenos de corrosión y de incrustación, estos están relacionados directamente con las características fisicoquímicas del agua, su velocidad y tiempo de retención hidráulico, así como del material que está en contacto. Específicamente, la alcalinidad, pH y los residuos de desinfectantes son los principales factores que influyen en el proceso de corrosión. Concentraciones bajas de alcalinidad favorecen la solubilidad del  $\text{CO}_2$ , incrementando la agresividad.

En los sistemas de distribución cuya base es el hierro, se presentan componentes asociados a los productos de corrosión como goetita (o goethita) ( $\alpha\text{-FeOOH}$  – Marrón-Pardo rojizo - Insoluble), lepidocrocita ( $\gamma\text{-FeOOH}$  – Rojo-Pardo negruzco - Insoluble), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – Negro grisáceo - Insoluble) maghemita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  – Pardo oscuro - Insoluble), óxido ferroso ( $\text{FeO}$  - Negro - Insoluble), siderita ( $\text{FeCO}_3$  – Pardo amarillento-Gris verdoso- Poco soluble), hidróxido ferroso ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$  – Verdusco – Soluble - Inestable), ferrihidrita ( $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  – Marrón Oscuro-Marrón amarillento - Insoluble), carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$  – Blanco – Poco Soluble) y compuestos ferroso-férricos que incluyen  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  o  $\text{CO}_3^{2-}$ . Los contaminantes asociados al hierro o acero galvanizado o fundido son hierro, zinc, cadmio y plomo. (Navarrete Cueva, 2007).

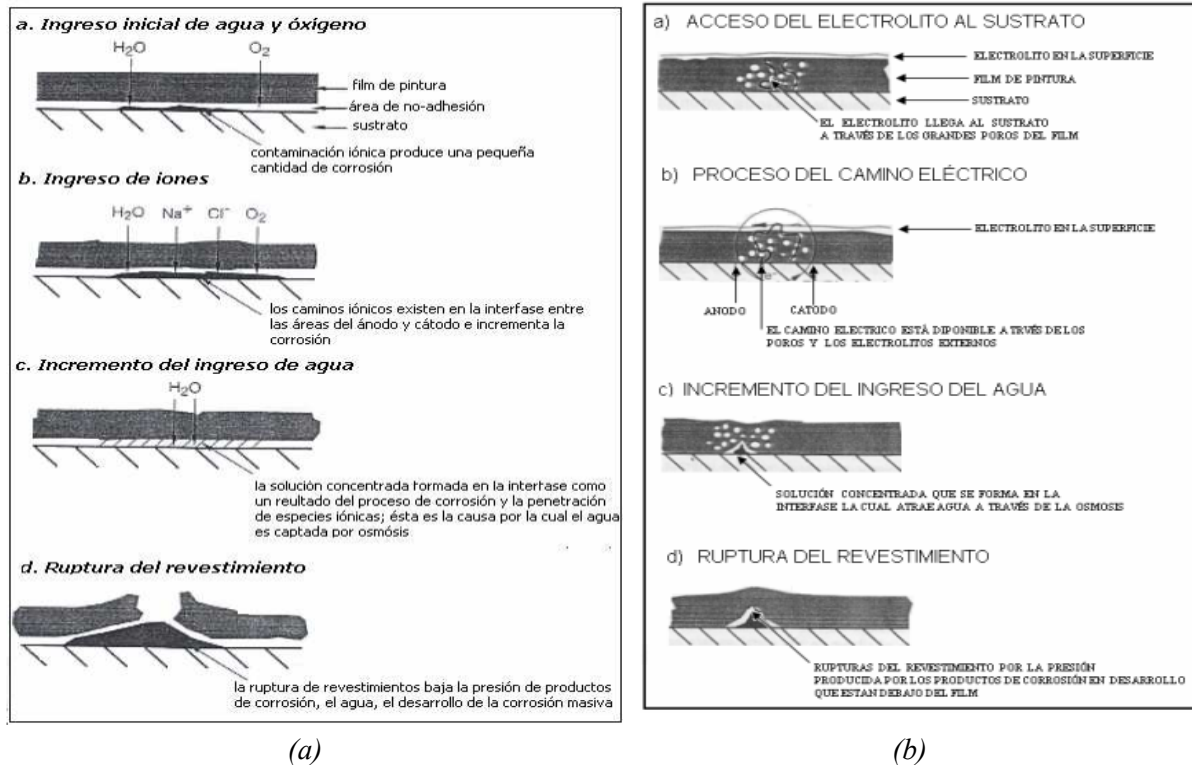
Asimismo, Navarrete (Navarrete Cueva, 2007) analiza el efecto del papel de la capa protectora y su influencia en el mecanismo de la corrosión. Debemos tener presente que un revestimiento brinda tres mecanismos de protección a- electroquímico, b- fisicoquímico y c- de adhesión, donde es común que participen estos tres principios. El primero está relacionado con la presencia de pigmentos activos y son indispensables para la protección ya que un revestimiento orgánico no es impermeable al agua. Desafortunadamente iones de cloruros, sulfatos o nitratos realizan una acción contraria a los anticorrosivos o inhibidores. El segundo consiste en el bloqueo de los agentes corrosivos como el agua, el oxígeno o los estimulantes de la corrosión. El tercer mecanismo está relacionado en cómo se adhiere la capa orgánica al metal (es fundamental la preparación de la superficie como desengrasado, eliminación o pasivación de óxidos, etc. y se debe asegurar que existan un gran número de sitios reactivos sobre el metal disponibles para reaccionar con el revestimiento que, además, debe ser efectivo en condiciones de presencia de agua.

