

# Aplicación de metalizado en transformadores eléctricos para operación en ambiente marino

Bruno Cisneros Damm<sup>A,B</sup>, Alberto Pérez Unzueta<sup>B</sup>

<sup>A</sup> PROLEC GE International, S. de R.L. de C.V.

<sup>B</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León, FIME

## RESUMEN

*En el presente trabajo se demuestra que el tanque del transformador eléctrico monofásico tipo poste fabricado de acero al carbono metalizado y pintado cumple con los requisitos de vida útil esperada para zonas de alta corrosión atmosférica. Se realizaron pruebas de cámara salina en probetas y tanques prototipo. Con los resultados obtenidos, se pudo confirmar que existen combinaciones de metalización con cinc y pintura tipo poliéster, que cumplen con los requisitos de operación en zonas costeras.*

## PALABRAS CLAVE

Transformadores de distribución, corrosión, metalizado, recubrimiento.

## ABSTRACT

*In this work, samples of mild steel and containers for pole mounted single-phase distribution electrical transformers were treated by different metallizing processes and painted with polyester base paint. Tests were performed in a salt spray chamber. Results obtained showed that there are combinations of zinc plating and polyester type paint that meet the operational requirements in coastal areas.*

## KEYWORDS

Distribution transformers, corrosion, metallizing, coating.

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de metales y aleaciones que han sido obtenidos a partir de compuestos minerales, principalmente óxidos, el paso del tiempo a regresar a su estado químico inicial de menor energía, es decir a compuestos naturales, por medio de un proceso conocido como corrosión. En un entorno marino la corrosión tiene lugar mediante un proceso electroquímico que se da por la exposición de la superficie metálica al oxígeno del aire y es facilitada por la presencia de iones provenientes de las sales en el ambiente.<sup>1-3</sup>

Este proceso es en sí mismo un problema grave que reduce la vida útil de los componentes metálicos expuestos a los ambientes corrosivos, ya que el deterioro de la superficie no solo afecta la estética de la pieza, sino que puede llevarla a situaciones de adelgazamiento y pérdida de resistencia mecánica hasta una falla catastrófica total, con las consecuencias en pérdidas económicas o incluso en poner en riesgo la vida de seres vivos o de impactos ambientales indeseables.<sup>3-4</sup>

Entre las medidas más utilizadas para combatir la corrosión y evitar el deterioro de las piezas está el uso de recubrimientos que impidan el contacto directo de la superficie metálica con el medio ambiente. El recubrimiento más ampliamente utilizado y de menor costo son las pinturas. Sin embargo son fáciles de desprender y su vida útil no es muy larga. Otras soluciones son el uso de metales o aleaciones de baja reactividad, pero normalmente es una solución de alto costo. Una solución ampliamente utilizada es el uso de recubrimientos metálicos de diferente naturaleza. El metal base es recubierto con otro metal o aleación de menor potencial electroquímico de tal forma que actué como protección catódica, tal como la láminas de acero galvanizado. Esta última solución no es práctica para el caso de contenedores o tanques de los transformadores eléctricos de distribución tipo poste. Sin embargo, abre la posibilidad de investigar los recubrimientos galvánicos vía metalización por rociado térmico y protección extra con una pintura tipo poliéster.

