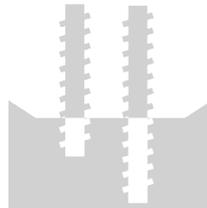


# Diagnóstico de riesgos potenciales en el proceso del galvanizado por inmersión en caliente de varilla de acero mediante AMEF

**RESUMEN:** El proceso de galvanizado por inmersión en caliente es una alternativa económica y eficiente para aumentar el tiempo de vida útil de la varilla de acero para la construcción. La empresa Metalyzinc, S.A. de C.V. es una empresa de servicios anticorrosivos que enfrenta por primera vez en su historia un proyecto del galvanizado de 8,000 toneladas de este material. Por esta razón, es preciso contar con una herramienta que le ayude a determinar los riesgos potenciales que puede enfrentar en el proceso durante la realización de este proyecto. Este artículo describe la investigación llevada a cabo para la elaboración de un diagnóstico de riesgos, a través de la metodología de Análisis Modal de Fallas y Efectos (AMEF). Primeramente, estudiando el proceso del galvanizado por inmersión en caliente para posteriormente aplicar la metodología AMEF en este proceso para el revestimiento de varilla de acero. A través del AMEF se obtiene información sobre los modos de falla potenciales que tiene el proceso y las causas que los originan, para finalmente generar información valiosa para la gerencia de la línea de galvanizado sobre las acciones que se deben tomar para la mejora del proceso y cuáles son las fallas potenciales que tienen prioridad de atención.

**PALABRAS CLAVE:** Análisis Modal de Efectos y Fallas, AMEF, modos de fallas, galvanizado por inmersión en caliente, riesgos potenciales, varilla de acero.



## Colaboración

José Valente Díaz Fernández; Saúl Santiago Cruz, Instituto Tecnológico Superior de Misantla

**ABSTRACT:** The process of hot dip galvanizing is an economical and efficient alternative to increase the life time of the steel rod for construction. Metalyzinc S.A. of C.V. is an anticorrosive services company that has for the first time in its history a galvanizing project of 8,000 tons of this material. For this reason, it is necessary to have a tool that helps determine the potential risks that may be faced in the process in the realization of this project. This article describes the research carried out for the elaboration of a diagnosis of risks, through the methodology of Failure Mode Effects Analysis (FMEA). Firstly, studying the process of hot dip galvanizing to later apply the FMEA methodology in this process for steel rod coating. Through the AMEF, information is obtained about the potential failure modes that the process has and the causes that originate them, to finally generate really valuable information for the management of the galvanizing line on the actions that must be taken to improve the process and which are the potential failures that have priority to attention.

**KEYWORDS:** Modal Analysis of Effects and Failures, FMEA failure modes, hot dip galvanizing, potential risks, steel rod.

## INTRODUCCIÓN

La galvanización toma su nombre de Luigi Galvani, uno de los primeros científicos interesados en la electricidad. En 1837 el ingeniero francés Sorel utilizó el término galvanización porque entendió que era una corriente galvánica la que daba la protección al acero [1].

El acero al ser expuesto al ambiente sufre un proceso de deterioro natural conocido como corrosión en función del tiempo de exposición y de las condiciones del medio. En el presente, más de 13 millones de toneladas de zinc se producen al año en el mundo, 70% de menas minadas y 30% de fuentes recicladas. Más de la mitad de la producción anual se usa en revestimientos de zinc para proteger el acero de la corrosión [2].

En el año 2000, Metalyzinc S.A. de C.V. empezó a ofrecer el galvanizado por inmersión en caliente, cubriendo la necesidad de los usuarios de este servicio en la zona sur del país. Actualmente, tiene proyectado procesar 8000 toneladas de varilla de acero, para un cliente que construirá un recinto en la zona portuaria de Veracruz, Ver.; este proyecto cobra especial relevancia debido a que históricamente nunca tuvieron lotes de varilla mayores a 60 toneladas, los cuales se mezclaban con la producción habitual de otro tipo de materiales. Por lo tanto, es preciso para la gerencia contar con una herramienta de diagnóstico de su proceso, que le ayude a determinar los riesgos potenciales a los que se puede enfrentar.