### ***Corrosión debajo de un film de pintura***

A continuación, se estudiaron posibles mecanismos de corrosión debajo de un film de pintura, principalmente como resultado del transporte de agua dentro de éste. La corrosión aquí puede deberse a la pérdida de adhesión del film, por humedad, o sin pérdida de adhesión, que se muestran en los esquemas de las Fig. 12 a y b. En el primer caso comienza en sitios no adheridos a causa de la ruptura de los enlaces por la presencia de agua, lo que causa el acceso de sales corrosivas, estableciendo así pilas de corrosión. La penetración de agua y sustancias iónicas trae consecuencias mecánicas como la ruptura del film. En caso de no perder adhesión el film, varios mecanismos propuestos se centran en la permeabilidad del film y en la presencia de discontinuidades (aberturas o defectos). La acumulación de agua en estos sitios contribuye eventualmente al rompimiento del film y permitir la dispersión del electrolito debajo de éste para un mayor ataque.

Por otra parte, los mecanismos de corrosión explicados en la bibliografía (Mata Bravo, 2011) (Maquinarias Pesadas, 2023) destaca que la corrosión metálica consiste básicamente en dos procesos de transferencia de electrones en lugares físicamente diferentes de la estructura metálica (procesos anódicos y catódicos). Por lo que el proceso de corrosión implica: (a) generación y transferencia del catión metálico a la solución, (b) transferencia del oxígeno al cátodo metálico, (c) transferencia electrónica del metal al oxígeno, (d) paso de los electrones del ánodo al cátodo (electro neutralidad metálica) y (e) difusión de los iones  $\text{Fe}^{++}$  y  $\text{OH}^-$  en el electrolito (electro neutralidad iónica).

Puede concluirse que la protección tiene que enfocarse en anular o disminuir estos pasos. Pero el agua potable es frecuentemente saturada de oxígeno disuelto y agentes bacteriostáticos y bactericidas como cloro ( $\text{Cl}_2$ ), siendo éste corrosivo. En concordancia con ésto, debemos mencionar que varios factores aceleran el proceso de corrosión, entre ellos la presencia de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), la temperatura, ya que produce un incremento en las velocidades de reacción, y el efecto de la presencia de oxígeno y oxidantes durante el proceso de oxidación; en general, la presencia de estos elementos aumenta la velocidad de la reacción de corrosión.



