

Diagnóstico de riesgos potenciales en el proceso de extracción de piedra caliza mediante AMEF. Caso de estudio: Empresa Tenex-tepec y sus Anexos



Colaboración

José Luis Hernández de Lázaro; Alma Luz Alarcón Hernández, Instituto Tecnológico Superior de Perote; Joel Avilés Sondón, Empresa Tenex-tepec y sus Anexos; Saúl Santiago Cruz, Instituto Tecnológico Superior de Mian-tla

RESUMEN: La empresa Tenex-tepec y sus Anexos, es una empresa dedicada a la manufactura de productos para la construcción; cuenta con una producción de 9100 toneladas mensuales de cal hidratada, y el mercado al que se enfrenta la empresa, es cada día más competitivo; por esta razón, es preciso contar con una herramienta que le ayude a determinar los riesgos potenciales que pueden afectar el proceso de la extracción de piedra caliza. Para tal caso, se utilizó la herramienta AMEF, ya que de acuerdo al caso de Estudio, es la que mejor resultados arrojó en su implementación; mejor control en los procesos de extracción, y mayor productividad.

De acuerdo a los resultados del AMEF, se determina que se elimine el método primario, y se mejore el método secundario por ser el que menor riesgo tiene y mayor productividad.

PALABRAS CLAVE: Análisis Modal de Efectos, AMEF, modos de fallas, extracción, caliza.

ABSTRACT: The company Tenex-tepec and its Anexos, is a company dedicated to the manufacture of products for construction; It has a production of 9100 monthly tons of hydrated lime, and the market facing the company is increasingly competitive; For this reason, it is necessary to have a tool that helps you determine the potential risks that may affect the process of limestone extraction. For this case, the AMEF tool was used, since according to the case study, it was the one that produced the best results in its implementation; better control in extraction processes, and higher productivity.

According to the results of the AMEF, it is determined that the primary method is eliminated, and the secondary method is improved because it has the lowest risk and greater productivity.

KEYWORDS: Modal Analysis of Effects, AMEF, failure modes, extraction, limestone

INTRODUCCIÓN

La piedra caliza es un mineral que se encuentra en forma natural prácticamente en todo el mundo. Su composición química varía entre los yacimientos de diferentes regiones, y en una misma región. Para que una caliza sea calificada como conveniente para procesarla, debe contener como mínimo un 50% de carbonato de calcio. Toda piedra caliza contiene una mezcla de minerales, tales como CaCO_3 , MgCO_3 , CaO , Hierro, Sílice, Alúmina, y rastros de otros componentes.

De los minerales mencionados anteriormente, solo el Carbonato de Calcio (CaCO_3) y el Carbonato de Magnesio (MgCO_3), son de interés para la manufactura de cal. Estos dos minerales constituyen el 85 al 90% del total de la composición de la piedra caliza, y sólo dos tipos de cal son producidas con estas piedras: Cal Cálctica y Cal Magnésica.

La piedra caliza cálcica contiene un alto contenido de Calcio, cuando se calcina tiene entre un 90 y 95% de CaO y entre 1 y 2% de MgO . La piedra caliza magnésica, cuando se calcina tiene entre un 60 y 65% de CaO , y un 35 a 40% de MgO .

El factor que afecta el grado de calcinación y resistencia de la piedra caliza, es la estructura del cristal que contiene; al ser calcinada, los cristales aglomerados causan un encogimiento y reducción del volumen, es decir, a mayor temperatura del horno, mayor aglomeración; sus principales usos se aplican en la industria de la construcción, fundición, productos químicos, agroquímicos y vidrio, y sus principales derivados son: cal, carbonato de calcio y cemento.

La empresa Tenex-tepec y sus Anexos, es una empresa de producción y venta de cal hidratada. Su primera piedra se colocó en 1974, y fue constituida fiscalmente el 6 de marzo de 1978, en este mismo año empezó a ofrecer el producto de cal hidratada, cubriendo la necesidad de los usuarios de la zona centro del Estado de Veracruz.