En el entorno industrial, la valoración de riesgos por medio de la técnica AMEF permite prever causas que pueden poner en peligro el producto o los procesos [3]. El AMEF de Proceso es usado por los Ingenieros de Manufactura para identificar los principales riesgos asociados a una serie de operaciones necesarias para la fabricación de componentes, productos y sistemas [4]. Las características del AMEF son minimizar la probabilidad de una falla o minimizar el efecto de la falla mediante un proceso interactivo con desarrollo previo al inicio de la producción [5]. El primer AMEF fue aplicado en la industria espacial y fue principalmente utilizado para encontrar fallas de seguridad. Antes de ser una de las herramientas predilectas de la industria automotriz, esta herramienta llegó a ser clave para las mejoras en los procesos químicos industriales [6].

**Problema de la investigación**

La elaboración de un AMEF del proceso de galvanizado de varilla de acero coadyuvará a Metalyzinc S.A. de C.V. a cumplir con el propósito de contar con una herramienta como parte integral de la administración de riesgos, evaluando la gravedad, ocurrencia y detección de los posibles modos de falla del proceso a fin de determinar acciones correctivas a ejecutar en caso de que se presenten.

**MATERIAL Y MÉTODOS**

Como ya se ha mencionado, la organización en que la que se realizará el desarrollo del AMEF es la empresa de servicios anticorrosivos Metalyzinc S.A. de C.V. La planta está compuesta por 9,000 m2 techados y 13,000 m2 a la intemperie divididos en dos áreas de proceso principales: área de metalizado y área de galvanizado por inmersión en caliente. La presente investigación se realiza en el área de galvanizado por inmersión en caliente. Esta investigación genera conocimiento técnico, debido a que se aplica una herramienta de Ingeniería Industrial, al mismo tiempo que la información produce información específica sobre el giro de servicios de protección anticorrosiva. La metodología general llevada a cabo se muestra en la figura 1.

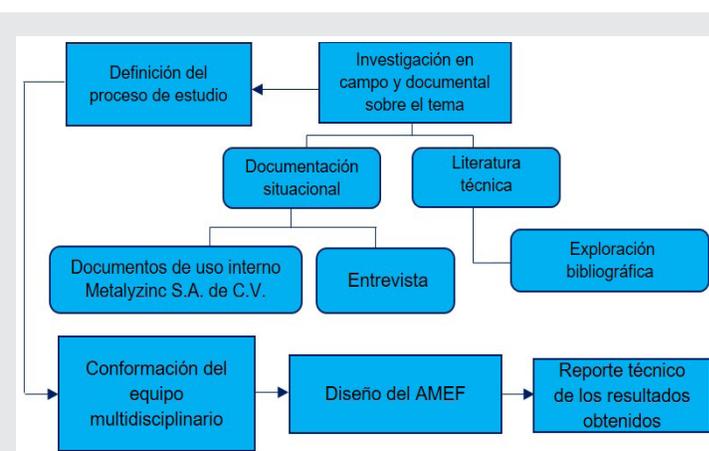


Figura 1. Metodología seguida en la investigación. Fuente: Elaboración propia

Asimismo, como herramienta de diagnóstico inicial en la definición del proceso a estudiar, se realizó un diagrama de Ishikawa (ver figura 2). Un diagrama causa-efecto bien organizado sirve como vehículo para ayudar al equipo multidisciplinario a tener una concepción común del tema a estudiar, con todos los elementos y relaciones claramente visibles [7].

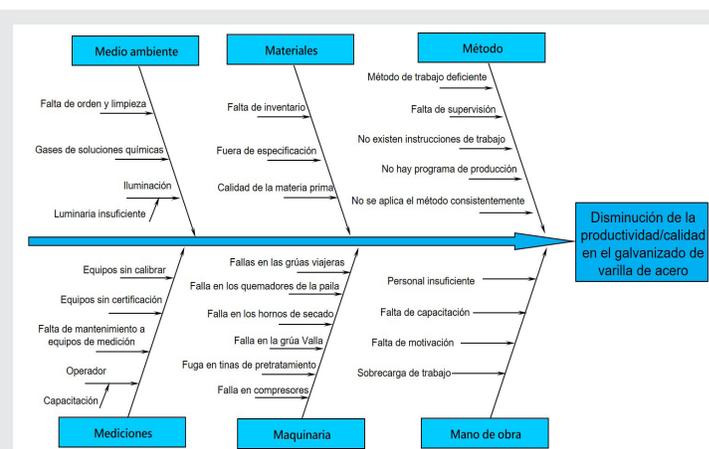


Figura 2. Diagrama causa-efecto del proceso de galvanizado por inmersión en caliente de varilla de acero. Fuente: Elaboración propia