(a) (b)  
 Figura 12: Mecanismo de corrosión en films, extraído de Navarrete Cueva, 2007  
 (a) con pérdida de adhesión (b) sin pérdida de adhesión

### Corrosión por oxígeno

Este tipo de corrosión ocurre generalmente en superficies expuestas al oxígeno diatómico disuelto en agua o aire; que se ve favorecido por altas temperaturas y presión elevada (calderas). Podemos decir que el oxígeno acelera la corrosión en dos formas, una como un despolarizador, dado que el oxígeno se combina con electrones en el cátodo impidiendo la formación del manto de hidrógeno. Y otra, como un oxidante, dado que la oxidación de los iones ferrosos ( $\text{Fe}^{++}$ ) y férricos ( $\text{Fe}^{+++}$ ) incrementa la tasa de corrosión a un pH por encima de 4.

También, de acuerdo a diferente autores (Navarrete Cueva, 2007) (Maquinarias Pesadas, 2023) debemos mencionar que las diversas formas de corrosión pueden ser clasificadas por su forma de ataque: (a) uniforme, que es la más benigna de todas, (b) localizada, se realiza en algunas partes, (c) intergranular, se extiende por los bordes de grano y es muy dañina (en cobre, aluminio y acero inoxidable) y (d) por picado, se da en ciertos puntos del metal y suelen formar túneles microscópicos.

Otra forma de clasificación es según el mecanismo y se puede diferenciar entre: (a) galvánica, que resulta de la interacción de dos metales con distintos potenciales de oxidación en un atmosfera húmeda o solución corrosiva, (b) bacteriana, que se da generalmente en el suelo y puede ser aeróbica o anaeróbica, (c) por aireación diferencial, que se debe a que la superficie del metal está expuesta a un electrolito que posee aireación variable ya sea por agitación, difusión diferencial, depósitos de impurezas, entre otros, (d) selectiva, que se da cuando en una aleación un metal, (e) por diferencias de temperatura, en donde el ánodo y el cátodo son del mismo metal, pero uno se mantiene a una temperatura mayor que el otro por medios externos, y (f) por celdas de concentración, en donde existen regiones con concentraciones diferentes de electrolitos o sustratos. Además, la heterogeneidad del metal o una impureza cercana a la

superficie del metal es suficiente para iniciar una corrosión electroquímica; a este tipo de corrosión se denomina efecto Evans.

### **Indicadores de corrosión o incrustación del agua**

Trujillo et al., (2008) cita que, en México, para reducir las posibilidades de corrosión en la infraestructura hidráulica, la Comisión Nacional del Agua recomienda que los materiales mantengan una película de Carbonato de Calcio,  $\text{CaCO}_3$ ; asimismo, para evaluar la tendencia agresiva del agua, considera el uso de los siguientes índices: de saturación de Langelier, de estabilidad de Ryznar, de corrosión de Riddick, entre otros. De entre ellos, los índices de Langelier y Ryznar son los más utilizados. Estos modelos son considerados como cualitativos. El índice de estabilidad de Ryznar, toma como base los mismos parámetros que Langelier, pero siempre da un valor positivo, el cual provee una idea más clara del nivel corrosivo o incrustante del agua. Además, existen métodos que permiten determinar de manera cuantitativa la agresividad del agua, tal es el caso de Mojmir Mach y Legrand-Poirier, pero debido a su complejidad y difícil aplicación, dichos modelos suelen ser poco utilizados.

### **Análisis de las causas de corrosión en los equipos estudiados**

Según la Fundación Centro Canario del Agua (FCCA) cita que el hecho que un agua sea agresiva potencia su acción corrosiva, aunque para ello deben intervenir diversos factores adicionales. De la misma manera, un agua equilibrada en relación al carbonato de calcio puede ser aún corrosiva con respecto a los metales. Como el equilibrio calco-carbónico se usa para determinar el carácter agresivo o incrustante de un agua, dicho equilibrio nos cuantifica la interacción entre carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) y el ácido carbónico ( $\text{CO}_2$ ). Por ello nos guiaremos por el índice de Ryznar (RSI), que es más conveniente ya que, aunque se consiga el equilibrio calco-carbónico no se elimina por completo la posibilidad de que esa sea corrosiva.

