

Evaluación de problemas de corrosión en tuberías de una central hidroeléctrica

Evaluation of Corrosion Problems on Pipelines of an Hydroelectric Power Station

Dr. Rigoberto Marrero-Águila¹, rigo@quimica.cuaje.edu.cu, Ing. Arturo Ramón Zelaya-Reina², artzelaya@yahoo.com

¹Facultad de Ingeniería Química, CUJAE, La Habana, Cuba, ²Central Hidroeléctrica "General Francisco Morazán", República de Honduras

La central hidroeléctrica "Francisco Morazán", desde su puesta en marcha, no había sido objeto de inspección general por el lado interno de las tuberías conductoras de agua. Las partes metálicas de la instalación, expuestas a la atmósfera, han presentado evidencias de procesos de corrosión. Se realiza un estudio de los problemas de corrosión que se presentan en la instalación para proponer soluciones. Se aprovecha una parada general de la central para realizar una inspección y se realizan mediciones, ensayos y observaciones. Se analiza la información disponible sobre las aguas y sobre el entorno, así como las mediciones, ensayos y observaciones realizadas. Se obtienen resultados sobre las posibilidades de corrosión de las tuberías por su lado interno, por acción del agua, y sobre la corrosión por la cara exterior, en contacto con el entorno. Las aguas clasifican como poco incrustantes y no corrosivas, brindando protección contra la corrosión, lo cual se corroboró con la observación directa. Por la cara externa se observaron claros signos de corrosión. Los sistemas de pinturas utilizados, cumplen con los espesores recomendados pero no garantizaron la protección anticorrosiva del acero, en las condiciones de humedad y presencia de contaminantes. Las tuberías no están en peligro inminente de presentar perforación, pero se recomienda tomar medidas para evitar que se acentúen los daños, tales como evaluación completa a los sistemas de pinturas previstos a utilizar, para seleccionar aquellos que brinden adecuada protección al acero, en las condiciones de explotación de la instalación estudiada.

Palabras clave: hidroeléctrica, corrosión, índice de saturación, corrosión atmosférica, pinturas.

"Francisco Morazán" Power Station, since it started to work, had not been object of a general inspection into the internal side of pipelines system. Metallic parts of the installation, exposed to the atmosphere, have corrosion process evidences. A study of general corrosion problems is carried out to propose adequate solutions. During a general parade of the power station, measurement, assays and observations are made. Available information about waters and surroundings, and measurement and observations, are analyzed. Results are obtained about the corrosion possibility of pipelines on the internal side by water action, and on the external side, in contact with the surroundings. Waters classify as a very little incrusting and no corrosive, offering protection of steel against corrosion. These results were corroborated by direct observation. On the external side, clear corrosion signs were observed. Painting systems, although showed recommended thickness, were incapable of maintaining the corrosion protection of steel in the high humidity conditions and pollutant presence by a long period of time. Pipelines are not in imminent danger of perforation, but some rules should be considered in order to avoid future damages. A complete evaluation of painting systems should be carried out before using them, in order to make a correct selection of those paints able of offering adequate corrosion protection in exploitation conditions of the studied installation.

Key words: hydroelectric, corrosion, saturation index, atmospheric corrosion, painting systems.

Introducción

La Central Hidroeléctrica "General Francisco Morazán", ubicada en el estado de Cortés de la República de Honduras, es una instalación de aprovechamiento múltiple, ya que además de

producir energía eléctrica, amortigua las crecidas de los ríos Humuya y Sulaco. Está localizada en la zona central de la República de Honduras entre los polos de desarrollo más importantes del país: Tegucigalpa, la capital a 180 km y San Pedro Sula, principal ciudad industrial, a 80 km. /1/. La presa,

de aproximadamente 300 m de longitud, está situada en un angosto cañón rocoso e intercepta las aguas del río Comayagua. Su embalse abarca un área de aproximadamente 94 km² de superficie y contiene unos 5 700 millones de m³ de agua. /1/. La sala de máquinas subterránea está localizada dentro de la montaña de roca y, ubicadas en su parte inferior, las cuatro turbinas, mueven cuatro generadores de 75 MW, conectados a un transformador trifásico. La energía sale a través de cables de aislados hasta la sub-estación aledaña a la instalación. /1/