**MARCO TEÓRICO**

**Galvanizado por inmersión en caliente**

El procedimiento se ha utilizado comercialmente desde 1837, sin embargo, todavía hoy es uno de los sistemas de protección del acero técnicamente más avanzados. Todos los procedimientos de protección del acero se basan en interponer una barrera aislante o establecer una célula galvánica. La galvanización por inmersión en caliente ofrece ambos mecanismos de protección en un solo producto [1]. Antes de la inmersión en el baño de zinc, el acero se limpia con químicos para eliminar los aceites, grasa, tierra, escoria y la herrumbre. La preparación de la superficie es crítica ya que el zinc no reacciona con el acero no limpio.

## Etapas generales del proceso

**Colgado.** En esta parte del proceso el material es colocado en arreglos o contenedores especiales, estos arreglos a su vez se cuelgan en una parte móvil de un rack el cual es desplazado en toda la línea de galvanizado para su procesamiento. Un rack transporta aproximadamente 3 toneladas de varilla.

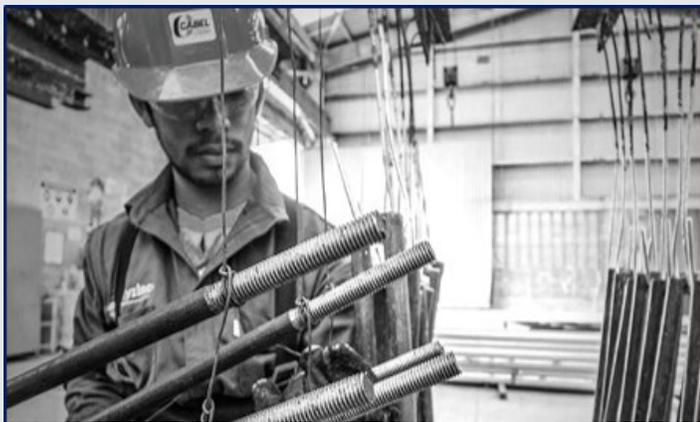


Figura 3. Área de colgado de materiales. Tomado de archivos internos de Metalyzin S.A. de C.V.

**Desengrase.** Involucra el uso de una solución alcalina para remover los contaminantes orgánicos tales como los aceites y las grasas. Estos contaminantes de superficie necesitan ser removidos antes del decapado.

**Decapado.** Involucra la inmersión de las piezas en una solución de ácido clorhídrico a temperatura ambiente, con el fin de eliminar el óxido de la superficie. Los tipos de óxido de hierro necesitan ser removidos antes de la aplicación del recubrimiento de zinc.



Figura 4. Inmersión de materiales en la tina de decapado. Tomado de archivos internos de Metalyzin S.A. de C.V.

**Fluxado.** Implica la inmersión de la pieza de acero en una solución acuosa de fundente (cloruro de zinc y de amonio).

**Galvanizado.** La operación de galvanización propiamente dicha se realiza sumergiendo las piezas en un baño de zinc fundido, a temperatura comprendida entre 440°C y 460°C.

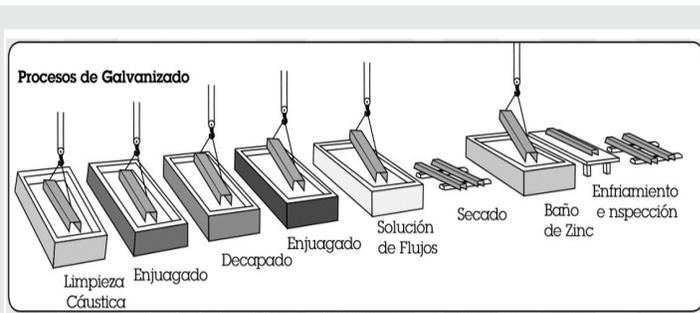


Figura 5. Etapas del proceso de galvanizado. Tomado de la publicación Revestimientos de zinc de la American Galvanizers Association (2015:2).