Recurriendo a datos de análisis de agua, provistos por el departamento de geología de la UNRC, se obtuvieron distintos índices que indican si el agua es incrustante o corrosiva, los cuales se muestran en la Tabla 1: dos análisis, realizados uno con aguas del GES y otro con aguas de la galería filtrante. Estos índices fueron calculados por un software provisto por la página de la Fundación Centro Canario del Agua (FCCA, 2023) y se fijó una temperatura de 60 °C.

*Tabla 1: Distintos índices de Incrustación Corrosión del agua calculados a 60 °C.*

<b>Índice \ Muestra</b>	<b>GES (1)</b>	<b>GES (2)</b>	<b>Galería Filtrante</b>
Dureza mg $\text{CO}_3\text{Ca}$ /l	157,88	171,68	65,88
	150 a 300 dura	150 a 300 dura	50 a 150 Moderadamente dura
Alcalinidad	139,45	188,67	116,48
	> que 147,6 muy alta	> que 147,6 muy alta	98,4 a 147,6 alta
Índice de Langelier (LSI)	0,64	1,29	-0,01
	> que 0 tendencia incrustante	> que 0 tendencia incrustante	< que 0 tendencia corrosiva
Índice de saturación de Carbonato de Calcio	0,66	1,3	-0,02
	> que 0 Sobresaturado incrustante	> que 0 Sobresaturado incrustante	< que 0 Insaturado corrosiva
Índice de Ryznar (RSI)	6,42	5,63	7,52
	de 6,0 a 7,0 ligeramente incrustante o corrosivo	de 5,0 a 6,0 ligeramente incrustante.	de 7,5 a 9,0 fuertemente corrosivo.

Si se observan ahora las imágenes de las ampollas en las Fig. 13 a, b y c y 14 a, b y c del CAI pa, se ve que existen muchas ampollas de óxido tanto en el sector del tanque como en sector del colector. En el sector del colector se notan dos particularidades: primero, que existen más ampollas de óxido en la parte media, y segundo, que la oxidación se concentra en la parte posterior del colector y no en la parte anterior



(donde está expuesta al sol). Además, se observa que en algunas ampollas, la corrosión ha perforado la chapa y en otras está en ese proceso; y si se realiza un corte, se pueden observar capas de diferentes compuestos incluyendo la capa de pintura protectora.

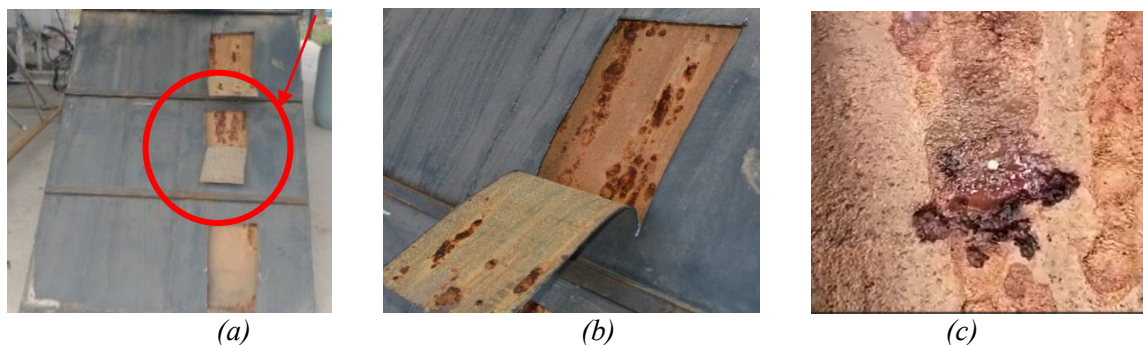


Figura 13 CAI pa (a) (b) Distribución de las ampollas de óxido y (c) perforación por oxidación