Para la fabricación de los tanques de transformador tipo poste, el material comúnmente utilizado es acero al carbono tipo ASTM A36,<sup>5</sup> con un pre-tratamiento de fosfatado superficial y recubierto con pintura tipo poliéster en polvo. Un tanque de este tipo garantiza que el transformador estará libre de mantenimiento hasta por 5 años, de acuerdo a la norma NRF-025-2012.<sup>6</sup> Sin embargo, se ha comprobado que esta combinación de recubrimientos no es satisfactoria para las zonas costeras donde se tiene un ambiente de atmósfera marina con alto contenido de iones tipo cloruro. Una solución ha sido el empleo de aceros inoxidables tipo AISI 304 o 409<sup>7</sup> con el consecuente incremento en el costo de materia prima y de procesamiento. Entre los factores que afectan la rapidez de la corrosión, a parte de las condiciones del medio ambiente, se encuentran la preparación de la superficie, el fosfatado, la calidad y la adherencia de la pintura. Finalmente, el manejo del tanque es otro factor importante, ya que una vez recubierto y pintado, los golpes o rayaduras exponen el metal base y las zonas deformadas son más propensas a corroerse. En el presente trabajo se propone proteger los tanques de acero al carbono tipo ASTM A36 con diferentes recubrimientos por metalización y posterior aplicación de una capa de pintura de poliéster de dos diferentes espesores. El objetivo

a buscar es el duplicar, en tiempo, la resistencia en cámara salina de los actuales recubrimientos; y que represente una reducción en costo ante el empleo de aceros inoxidables.

### PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN

El recubrimiento con metales mediante rociado térmico es una tecnología que fue desarrollada desde 1910, primeramente con cinc, y en los últimos veinte años ha tenido grandes avances con diversas aleaciones con lo que se ha extendido su uso a dispositivos biomédicos, electrónicos, automotrices, aeronáuticos y en enseres domésticos. La metalización por rociado térmico puede aplicarse a sustratos metálicos y no metálicos y actualmente existe una amplia gama de materiales metálicos y cerámicos que pueden depositarse por rociado térmico ya sea por flama o por plasma. Previo a la aplicación de la capa de metalizado, las superficies deben estar limpias y es común darles un tratamiento de granallado para aumentar la rugosidad y la adherencia de los recubrimientos.<sup>8-10</sup> Para la aplicación del metalizado se emplea una pistola para calentar el material de recubrimiento, el cual puede estar en forma de polvo o de alambre, hasta un estado fundido o semi-fundido, tal que pueda ser proyectado hacia la superficie a recubrir. Para lo anterior, se utilizan fuentes de energía tales como combustión de gases, arco eléctrico o arco-plasma. Las partículas de material de aporte son impulsadas por un gas de propulsión, acelerando a las mismas hasta impactar la superficie, ver figura 1. Así se forma una nueva superficie protectora.<sup>11</sup> Cuando las partículas fundidas impactan a la superficie se aplastan formando pequeños ovoides que se anclan en los

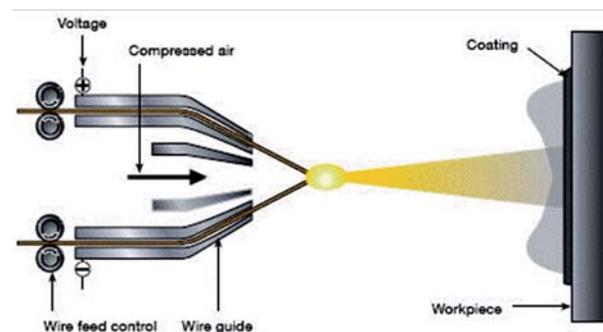


Fig. 1. Metalizado de alambre por arco eléctrico.

valles de la rugosidad superficial y posteriormente entre ellas. Estas partículas de geometría ovoide se enfrían rápidamente y se solidifican formando una estructura de capas que van creciendo hasta alcanzar el espesor final deseado.

### RECUBRIMIENTOS

En base a la revisión bibliográfica realizada, se estableció que los materiales con mayor potencial competitivo a ser utilizados para proteger estructuras de acero de equipo eléctrico, son los recubrimientos a base de cinc (Zn), aluminio (Al) y una aleación 85 cinc/15 aluminio (85Zn/15Al).<sup>12</sup> Por lo anterior se procedió a realizar pruebas en cámara salina sobre muestras de acero y de tanques prototipo con este tipo de recubrimientos. Adicionalmente se realizó un estudio comparativo de los costos que representan cada uno de ellos, comparándolos contra el precio estándar de fabricación y contra el costo utilizando aceros inoxidables tipo AISI 304 y 409.