El revestimiento del galvanizado en caliente consta de una serie de capas de aleación zinc/hierro con una capa de superficie de zinc puro (ver Figura 6).

**Enfriamiento.** Una vez que los materiales dejan la paila o crisol de galvanizado pueden introducirse en una tina de agua para su enfriamiento, asimismo, se pueden dejar enfriar a temperatura ambiente.

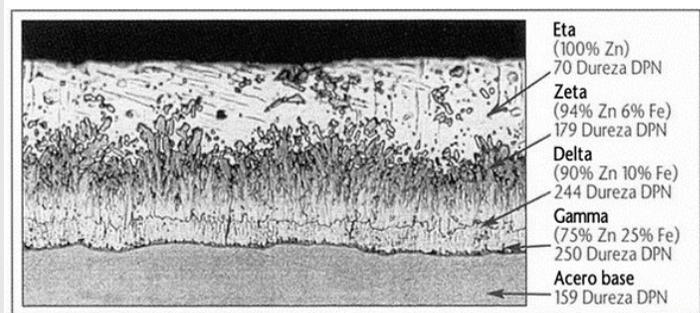


Figura 6. Corte transversal del acero galvanizado. Tomado de American Galvanizers Association (2018).

**Pasivado.** Esta etapa consiste en sumergir las varillas en una solución de pasivador (productos químicos y agua) con la finalidad de reducir el tiempo de reacción del recubrimiento de zinc con el ambiente evitando la pronta aparición superficial de hidróxidos y carbonatos básicos de zinc, aumentando el tiempo de permanencia del brillo.

**Inspección de calidad.** Se realiza la inspección del producto terminado para verificar que cumple con los requisitos establecidos en la normatividad (espesor y apariencia, continuidad de la capa de galvanizado) y por los requerimientos del cliente.

**Acabado.** Por último, se aplica un acabado final removiendo excesos de zinc y/o aplicando compuesto rico en zinc para realizar retoques al material galvanizado.

## Análisis modal de efectos y fallas potenciales

El algoritmo del AMEF fue desarrollada en el ejército de los Estados Unidos de Norteamérica por los ingenieros de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), a raíz de un procedimiento militar

(MIL-P-1629) titulado como "Procedimiento para la Ejecución de un Modo de Falla, Efectos y Análisis de criticidad". Este procedimiento fue elaborado el 9 de noviembre de 1949 y era empleado como una técnica para evaluar la confiabilidad y determinar los efectos de las fallas de los equipos y sistemas, en el éxito de la misión y la seguridad del personal o de los equipos.



Figura 7. Eliminación de excesos de zinc para el acabado final del galvanizado. Tomado de archivos internos de Metalyzinc S.A. de C.V.

En 1988 la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), publicó la serie de normas ISO 9000 para la gestión y el aseguramiento de la calidad; los requerimientos de esta serie llevaron a muchas organizaciones a desarrollar sistemas de gestión de calidad enfocados hacia las necesidades, requerimientos y expectativas del cliente, entre estos surgió en el área automotriz el QS 9000. Chrysler Corporation, Ford Motor Company y General Motors Corporation enriquecieron esta metodología en un esfuerzo para estandarizar los sistemas de calidad; teniendo que emplear Planeación de la Calidad del Producto Avanzada (APQP), que necesariamente debe incluir al AMEF de diseño y de proceso, así como también un plan de control. En diciembre de 1992, el Grupo Acción Automotriz Industrial (AIAG) termina el manual de referencia y en febrero de 1993 junto con la Sociedad Americana para el Control de Calidad (ASQC) registraron las normas de AMEF para su implementación en la industria. Actualmente, el AMEF se ha popularizado en todas las empresas automotrices americanas y ha empezado a ser utilizado en diversas áreas de una gran variedad de empresas a nivel mundial" [8]. De acuerdo con el Manual de Referencia: FMEA-4 [9], existen tres casos básicos para los cuales un AMEF puede ser generado, cada uno con un alcance o enfoque diferente:

**Caso 1:** Nuevo Diseño, nueva tecnología o nuevo proceso. El alcance del AMEF es el diseño, tecnología o proceso completos.