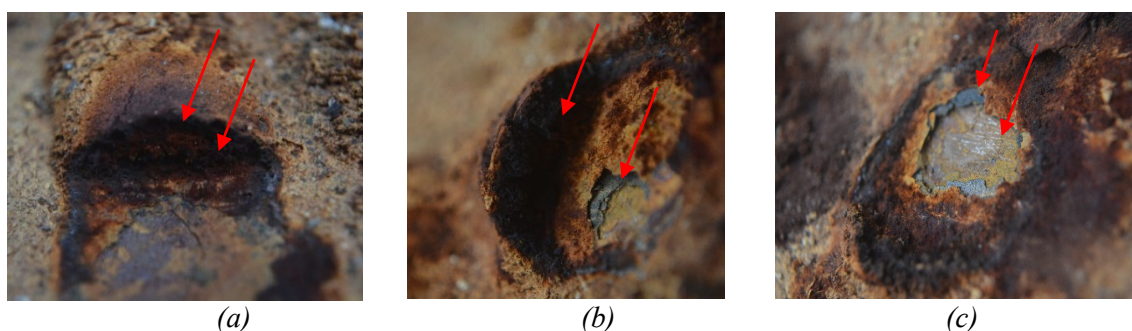


Figura 14 CAI pa en (a) (b) Vista de una ampolla en corte y (c) capa de antióxido y metal base.

Por otra parte, en el CAI oval se observan mucho menos ampollas y sarro, pero las ampollas actuaron de idéntica forma que, en el otro colector. En este caso (Fig. 15 a, b y c) primero fue raspada la superficie que da al exterior, descubriendo una perforación; luego, al cortar la chapa, se observó la perforación y además se vio que en el interior del colector oval, se desprendió una ampolla, que luego fue fotografiada (Fig. 16 a, b y c), observándose muchas capas de compuestos distintos.

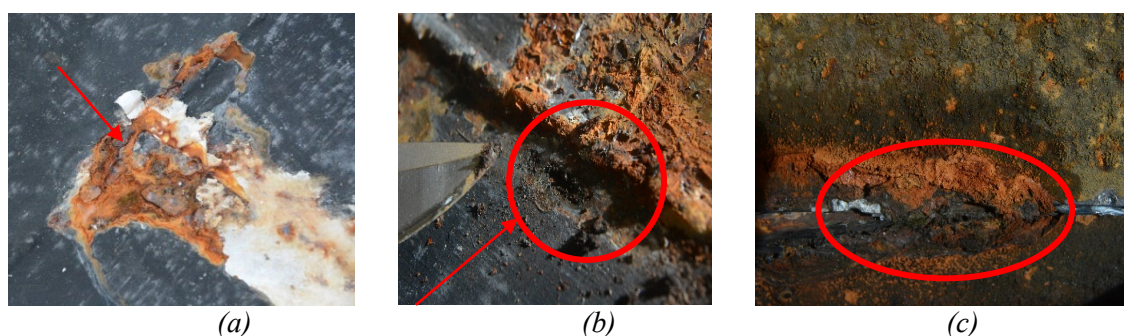


Figura 15 CAI oval (a) Mancha de óxido, (b) Perforacion desde el exterior y (c) parte del interior

#### **Possible mecanismo de oxidación**

En un trabajo de Rosado (2023) se explica un mecanismo de corrosión localizada, que es posible que exista en los casi. Brevemente, este mecanismo se inicia luego que el agua y los electrolitos se difundieron a través de la capa de pintura y comienza la corrosión; a continuación, los productos de corrosión (generalmente óxidos hidratados) al ser poco solubles, precipitarán dejando al electrolito en condiciones de recibir más cationes. Estos óxidos podrán precipitar sobre el metal y el primer producto formado por la corrosión en el ánodo es el hidróxido ferroso, relativamente soluble, pero si hay provisión de oxígeno los óxidos ferrosos pasarán a férrico mucho menos soluble, creando un medio ácido favorable a la disolución del metal.