### Evaluación de recubrimientos

Con el fin de analizar, cual es el mejor recubrimiento, se realizó la aplicación de estos 3 recubrimientos sobre 18 probetas, con una dimensión de 50.8 por 152.4 milímetros, con un barreno al centro de 3.175 mm con el fin de sujetarlas en la línea industrial de pintado. El recubrimiento se llevó a cabo utilizando el proceso de rociado térmico por combustión con alambre como metal de aporte, hasta obtener los espesores mostrados en la tabla I. Después de una inspección visual de las probetas para verificar que no existieran discontinuidades, las probetas fueron sometidas a un proceso de pintado

por atomización a dos diferentes espesores, tal como muestra la tabla I.

Las probetas fueron sometidas a la prueba de cámara salina siguiendo los lineamientos de la norma ASTM B-117-11<sup>13</sup> y utilizando un tiempo de permanencia de hasta 4,032 horas, lo cual es el doble del tiempo indicado en la especificación CFE-NRF-025,<sup>6</sup> con el objetivo de tener una prueba de mayor duración. Con el fin de evaluar el avance de la corrosión, se realizó una inspección ocular de las muestras a 2,016 horas de duración.

El aspecto general de todas las probetas se puede observar en la figura 2. La probeta A1 falló por completo, mostrando un daño considerable por corrosión a 2,016 horas de prueba en la cámara salina, tomando la decisión de no continuar hasta las 4,032 horas planeadas para todas las pruebas. Esta baja resistencia a la corrosión fue asociada a la alta porosidad presentada por el recubrimiento de Al, lo que permitió una penetración del electrolito hasta el sustrato de acero acelerando el proceso de corrosión. La probeta A2 presentó signos de corrosión por ampollamiento no aceptables a 4,032 horas de prueba. Aunque las probetas A1 y A2 fueron metalizadas con el mismo material (Al), la probeta A2 presenta mayor resistencia a la corrosión. Lo anterior debido a que el espesor del recubrimiento fue mayor, a pesar de tener un espesor de pintura más delgado. Esto indica que la principal barrera de protección a la corrosión para estas probetas es el recubrimiento por metalizado.

Las probetas B1 y B2 (Zn) presentaron una superficie libre de productos de corrosión ferrosa. Se puede observar en ambas probetas la existencia de manchas blancas debido a los depósitos de sal formados sobre las mismas, producto de la reacción con el cinc superficial. La probeta B2 muestra más manchas blancas que la B1. Esto es debido a que la B2 tiene un espesor de pintura más delgado. En este caso, la pintura sí juega un papel importante en la protección a la corrosión.

Las probetas C1 y C2 (85/15) presentaron inicios de ampollamiento a las 2,016 horas de exposición, convirtiéndose en ampollamiento no aceptable al final de la prueba, mostrando corrosión del sustrato de acero. La muestra C2 presentó menor área parcial afectada por la formación de las ampollas

Recubrimiento	Id.	Espesor del recubrimiento (µm)	Espesor de la pintura (µm)
Al	A1	75	50
	A2	125	25
Zn	B1	75	50
	B2	125	25
85Zn/15Al	C1	75	50
	C2	125	25