**Caso 2:** Modificaciones al proceso o diseño actuales.

**Caso 3:** El uso del diseño o proceso existente en un nuevo medio ambiente, localización o aplicación. El AI-

cance del AMEF es en el impacto del nuevo ambiente o la localización en el proceso o diseños existentes.

**Análisis de Modos y Efectos de Fallas de Procesos**  
**El AMEF de procesos, en ocasiones referido como AMEFP,** soporta el desarrollo de procesos de manufactura en la reducción del riesgo de las fallas:

- Identificando y evaluando las funciones y requerimientos del proceso.
- Identificando y evaluando modos de fallas potenciales relacionadas con el proceso.
- Permitiendo el establecimiento de un sistema de prioridades para acciones correctivas, preventivas y controles.

El AMEFP debiera iniciar con el desarrollo de información para entender las operaciones del proceso productivo. Un diagrama de flujo del proceso es una entrada primaria para un AMEFP. El diagrama de flujo del proceso es usado como una herramienta para ayudar a establecer el alcance del análisis durante el diseño de un proceso [9].

**AMEF del proceso del galvanizado por inmersión en caliente de varilla de acero.**

Una vez definido el proceso de estudio de acuerdo con la metodología planteada en la Figura 1 de este artículo, además de lo declarado en el manual FMEA-4 [9], se debe conformar un grupo interdisciplinario cuyos miembros abarquen los conocimientos y experiencia necesarios para el tema. El equipo (haciendo referencia al puesto dentro de la organización) queda conformado por:

- Jefe de la línea de galvanizado.
- Supervisor de la línea de metalizado.
- Supervisor de acabado de galvanizado.
- Supervisor de colgado de materiales.
- Operador de galvanizado "A".
- Coordinador de mantenimiento.

De acuerdo con lo referido en el marco teórico, se realiza un diagrama de proceso que nos ayude a emprender el análisis de las actividades que se realizan en el procesamiento de la varilla:

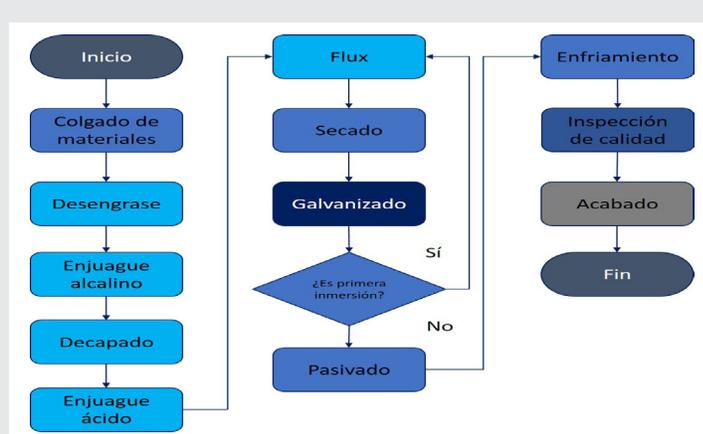


Figura 8. Diagrama del proceso de galvanizado de varilla. Fuente: Elaboración propia.



minar los modos de falla o que cambie su impacto en el desempeño del proceso.