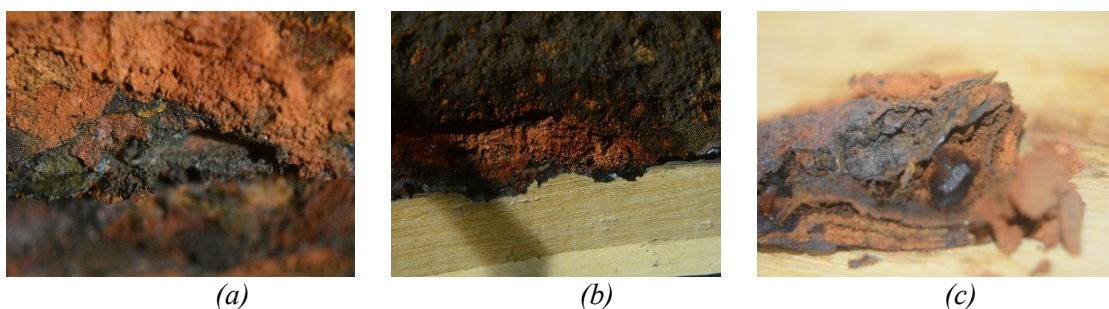


Figura 16 (a) (b) y (c) Corte de ampollas de óxido en el CAI oval, mostrando diferentes compuestos.

Estos óxidos insolubles crearán una cubierta permeable en donde los iones ferrosos migrarán a través de ella, encontrando condiciones oxigenadas y produciendo más hidróxido férrico. Se formará un microscópico pozo debajo de la ampolla, donde el electrolito será ácido, el proceso se hará continuo y a la larga perforará el metal (picadura), debemos recordar que el volumen del hidróxido férrico formado puede llegar a ser veinte (20) veces de mayor tamaño que el metal original (Fig. 17 a y b). La presencia de algunas sales en el agua, favorece el proceso corrosivo, especialmente en el caso del cloruro, por la gran afinidad que este anión tiene por el hierro con el que forma cloruros y oxiclорuros.

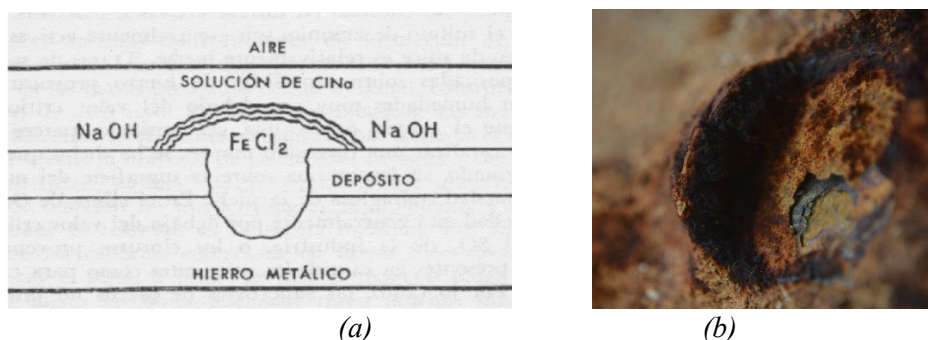


Figura 17 (a) Esquema de la corrosión localizada, extraída de Rosado, 2003  
(b) Ampolla formada en los CAIs

### Protección catódica

En la bibliografía (Maquinarias Pesadas, 2023) (Rosado, 2023) se explica que un ánodo de sacrificio es el componente principal de un sistema de protección catódica galvánica que se utiliza para proteger contra la corrosión las estructuras metálicas enterradas o sumergidas. Los ánodos de sacrificio están hechos de una aleación metálica con mayor tendencia a la oxidación que el metal de la estructura a proteger, dicha aleación metálica tiene un potencial de reducción menor. La diferencia de potencial entre los dos metales implica que el ánodo galvánico se corroe preservando la estructura a conservar.

Para que esto funcione debe haber un flujo de electrones entre el ánodo y el metal a ser protegido (contacto directo) y una vía de iones tanto entre el agente oxidante (agua) y el ánodo, como entre el agente oxidante y el metal a proteger, formando así un circuito cerrado. Existen tres metales principales utilizados como ánodos: magnesio, aluminio y zinc. Cada uno tiene sus ventajas y desventajas. El magnesio es el que tiene el potencial eléctrico menor de entre los tres metales y es el más adecuado para las áreas donde la resistividad del electrolito (suelo o el agua) es mayor.