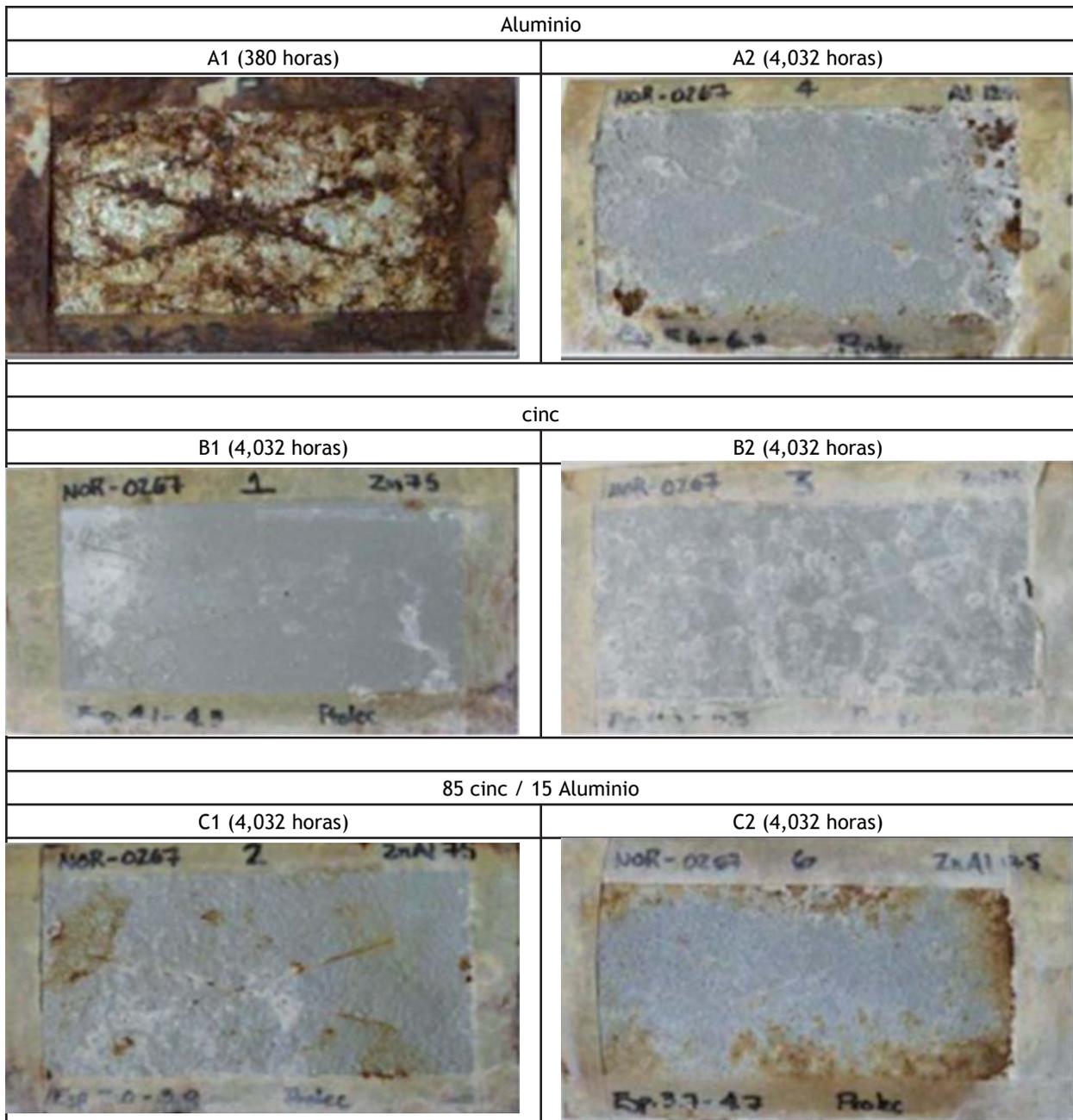


Fig. 2. Aspecto de la superficie de las probetas después de prueba de Cámara Salina.

de corrosión. Esto debido al mayor espesor del recubrimiento por metalizado.

Las probetas B1 y B2 mostraron buenos resultados. Se puede observar en ambas probetas que presentan manchas blancas que se pueden deber a depósitos de sal. Se puede observar que la probeta B2 presenta más manchas y esto es debido a que presenta un espesor mayor de zinc por lo que la

reacción de este es mucho mayor que la que ocurre en la probeta B1.