Tabla 3. Efectos y causas de fallos

Modo de falla potencial	Efecto	Causa de la falla
Grado de inclinación del material inadecuado.	Material no se galvaniza adecuadamente	No se aplica consistentemente el método de colgado
Mala sujeción de los materiales al rack.	Extravío por caída de los materiales en alguna parte del proceso.	Falta de aplicación y conocimiento del procedimiento de colgado
	Daño a materiales, equipo y personas	Inexperiencia del operador
Realizar una carga de material con un peso superior a la capacidad nominal.	Daño a la grúa	Falta de aplicación del procedimiento de colgado
Caída de una carga suspendida	Daño a materiales, equipo y personas	Inexperiencia del operador
		Mala maniobra del operador de grúa.
Grúa viajera no funciona	Paro de producción	Avería de la grúa
Material no se desengrasó adecuadamente.	Atraso en producción	No se deja el material el tiempo suficiente para su desengrase
	Mal galvanizado	
Material no se enjuagó adecuadamente.	Neutralización en la tina de decapado.	No se deja el material el tiempo suficiente, no funcionan los aspersores de agua.
	Atraso en producción/ reproceso	
	Mal galvanizado	
Material presenta óxido después del decapado.	Mal galvanizado	No se deja el material el tiempo suficiente para su decapado.
Exceso de tiempo de inmersión en decapado.	Exceso de revestimiento de galvanizado	Se deja el material un tiempo excesivo en decapado.
Procedimiento o método de trabajo inadecuado.	Atraso en producción	No se han replanteado los procedimientos de trabajo
Material no se enjuagó adecuadamente.	Contaminación y pérdida de concentración del baño de la tina de flux.	No se deja el material el tiempo suficiente, no funcionan los aspersores de agua.
	Atraso en producción	
	Mal galvanizado	
Material no adquirió la capa de fundente	Mal galvanizado	Mala limpieza en las etapas previas.
Permanencia en el foso mayor de la necesaria	Flux se quema (mal galvanizado)	Se deja el material un tiempo excesivo en secado.
Material recoge ceniza al salir	Mal galvanizado (sucio)	Mal retiro de dross por parte del desnatador.
Material con exceso de recubrimiento	Pérdida de utilidad	Se deja el material un tiempo excesivo en galvanizado.
Material presenta zonas desnudas	Mal galvanizado (inconsistente)	Falta de limpieza en etapas previas
Material presenta manchas	Mal galvanizado (sucio)	Arreglos sin limpieza correcta
Explosión al entrar los materiales en la paila	Proyección de zinc caliente.	No se secó el material adecuadamente
	Rompimiento de la paila	Material sin barrenos de dren y venteo
	Daño en el material del cliente.	
	Daño a personas	
Fuga en la paila de zinc	Derrame del zinc fundido	Tiempo de vida de tina ha finalizado (no se cambia)
	Paro de la línea de galvanizado	
Falla en los quemadores del horno	Paro de la línea de galvanizado	Falta de mantenimiento.
		Corte de energía eléctrica (falla del generador eléctrico de emergencia)
Velocidad alta a la hora de salir el material de la paila	Marcas en el revestimiento de galvanizado	Mal operación de la grúa viajera (sacar el material rápidamente)
Temperatura baja en la paila de zinc	Mal galvanizado	No se deja recuperar el horno a 445°C
Equipo de medición descalibrado	Medición incorrecta de la conformidad del producto	Falta de mantenimiento y calibración a equipos de medición.
Método de toma de espesor inadecuado	Medición incorrecta en la conformidad del producto	Falta de competencias en el inspector de calidad.
Material posee zonas sin recubrimiento	Oxidación en productos galvanizados.	Mala aplicación de acabado

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Formato de AMEF de procesos

ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS POTENCIALES DEL PROCESO DE GALVANIZADO POR INMERSIÓN EN CALENTE DE TUBERÍA DE ACERO														
AMEF DE PROCESOS														
Responsabilidad del proceso: Fecha: _____														
Número de AMEF: _____														
Página: _____														
Preparado por: _____														
Revisado por: _____														
Orden	Descripción	Requisitos	Modo de falla potencial	Efecto potencial	Gravedad	Causas identificadas de la falla	Condiciones de operación	Consecuencias potenciales	AMEF	Acciones preventivas	Responsabilidad del proceso	Fecha de inicio	Fecha de término	Estado

Fuente: Elaboración propia (basada en FMEA-4)