### CONCLUSIONES

- a- El sistema de ánodo de sacrificio funcionó y se debe revisar cada dos años para asegurar que la protección catódica sea efectiva, ya que cuando se acaba dicha protección empieza la serie de reacciones de corrosión.
- b- La capa de antióxido colocada en el interior del CAI oval fue más efectiva que en el CAI pa. Esto es debido probablemente al proceso de pintado que, aunque fue el mismo, la geometría del

- equipo favorecía el impregnado de la superficie interior en el CAI oval. En el CAI pa quedaron superficies convexas que dificultan la adhesión de una capa de pintura en el interior.
- c- El agua potable proveniente de las galerías filtrantes posee un índice de Ryznar (RSI) de 7,52 que indica que es fuertemente corrosiva y además a esto debemos sumarle que al ser agua de red posee un tratamiento por parte del Ente Municipal de Obras Sanitarias de Río Cuarto (EMOS) que asegura un cloro residual de entre 0,3 y 0,6 g/l, favoreciendo las reacciones de oxidación. En cambio, en el agua del pozo de la UNRC, que dio un índice de Ryznar (RSI) de 6,025 en promedio, indica que es ligeramente incrustante o corrosiva, lo que se comprueba por el mayor periodo de tiempo de funcionamiento.
  - d- Se observó en los dos CAIs que el mecanismo de corrosión probablemente se debió a un pasaje de agua a través de la capa de pintura (por falta de adherencia u ósmosis) y luego un mecanismo de oxidación por picadura, ya que se realizaron perforaciones debajo de ampollas de óxidos. Esto se observó mayormente en el CAI pa, por lo comentado en el punto anterior, además, puede haber una situación de oxigenación diferenciada (probablemente debido a precipitaciones de carbonato de calcio) y por existir superficies (anterior y posterior del colector) a diferentes temperaturas, esto se evidencia en las paredes, en donde una está muy corroída (ánodo) y la otra en donde la corrosión es casi nula (cátodo).
  - e- En el CAI pa, al poseer una resistencia eléctrica, cuando está se encuentra en funcionamiento, puede haber competencia de ánodo de sacrificio ya que el equipo puede actuar como ánodo si se dan las condiciones propicias.
  - f- Una posible solución para poder realizar el cambio del ánodo de sacrificio cuando sea necesario (un usuario en general no controla el tiempo de uso del mismo) sería colocar una cascada de ánodos de sacrificio a fin de que cuando se termine el primer ánodo (el de menor potencial) continúe el próximo y este active un mecanismo indicador para obligar al cambio de dichos ánodos.
  - g- El sistema de alimentación de agua fría en el colector CAI pa debería cambiarse ya que, al ingresar al equipo a través del tanque, y este contener agua caliente, causa la precipitación de sales en el conducto de ingreso aumentando así la pérdida de carga.
  - h- En el CAI oval se debe proveer un sistema de expulsión de agua en la parte inferior, a fin de que si existe presencia de agua no se deterioren los sistemas de anclaje que están compuestos por madera y tornillos de acero.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC). Ha sido subsidiado por la Secretaría de Ciencia de la UNRC y Técnica y la Facultad de Ingeniería de la UNRC. También se agradece al departamento de Geología (UNRC) por brindar datos de análisis y distribución de agua en la ciudad de Río Cuarto.

## REFERENCIAS

- Barral J., Galimberti P., Lema A., Adaro J. y Fasulo A. (2002) Design, construction and simulation Analysis of a low-cost Tubular Integral Collector Storage System. Proceedings de Euro Sun 2002 - The 4th ISES - Europe Solar Congress. Bologna, Italia.
- Duffie J. A.; Beckman W. A.; Blair N. (2020) Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind, fifth edition. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.
- Fasulo A., Follari J., Barral J. Comparison between a simple solar collector accumulator and a conventional accumulator. Solar Energy, Vol. 71/6, pp. 389-401, 2001.
- FCCA [En línea] Fundación Centro Canario del Agua - Dirección General de Aguas del Gobierno de Canarias, Dirección URL: <<https://fccca.es/productos-y-publicaciones/software-online/>> [consulta: 05 de agosto de 2023].
- Garnica J.H, Lucchini J.M., Barral J.R., Buosi P.D., Galimberti P.D. (2019) Ensayo Térmico Normalizado de un Colector Solar con Acumulación Integrada Parcialmente Aislado, Hecho con Materiales Accesibles y de Fabricación Simple. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 23, pág. 02.25 – 02.36.