Se realiza el estudio debido a que se detectan problemas de corrosión en la parte externa de las tuberías conductoras de agua de la central. Existen fallos evidentes en los sistemas de protección anticorrosiva aplicados y signos de corrosión en su parte exterior. Se pretende evaluar los daños por corrosión, tanto por la cara externa como por la cara interna de las tuberías, dado que estas tuberías no habían sido nunca inspeccionadas por el interior. Los objetivos del trabajo que se presenta son:

- Verificar el estado en que se encuentran las tuberías en cuanto a la corrosión interna, a causa del contacto con el agua, y la corrosión externa, provocada por el medio exterior.
- Analizar los resultados de evaluaciones realizadas a probetas de acero pintadas con los sistemas de pinturas que tradicionalmente se han aplicado, para evaluar su comportamiento ante diferentes condiciones de ensayo.
- Dar las recomendaciones generales para atenuar los problemas de corrosión que sean detectados.

Metodología de estudio y resultados obtenidos

Análisis de la corrosión de las tuberías por el lado interno

Las tuberías objeto de estudio conducen agua proveniente del embalse El Cajón. Son aguas naturales y superficiales, a temperatura ambiente (entre 20 y 30 °C, en dependencia de la época del año), y a una velocidad que oscila entre 2 y 3 m/s. El material de construcción de las tuberías es acero al carbono.

Como se conoce, el proceso de corrosión del acero en aguas obedece a un mecanismo electroquímico, donde el O₂ disuelto en estas aguas es el principal agente corrosivo. /2-6/. La velocidad de corrosión del acero en estas condiciones está determinada por la difusión de las moléculas de O₂ hacia la superficie del metal. En este proceso, los factores internos, tales como la composición química o estructura del acero tienen muy poca influencia en la velocidad de corrosión en las aguas. /2-6/

De gran importancia resulta la influencia de los factores externos, como la concentración de O₂, la temperatura, el pH, el tipo y concentración de sales y el régimen hidrodinámico. La presencia de O₂ y sales disueltas es decisiva en la velocidad de corrosión del acero. /2-6/ En las aguas naturales están presentes de forma importante los iones Cl⁻ y SO₄²⁻, que empeoran la calidad protectora de los óxidos de hierro formados. /5, 6/

El Índice de Saturación de Langelier (IS) relaciona el pH del agua con el pH de saturación de una solución de CaCO₃. Cuando este índice es negativo, el agua clasifica como no incrustante y por tanto resulta más corrosiva, y cuando es positivo clasifica como incrustante y en consecuencia menos corrosiva. /5, 6/

Análisis de las características de las aguas del embalse "El Cajón"

Se consideraron estudios previos de las principales propiedades físico-químicas y bacteriológicas del agua del embalse El Cajón, en varios puntos de muestreo y a diferentes profundidades. /7, 8/

Según los resultados de los reportes, como aparece en la tabla 1, el agua del embalse puede clasificarse de neutra a ligeramente alcalina, con temperaturas directamente asociadas a la época del año y la profundidad, de baja a media alcalinidad, de dureza media, de bajo contenido cloruros y sulfatos y normales concentraciones de oxígeno disuelto y sin otras sustancias ajenas a la composición normal de las aguas superficiales, por lo que estas aguas no deben resultar altamente corrosivas ni muy incrustantes y deberán causar un mínimo de problemas de corrosión en su contacto con las paredes interiores de los tubos.

Las aguas de alguna dureza permanente, pueden provocar sedimentos calcáreos debido a la precipitación de sales insolubles (carbonatos y bicarbonatos de Ca y Mg), que tienen un carácter adherente, lo que lejos de ocasionar daños por

corrosión, retardan este proceso, debido a que limitan la difusión del O₂ a la superficie del metal /2-6/. Es de esperar que el agua del embalse de El Cajón no provoque serios problemas de corrosión en el interior de las tuberías.