Tabla 5. Criterios para la evaluación de severidad

Efecto	Severidad del Efecto en el Proceso	Rango
Falla en el cumplimiento con requerimientos de seguridad y/o regulatorios	Puede poner en peligro al operador (equipo o material) sin aviso.	10
	Puede poner en peligro al operador (equipo o material) con aviso.	9
Interrupción mayor	Puede ser que el 100% producto se deseché. Paro de línea o paro de envíos. Pérdida de una función primaria.	8
Interrupción significativa	Puede ser que una proporción se deseché. Desviación del proceso primario incluyendo un decremento en la velocidad de la línea o adición de mano de obra.	7
Interrupción moderada	Puede ser que el 100% de la corrida de producción tenga que re trabajarse fuera de la línea y ser aceptada.	6
	Puede ser que una proporción de la corrida de producción tenga que re trabajarse fuera de la línea y ser aceptada.	5
	Puede ser que el 100% de la corrida de producción tenga que re trabajarse en la estación, antes de ser procesada.	4
Interrupción menor	Puede ser que una proporción de la corrida de producción tenga que re trabajarse fuera de la línea y ser aceptada.	3
	Ligera inconveniencia al proceso, operación u operador.	2
Sin efecto discernible	Sin efecto	1

Fuente: Elaboración propia (basada en FMEA-4)

Ocurrencia

El Manual de Referencia FMEA-4 [9] define la ocurrencia como la probabilidad de que alguna causa específica de que una falla ocurra. Se estima la probabilidad de ocurrencia de la causa potencial de una falla en una escala de 1 al 10.

Al hablar sobre la probabilidad es importante contar con información estadística que ayude a precisar el parámetro de ocurrencia, sin embargo, al ser el AMEF una herramienta de previsión de fallas potenciales, es posible encontrar la condición de que no se cuenta con la información necesaria, máxime que sea un primer desarrollo del AMEF dentro de la empresa. Al respecto, [5] establece que un método alterno para estimar la probabilidad de la ocurrencia es el uso del mejor criterio del equipo multidisciplinario.

Tabla 6. Criterios para la evaluación de ocurrencia

Probabilidad de falla	Ocurrencia de las causas AMEFP Incidentes por ítem	Rango
Muy alta	≥ 1 en 10	10
	1 en 20	9
Alta	1 en 50	8
	1 en 100	7
	1 en 500	6
Moderada	1 en 2,000	5
	1 en 10,000	4
Baja	1 en 100,000	3
	1 en 1,000,000	2
Muy baja	La falla es eliminada a través de controles preventivos	1

Fuente: Elaboración propia (basada en FMEA-4)



Tabla 9. Causas potenciales de falla con mayor NPR para el proyecto de galvanizado de varilla de acero.

Causas potenciales de falla	Modo de falla potencial asociada a la causa	NPR
No se han replanteado los procedimientos de trabajo	Método de trabajo inadecuado (limpieza de arreglo)	280
Avería de la grúa	Grúa viajera no funciona en galvanizado	192
Avería de la grúa	Grúa viajera no funciona en decapado	168
Avería de la grúa	Grúa viajera no funciona en fluxado.	160
Avería de la grúa	Grúa viajera no funciona (otras áreas)	140

Fuente: Elaboración propia (basada en FMEA-4)

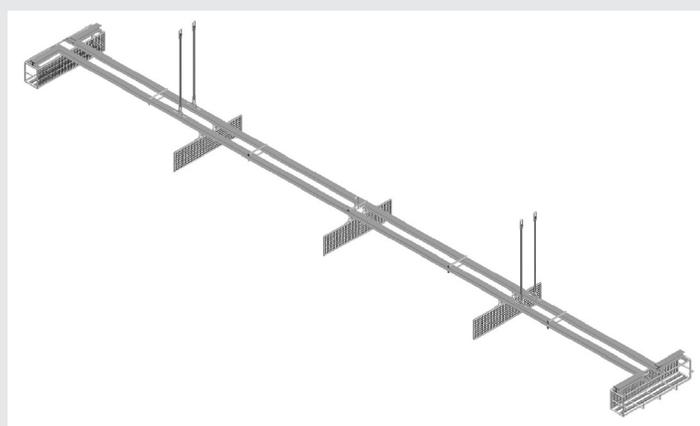


FIGURA 10. Dibujo de un arreglo para galvanizado de varilla. Tomado de archivos internos de Metalyzinc S.A. de C.V.

Asimismo, las siguientes causas potenciales de fallas (ver tabla 9) se relacionan con paros de producción por averías en las grúas viajeras. Tienen mayor impacto las averías en las áreas de galvanizado y decapado, esto lo explica que en esas áreas se requiere mayor recorrido y un mayor número de maniobras con los materiales en las grúas.