- Garnica J.H., Lucchini J.M., Barral J.R., (2017). Colector solar con acumulación integrada de perfil oval, análisis teórico-experimental de su performance y estudio comparativo. Actas del COCIM 2017, XVII Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica, Santiago de Chile, 2017, pp. 166-170.
- Garnica J.H., Barral J.R., Lucchini J.M., Stoll R. G., (2011). Diseño Optimizado de un Colector Acumulador de Recipiente No Cilíndrico Usando Métodos de Elementos Finitos. Avances en Energía Solar y Medio Ambiente. Vol. 15, pág. 03-51 - 03-59
- Maquinarias Pesadas [En línea] Manual de Corrosión de Metales – Tipos, Resistencia, Causas y Protección Catódica. Dirección URL: <<https://www.maquinariaspesadas.org/blog/2205-manual-corrosion-metales-tipos-resistencia-causas-proteccion-catodica>> [consulta: 05 de agosto de 2023]
- Mata Bravo S. J., Tesis (Grado), (2011) Cálculo de la Velocidad de Corrosión en un Acero al Carbono Empleando el Líquido Extraído de la Cáscara de la Nuez del Merey (LCM) como Inhibidor en Presencia De CO<sub>2</sub>. Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui - Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas - Departamento de Ingeniería Química – Venezuela.
- Navarrete Cueva E.F. [En línea] Tesis (Grado), (2007) -, Corrosión y Degradación de los Metales. Escuela Politécnica - Quito Ecuador. Dirección URL: <<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2771/1/CD-0553.pdf>> [consulta: 05 de agosto de 2023]
- Rosado R. [En línea]- Corrosión del Acero en el Concreto. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - FCEIA - UNR - Rosario – Santa Fe. Dirección URL: <<https://www.fceia.unr.edu.ar/materialescivil/Publicaciones/C.pdf>>, [consulta: 05 de agosto de 2023].
- Stoll R. G., Garnica J. H., Barral J. R. y Fasulo A. J. (2007) Estudio del comportamiento de colectores con acumulación integrada de dos tanques con y sin descarga de agua caliente. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 11, pp. 3-53:3-60.
- Trujillo E., Martínez V., Flores N. S., (2008) Ajuste del Equilibrio Químico del Agua Potable con Tendencia Corrosiva por Dióxido de Carbono, Información Tecnológica Vol. - 19 N°6 – 2008. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería, Toluca, México.

#### **CORROSION PROBLEMS ANALYSIS FOR TWO INTEGRAL COLLECTOR STORAGE SYSTEMS BUILT WITH SIMILAR RAW MATERIALS AND PROCESSES**

**ABSTRACT:** This article analyzes oxidation problems that occurred in two units to heat water by means of solar energy, which are prototypes of integral collector storage systems. These units are geometrically different but they have been built with similar raw materials and using similar processes. The study is concentrated on the absorber-storage component, for which black steel sheet was used as the main raw material. The two systems worked well from the thermal point of view, but they presented pitting corrosion after a certain number of years. The difference between the time intervals of the two units motivated the present study, taking into account that the time interval was fairly short in one case. Looking for reasons that cause these problems, the systems were disassembled from their routine applications, and their absorber-storage components were cut down and opened in critical sectors. Different kinds of water fed to each system; then, their contents were analyzed, considering characteristic indexes to observe if the water presented corrosive or fouling qualities. Possible corrosion mechanisms were also analyzed, and protective means such as antirust paints and sacrificed anode were suggested. Finally, conclusions are presented about the possible causes of corrosion and preventive measures are proposed.

**Keywords:** solar collector, integrated storage, hardness of water, corrosion.