Tabla 1
Valores límites de los parámetros del agua de mayor influencia en su corrosividad

Parámetro	Unidad	Valor máximo	Valor mínimo
pH	-	8,72	7,06
Alcalinidad total	mg de CaCO ₃	121,2	69,4
Concentración de oxígeno disuelto	mg/L	8,3	0,2
Conductividad eléctrica	μS/cm	271,0	189,2
Contenido de sales disueltas	mg/L	136,1	95,0
Contenido de SO ₄ ²⁻	mg/L	22,0	5,0
Contenido de Cl ⁻	mg/L	3,58	2,00
Dureza cálcica	mg/L de CaCO ₃	60,05	124,52
Temperatura	°C	30	23,5
Contaminación microbiana	UFC en 100 mL	1600	0
Concentración de H ₂ S	mg/L	0,150	ND
Presencia de pesticidas	mg/L	ND	ND

Nota:

ND: No detectable, UFC en 100 mL: Unidades formadoras de colonias.

Con los datos disponibles se procedió al cálculo del Índice de Saturación de las aguas del embalse El Cajón, utilizando un método gráfico aceptado en estudios tradicionales de aguas /5/. El cálculo se realizó a partir de valores medios de los siguientes parámetros:

- El resultado obtenido es un Índice de Saturación igual a 0,18, lo que corresponde con aguas no corrosivas y muy poco incrustantes.
- Dureza cálcica: 91,98 mg/L
- Alcalinidad total: 103,76 mg/L
- Temperatura: 26,5 °C
- Total de sólidos disueltos: 114,06 mg/L
- pH: 7,87

El resultado obtenido es un índice de saturación igual a 0,18, lo que corresponde con aguas no corrosivas y muy poco incrustantes.

Este resultado se explica por las características de composición de las aguas y su régimen operacional, caracterizadas por su bajo contenido de sales agresivas, dureza media, alcalinidad moderada, pH neutro a ligeramente alcalino, temperatura ambiente y adicionalmente con velocidades que provocan mínimos efectos corrosivos y que favorecen la deposición de capas homogéneas de productos insolubles.

Inspección de las tuberías por el lado interno

Se procedió a la inspección interior de los tramos de tubería, con el interés de evaluar el estado de la superficie de acero por el lado interno en contacto con el agua circulante, encontrándose una fina deposición orgánica de musgo vegetal, luego una capa calcárea más dura, compacta y firmemente adherida al metal, con una superficie regular, según se muestra en la figura 1.



Fig. 1 Aspecto del interior de las tuberías conductoras de agua.

Al proceder al raspado de esta capa calcárea, se encontró una superficie metálica muy bien conservada, de color negro, según se observa en las fotos de la figura 2. La fina capa negra formada directamente sobre la propia superficie metálica y debajo de los depósitos calcáreos puede estar constituida por magnetita o por sulfuro

de hierro, ambas de color parecido. En todo caso, la presencia eventual de H_2S en las aguas, no provocó daños por corrosión apreciables en la superficie interior de los tubos, por lo cual este hecho no pone en peligro la integridad de la pared metálica. Por otro lado, la presencia de la capa calcárea, limita la llegada del O_2 a la superficie del metal.



Fig. 2 Aspecto de las superficies interiores de las tuberías después de raspadas.

Como resultado del análisis anterior se recomendó un lavado del interior de las tuberías con agua a presión, para eliminar la capa vegetal, pero no se recomendó eliminar la capa de sedimentos calcáreos, por tener un carácter adherente, compacto, homogéneo y protector.

Análisis de la corrosión de las tuberías por el lado externo

Las tuberías estudiadas se encuentran todas en locales ubicados en el interior de la caverna. Estos recintos están climatizados, pero en determinados periodos de tiempo, el sistema de clima de algunos lugares no se encontraba en funcionamiento, lo que originó altos valores de

humedad relativa durante periodos más o menos prolongados. En algunos periodos de tiempo se ha detectado olor característico del H_2S en el ambiente, lo que es atribuible a la descomposición de materia orgánica en las aguas.