### CONCLUSIONES

El Análisis Modal de Efectos y Fallas es una metodología analítica usada para asegurar que los problemas potenciales se han considerado y abordado a través del proceso. Para este caso de estudio se plantea lo siguiente:

Considerando una producción de 8000 toneladas de varilla con una carga de 3 toneladas por rack-arreglo se procesan en este proyecto 2667 cargas aproximadamente, el tiempo agregado al proceso por la limpieza necesaria del arreglo es de 74 días de producción:

$$2667 \times 40 \text{ min} = 106,680 \text{ min} = 1778 \text{ horas} = 74 \text{ días}$$

Esta información ayuda a configurar otra forma de trabajo mediante la siguiente propuesta:

Utilizar otra tina de decapado de proceso para decapado de arreglo especialmente para este proyecto

de procesamiento de 8000 toneladas de varilla. De esta manera, de las 8 tinas de decapado existentes, dos tinas serán utilizadas en paralelo para reducir el tiempo de estancia de los arreglos galvanizados a la mitad, es decir, 889 horas y quedarán 6 tinas de decapado de proceso con la capacidad suficiente. Esto contribuye a reducir el tiempo de proceso del proyecto en 37 días, los cuales se traducen en menores costos de operación, aumento de la productividad y mejores tiempos de entrega al cliente.

También se recomienda la revisión del programa de mantenimiento preventivo para las grúas viajeras del proceso de galvanizado y la revisión de la eficacia de su mantenimiento correctivo, a fin de minimizar los paros por avería de las grúas que detengan la producción; entendiéndose que los patrones de uso de las grúas pudieran aumentar debido a la carga de trabajo del proyecto de galvanizado de varilla aunado a la atención normal de los materiales de otros clientes.

Por último, se propone hacer un modelo de simulación discreta del proceso de galvanizado de varilla, lo cual permitirá crear escenarios alternos de producción y experimentar con ellos, ya que esto mostraría de manera estadística y cuantificada los resultados y el impacto de cada decisión tomada.

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Asociación Latinoamericana de Zinc (LATI-ZA, 2018), Galvanizado Proceso. Obtenido el 26 de abril de 2018, de la página electrónica: [www.latiza.com/zinc/uso-y-aplicaciones/galvanizado-proceso/](http://www.latiza.com/zinc/uso-y-aplicaciones/galvanizado-proceso/).
- [2] American Galvanizer's Association (AGA, 2018) Revestimientos de zinc. Obtenido el 27 de abril de 2018, de la página electrónica: [www.galvanizeit.org/uploads/publications/Revestimientos\\_Zinc.pdf](http://www.galvanizeit.org/uploads/publications/Revestimientos_Zinc.pdf).
- [3] Cartín, Andrés. Villarreal y A. Morera. Implementación del análisis de riesgo en la industria alimentaria mediante la metodología AMEF: enfoque práctico y conceptual. *Revista de Medicina Veterinaria*, No. 27, enero-junio (2014), 133-148.
- [4] García, Telmo. Estudio para la reducción de costos por fallas en el proceso de llenado y empaque de leche en la pasteurizadora Quito en base al sistema AMEF. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 2016.
- [5] Caal, Leonel. Mejora continua mediante la utilización de Seis Sigma para la selección y asignación de recursos de sistemas en una empresa dedicada a la producción de lámina galvanizada. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005.

[6] Martínez, César. *Implementación de un Análisis de Modo y Efecto de Falla en una línea de manufactura para juguetes*. Universidad Autónoma de Nuevo León, 2004.

[7] Zapata, Carlos y S. Milena. *Reglas de consistencia entre modelos de requisitos de un método*. Revista Universidad EAFIT, Vol. 42, No. 141 (2006), 40-59.

[8] Hernández, David, *Análisis del Modo y Efecto de las Fallas potenciales aplicados a un caso de estudio*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2005.

[9] Chrysler LCC, Ford Motor Company, General Motors Corporation, *Manual de referencia: FMEA-4. Análisis de Modos y Efectos de Fallas potenciales*. Publicación de AIAG, 2008.

[10] Merchán, A., *Análisis Modal de Fallas y Efectos (AMFE) en el proceso de producción de tableros eléctricos de la empresa EC-BOX*. Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador, 2015.