La probeta C1 presenta un ampollamiento considerable debido al espesor de pintura aplicado, lo que representa un mal resultado ya que es un punto por donde puede comenzar a corroerse el sustrato. La probeta C2 muestra muy buenos resultados a las 2,016 horas, pero al finalizar la prueba a las 4,032

horas se puede observar que comienza a mostrar ampollamiento.

### Evaluación de los recubrimientos en tanques prototipo

Con los resultados obtenidos de las pruebas en probetas, donde se demostró que el metalizado con aluminio no era adecuado para la protección contra la corrosión esperada en los transformadores, se decidió continuar las pruebas en tanques prototipo utilizando solo los recubrimientos de Zn y Zn/Al, según los datos de la tabla II.

Tabla II. Datos de prueba de cámara salina en tanques prototipo.		
Recubrimiento	Zn	85Zn/15Al
Espesor recubrimiento	75 y 125 $\mu\text{m}$	
Espesor pintura	25 y 50 $\mu\text{m}$	
Tiempo de exposición	4,000 horas	2,300 horas

El tanque recubierto con Zn se muestra en la figura 3, en la que se puede apreciar que solo se presentó corrosión en los bordes del mismo, debido al efecto de adelgazamiento del recubrimiento metálico y de la aplicación de la pintura en dichas áreas. Sin embargo, todo el cuerpo externo del tanque está libre



Fig 3. Aspecto de tanque recubierto con Zn después de prueba de Cámara Salina

de corrosión. En cuanto al tanque recubierto con la aleación 85Zn/15Al, se puede observar en la figura 4 la formación de ampollas y severa corrosión en las zonas alrededor de los accesorios de acero inoxidable tipo AISI 304. El tipo de corrosión presentada es de tipo galvánica y es producida por la formación de una celda galvánica al tener dos metales o aleaciones disimilares en contacto. Cuando estos dos metales o están alejados entre sí en la serie galvánica, en presencia de un electrolito, el metal más activo (ánodo) se corroe con mayor facilidad, en este caso el acero al carbono.

Tanto en las pruebas en cámara salina de las probetas y de los tanques prototipo, el mejor resultado se obtuvo con el metalizado de Zn y pintura de poliéster.



Fig. 4. Aspecto del tanque recubierto con Zn85/Al15 después de la prueba en cámara salina. Se aprecia extenso daño por corrosión.

### Costo de aplicación de recubrimientos

Una vez establecido que los mejores recubrimientos son, en orden jerárquico el de Zn, 85Zn/15Al y finalmente el de Al, se procederá a realizar una estimación de costos y su comparación contra el uso de aceros inoxidables tipo AISI 304 y 409. Los costos promedio de la aplicación de los recubrimientos por metalizado de alambre, por metro cuadrado, para espesores de entre 75 a 125  $\mu\text{m}$ , se indican en la tabla III.<sup>14</sup>

Zn	Al	Zn/Al
38.72	12.70	50

Según los costos de fabricación actuales utilizando acero al carbono A36 fosfatado y pintado, contra el costo adicional de los diferentes recubrimientos por metalizado y pintado sobre el mismo acero base A36; y comparado con el costo de fabricación al utilizar aceros inoxidable, se pueden estimar los costos tomando como base 100 el costo del tanque original de acero A36. Esta estimación se presenta en la tabla IV.

Los resultados obtenidos de las pruebas muestran que los sistemas de protección por rociado térmico utilizando aluminio no cumplen satisfactoriamente los requisitos para operar en ambientes costeros. A pesar de que son los más económicos y presentan una ventaja competitiva no se recomiendan para la protección de transformadores de distribución tipo poste. Los recubrimientos a base de la aleación 85Zn/15Al, presentaron resultados no satisfactorios en los tanques prototipo, mostrando corrosión galvánica severa en las zonas donde se instalan los accesorios del transformador. Debido a lo anterior, no se recomiendan para la protección de los tanques. El recubrimiento a base de cinc presentó buenos resultados tanto en las pruebas de cámara salina en probetas como en los tanques prototipo. Las zonas donde se presentó corrosión en los tanques, se debió al efecto borde y son áreas que quedan protegidas por el ensamble del transformador y no quedan expuestas al medio ambiente en los transformadores

Material	Costo relativo	Incremento porcentual
Acero A36	100	-
Acero A36 + Rec de Al	136	36
Acero A36 + Rec de Zn/Al	206	106
Acero A36 + Rec de Al	237	137
Acero Inox. 409	350	250
Acero inox. 304	660	560

terminados, por lo cual se recomienda este tipo de recubrimiento por metalización para la protección de los transformadores.