A las tuberías de la Central se han aplicado diferentes sistemas de pinturas, pero en muchos casos estos sistemas han fallado prematuramente. /9, 10/

La corrosión atmosférica del acero ocurre según un mecanismo de corrosión electroquímico, por la posibilidad de la existencia de una capa de humedad en la superficie del metal. El agua que forma esta fina película contiene normalmente, además de O_2 disuelto, otras sustancias aceleradores de la corrosión. La película de humedad no es constante, ni en el tiempo ni en el espacio. Sin embargo, las

pequeñas irregularidades de las superficies de los metales y la presencia de contaminantes sólidos, provocan intersticios, donde queda el agua atrapada de manera permanente. /2-6/

La humedad relativa es el factor de mayor importancia, pero en cualquier tipo de ambiente atmosférico, la presencia de contaminantes es otro factor de gran importancia, algunos con marcado efecto activador de la corrosión. Se destacan los contaminantes gaseosos (H_2S y SO_2) y los contaminantes sólidos (polvo y sales, como el NaCl, etcétera). /6/

La protección por pinturas es el método más ampliamente utilizado en la lucha contra la corrosión del acero frente a la atmósfera. En su concepción más general, una pintura es una mezcla líquida que al ser aplicada sobre una superficie tiene la propiedad de formar una capa continua, mediante su transformación en una película sólida. Normalmente no se emplea una única pintura, por tanto se habla de sistemas o esquemas de pinturas. /11/

Los fallos de los sistemas de pinturas se manifiestan generalmente como deterioros prematuros, observándose ampollamiento, desprendimiento, pérdida de adherencia, agrietamiento, arrugamiento, manchas, pérdida de brillo o color, crecimiento de hongos y focos de corrosión. La probabilidad de aparición de fallos prematuros de los sistemas de pinturas, es siempre menor en la medida que se haya realizado una cuidadosa selección y aplicación del sistema y una cuidadosa preparación superficial.

Los sistemas de pinturas aplicados en la Central han sido:

- 1 Oxiprimer Protecto LM-200 + Protecto Epóxico Línea 4500.
- 2 Wasser Mc. Prep. Bond + Devthane 389.

Las hojas técnicas de estos productos permitieron extraer la siguiente información:

- Oxiprimer Protecto LM-200: Resinas de poliuretanos. Capa intermedia para la posterior aplicación de un acabado tipo epóxico o poliuretano. Extraordinaria adhesión a superficies de acero. Posee propiedades anticorrosivas y se recomienda un espesor mínimo de $38 \mu m$.
- Protecto Línea 4500: Pintura base epóxica de dos componentes. Protección en condiciones atmosféricas y químicas extremas. Soporta condiciones de abrasión y de inmersión. Extraordinaria adherencia.
- Wasser Mc. Prep. Bond: Primario sellador penetrante de baja viscosidad y curado en presencia de humedad, resistente a la intemperie. Posibilidades de aplicación sin exigente preparación de la superficie. Se recomienda su aplicación en espesores entre 38 y $51 \mu m$.
- Devthane 389: Recubrimiento alifático de uretano de dos componentes para ser aplicado sobre acero previamente imprimado. Se recomienda un espesor de película de entre 50 y $75 \mu m$.

Inspección de las tuberías por el lado externo.

A pesar de las características señaladas, se detectaron fallos importantes de los sistemas de pinturas en muchas de las estructuras inspeccionadas, como zonas visiblemente afectadas en que aflora el metal base y sus óxidos, con levantamiento en forma de ampollas de la pintura, oxidación intensa del metal y corrosión subyacente por debajo de la capa de pintura. Las fotos de la figura 3 muestran el estado actual de los sistemas de pinturas aplicados en algunos lugares.



Fig. 3 Aspecto exterior de tuberías afectadas por la corrosión.