En cuanto a costos de materia prima y de producción, el menor incremento (36%) se da con el recubrimiento de Al, pero queda descartado por su bajo desempeño contra la corrosión. El recubrimiento a base de Zn/Al presenta incrementos de hasta 137%, pero por sus bajos resultados no se recomienda su aplicación. El recubrimiento a base de cinc es el que mejor resultados proporciona y representa un incremento de 106% en el costo de fabricación del tanque. Sin embargo, este incremento es mucho menor comparándolo con los incrementos en costo al sustituir el acero al carbono A36 por acero inoxidable tipo AISI 409 y 304, donde se tienen incrementos de hasta 250 y 560% respectivamente.

## CONCLUSIONES

Por los resultados obtenidos en las pruebas en cámara salina y en estudio de costos se concluye que la mejor opción para la protección contra la corrosión atmosférica en ambientes marinos de los transformadores eléctricos monofásicos de distribución tipo poste es la utilización de un recubrimiento a base de cinc por metalización por spray sobre un sustrato de acero al carbono A36.

Se recomienda la instalación de una línea piloto de fabricación de tanques para transformador con metalizado de Zn y pintura de poliéster. Así mismo se recomienda el desarrollo de proveedores de los equipos y materias primas para el metalizado.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la empresa Prolec-GE Internacional para la realización del presente proyecto.

## REFERENCIAS

1. M. G. Fontana. Corrosion Engineering. 3rd Edition. McGraw-Hill International. USA, 1987.
2. E. Otero Huerta. Corrosión y Degradación de Materiales. Editorial Síntesis. España, 1997.

3. J. Morales Marina. Curso teórico y práctico de introducción a la corrosión metálica. Gráficas Sabater, España, 2001.
4. D. Alcaraz Lorente. Manual Básico de Corrosión para ingenieros. Publicaciones de la Universidad de Murcia, España, 2004.
5. ASTM International. Norma ASTM A36/A36M-12 Standard Specification for Carbon Structural Steel. ASTM Intl. USA, 2012.
6. Comisión Federal de Electricidad (CFE). Espec. CFE-NRF-025. CFE-México, 2009.
7. ASM International. ASM Handbook Vol. 1. 10th Edition. USA, 1999.
8. ASM International. ASM Handbook Vol. 5. 10th Edition. USA, 1994.
9. J. Davis. Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International. USA, 2004.
10. J. L. Marulanda, et.al. Protección contra la corrosión por medio del rociado térmico. Scientia et Technica, Año XIII, No 34 pp. 236-242, 2007.
11. C. Marín Villar. Thermal Spray Protección de Alto Impacto. Revista electrónica Metal Actual. Consultada el 18 Nov 2013.
12. R. A. Saucedo. Evaluación de recubrimientos aplicados por rociado térmico para el incremento de la resistencia a la corrosión de los tanques de transformadores tipo poste y pedestal. Reporte Interno PROLEC GE Internacional. México, 2011.
13. ASTM Intern. Norma ASTM B-117-11. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. ASTM Intl. USA, 2011.
14. Sulzer Metco. Thermal Spray Wires. Documento electrónico consultado el 18 Nov 2013. <http://www.sulzer.com/en/Products-and-Services/>.

**Ingenierías**  
**en línea**

**A TEXTO COMPLETO  
DESDE EL NÚMERO 1**

consulta en:  
<http://ingenierias.uanl.mx>