En algunas zonas de superficies externas de tuberías afectadas por corrosión se hicieron mediciones del espesor de la película de pintura, empleando un medidor de espesores de pinturas marca Mega-Check 5FN-ST, reportándose en la tabla 2 los valores de espesor de pinturas

como el promedio de 5 mediciones hechas en las zonas cercanas al área afectada. Debido a la rugosidad de la superficie pintada y a la presencia de capas de óxido subyacente, los valores de espesores que se reportan pueden ser superiores a los reales.

Tabla 2
Resultados de las mediciones de espesores de pintura en algunas tuberías

Tubería inspeccionada	Espesor de pintura promedio (μm)	Sistema de pinturas aplicado	Años desde el último pintado
Múltiple de descarga del pozo No. 1	168	Poliuretano	2
Múltiple de descarga del pozo No. 2	159	Poliuretano	2
Tubo de presión (unidades 2 y 4).	287	Epóxico	6
Cámaras de válvulas	135	Epóxico	7
Tubería válvula de chorro 98	385	Pintura original	19
Pintura de parche	389	Epóxico	6
Tubería agua de enfriamiento vertical	162	Pintura original	19
Tramo pintado poliuretano	183	Poliuretano	2
Múltiple salida reservorio	322	Poliuretano	2
Tubería agua de enfriamiento nivel 106	388	Poliuretano	2
Otro tramo tubería nivel 106	175	Poliuretano	2

Todos los espesores de pintura medidos son mayores que los recomendados. Sin embargo, los efectos de la corrosión y los fallos de los sistemas de pinturas son evidentes, en algunos casos, con solo dos años de explotación. Estos resultados indican que los sistemas de pinturas seleccionados

no son los más adecuados para las condiciones de trabajo, ya que teniendo espesores mayores que los recomendados, no han funcionado bien a lo largo de su periodo de explotación, en condiciones en que se supone que han sido particularmente agresivas en los periodos de abundantes

filtraciones en las paredes internas de la caverna y de contaminación ambiental por la presencia eventual de H₂S.

Análisis de las principales propiedades de los sistemas de pinturas aplicados

Para realizar este estudio se prepararon probetas de acero pintadas según las especificaciones de los fabricantes, con los sistemas de pinturas usuales en la Central y descritos anteriormente. Estas probetas fueron llevadas al Laboratorio de Ensayos de Tropicalización (LABET) en Cuba, para ser sometidas a los ensayos de determinación de propiedades físicas y de resistencia a la corrosión. Se obtuvieron resultados que aparecen en el Informe elaborado por LABET. /12/, del cual se pudieron extraer los siguientes resultados, según la normativa actual para la evaluación de sistemas de pinturas: /13-16/

El sistema 1 presentó, a las 500 horas de sometimiento a los ensayos de resistencia a la corrosión, signos de corrosión. Tiene buena adherencia y sus espesores están de acuerdo a las especificaciones del producto. Se experimenta alguna pérdida de brillo durante los ensayos.

El sistema 2 presentó, entre las 300 y 400 h, signos de ampollamiento. A las 500 h, aparecieron nuevas ampollas y se produjo el rompimiento de las iniciadas. Según estos resultados el sistema clasifica en la escala numérica entre los valores 3 y 4 de grado de ampollamiento. Tiene buena adherencia y espesor de acuerdo a las especificaciones del producto. Se observa mayor pérdida de brillo, durante los ensayos, con relación al Sistema 1. A pesar de estos resultados, a las 500 h todavía no aparecen focos de corrosión, teniendo 0 % de afectación por corrosión.

Conclusiones generales del estudio

- 1 El agua que circula por el sistema de tuberías de la Central Hidroeléctrica, clasifica como poco incrustante y no corrosiva. Forma incrustaciones calcáreas protectoras, lo cual fue corroborado con la observación directa.

- 2 Las condiciones ambientales de los recintos de la caverna han mostrado cierta agresividad corrosiva por altos valores de humedad relativa y presencia de H₂S, lo que ha originado daños en las superficies exteriores de las tuberías por la utilización de sistemas de pinturas no adecuados, aún con espesores superiores a los recomendados.
- 3 Los resultados de la evaluación de sistemas de pinturas permiten seleccionar los más apropiados, lo que dará lugar a un análisis técnico-económico que contemple los precios de las pinturas y el costo de la mano de obra en relación a los periodos de repintado.
- 4 A pesar de los daños debido a la corrosión observados y estudiados, las tuberías no están en un peligro inminente de presentar perforación, a menos que se presentara una situación anormal de operación.

Recomendaciones

- 1 Mantener un plan de análisis periódicos sobre las características del agua del embalse, en especial en lo concerniente al pH y a la presencia de H₂S.
- 2 Realizar estudios de ensayos de resistencia a la corrosión y otros ensayos físicos y mecánicos a los sistemas de pinturas que van a ser utilizados para saber cuál será su respuesta en el tiempo ante las características actuales del ambiente dentro de la caverna, así como prever las posibles situaciones futuras en cuanto a aumento de la humedad relativa o presencia de contaminantes atmosféricos.
- 3 Decidir a través de un análisis técnico-económico, la mejor alternativa en cuanto a la selección de futuros sistemas de pinturas a utilizar para la protección exterior de tuberías u otras estructuras metálicas en la central.

Bibliografía

- 1 Web: www.enee.hn/complejos_hidroelectricos.pdf. [Consultado el 30 de enero de 2013]
- 2 UHLIG. H. H. "Handbook of Corrosion Engineering". D. Ed. McGraw Hill, New York, 2005.

-
- 3 SHREIR, L. L. JARMAN, R. A. Corrosion. Metal/ Environment Reactions. Ed. Butterworth-Heinemann, London. 2008.
 - 4 TOMASHOV, N. D. "Theory of Corrosion and Protection of Metals". Ed. The Mac Millian Co., New York. 1966.
 - 5 GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, J. A. "Teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión". Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, 1984
 - 6 DOMÍNGUEZ, J. A. y otros. "Introducción a la Corrosión y Protección de Metales". Ed. ENPES. 3da Edición, La Habana. 2008.
 - 7 SANDOVAL, S. "Evaluación de resultados sobre la química general, pesticidas, nutrientes, contaminación bacteriológica y metales pesados en los ríos de la cuenca El Cajón". Informe del Jefe de Unidad de Servicios Técnicos. ENEE. Tegucigalpa, 2010.
 - 8 _____ "Evaluación de la calidad del agua del embalse El Cajón". Informe del Jefe de Unidad de Servicios Técnicos. ENEE. Tegucigalpa, 2009.
 - 9 Document Technique Unifié No. 60.1, Additif No. 4: "Installations de distribution d'eau en tubes d'acier a l'intérieur des batiments". CSTB Febrero, 2007.
 - 10 _____ "Problemas en el sistema de enfriamiento del complejo turbina-generador-transformador en la Central Hidroeléctrica El Cajón». Informe. División de Ingeniería Civil. Departamento de Estudios Básicos. Tegucigalpa, 2001.
 - 11 MORCILLO, M. "Curso Básico de Pinturas Anticorrosivas". Instituto Español de Corrosión y Protección. Madrid, 2006.
 - 12 GONZÁLEZ, C. Informe Técnico. "Ensayos Climáticos y Determinación de Parámetros a Sistemas de Pinturas PROTECTO". Informe Parcial de Ensayo. Laboratorio de Ensayos de Corrosión. LABET, Cuba, 2010.
 - 13 UNE EN ISO 2813: "Determinación del brillo especular. Pinturas y barnices". 1999.
 - 14 NC ISO 4628: "Pinturas y barnices. Evaluación de la degradación de los recubrimientos". Parte 2: Designación del grado de ampollamiento. 2007.
 - 15 NC ISO 4628: Pinturas y barnices. Evaluación de la degradación de los recubrimientos. Parte 3: Designación del grado de oxidación. 2007.