Actualmente produce 9100 toneladas mensuales de cal hidratada, logrando abarcar un mayor mercado dentro del Estado de Veracruz, y otros estados, como Puebla y Tlaxcala. Cabe señalar que empresas de prestigio dedicadas a la manufactura de materiales para la construcción, se han fijado en la calidad de la materia prima producida por Tenex-tepec y sus Anexos. CEMEX, actualmente se compra 10,000 m^3 mensuales de piedra de $\frac{1}{2}$ "; y para lograr este suministro, es necesario contar con la materia prima suficiente que permita el cumplimiento de las toneladas solicitadas.

Por lo anterior expuesto, tiene importancia determinante para la alta dirección, contar con una herra-

mienta que diagnostique su proceso de extracción, y que le ayude a determinar los riesgos potenciales a los que se puede enfrentar en la realización de este proyecto.

El Análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF), es una metodología analítica usada para evaluar los problemas potenciales, considerados y afrontados a través del proceso. [1]

La elaboración de un AMEF en el proceso de extracción de piedra caliza, contribuirá a la empresa Tenex-tepec y sus Anexos, 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 mencionó, la organización en la que se desarrolla el AMEF, es la empresa de manufactura y comercialización de cal hidratada, la cual está ubicada en la comunidad de San Antonio Tenex-tepec, municipio de Perote, Veracruz. La planta se encuentra instalada en un área de 30,187 m^2 , de éstos, 19,621 m^2 son de construcción divididos en cuatro áreas principales: Extracción de materia prima, Trituración, Calcinación, e hidratación. Esta investigación se realiza en el área de extracción con la implementación de una herramienta de Ingeniería Industrial, donde se genera conocimiento técnico e información específica en este proceso.

En la figura 1, se detalla la metodología general llevada a cabo:



Figura 1. Metodología seguida en la investigación Elaboración propia

Como herramienta de diagnóstico inicial en la definición del proceso a estudiar, se realizó un diagrama de Ishikawa como vehículo para ayudar al equipo multidisciplinario a tener una concepción común del tema a estudiar, con todos los elementos y relaciones claramente visibles [2].



Figura 2. Diagrama causa-efecto del proceso (calidad y productividad) de extracción de piedra caliza.

MARCO TEÓRICO
EXTRACCIÓN DE PIEDRA CALIZA

En esta región ha sido trascendental la explotación de las rocas calizas para la elaboración de cal, y al igual que otros recursos, su importancia, usos y forma de explotación ha variado a través del tiempo; del mismo modo, la forma de acceso a este recurso ha variado de acuerdo con las entidades políticas. No obstante, las primeras evidencias de explotación se ubican entre el 2500 a.C-200 d.C., y el 600 d.C., siendo en los años de 850 al 1200 d.C., cuando se dio una mayor intensificación en la explotación de cal. El proceso de extracción de piedra caliza se rige bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-023-stps-2012, Minas subterráneas y minas a cielo abierto – Condiciones de seguridad y salud en el trabajo. Aunque el procedimiento de extracción de piedra caliza se ha realizado desde hace 40 años dentro de esta empresa, se han tenido que aplicar diferentes técnicas que les permite incrementar su producción.

ETAPAS GENERALES DEL PROCESO

La mina trabaja en dos tipos de bancos, uno de tipo alto donde los trabajos de barrenación se realizan en alturas de hasta 140 mts de altura, a este banco se le nombra "banco primario", y el segundo banco inferior o bajo, llamado "banco secundario" donde los trabajos de extracción se realizan de manera controlada.

MÉTODO ANTIGUO DE EXTRACCIÓN

En esta parte del proceso las actividades son llevadas a cabo por 9 operarios: jefe de pobladores, tres pobladores, tres perforistas y un compresorista. Se usan pistolas neumáticas con un peso aproximado de 25 Kg. conectadas a un compresor. El proceso se realiza en el talud del banco primario; es decir, en la cara frontal del cerro a 140 mts de altura aproximadamente; dada la naturaleza de la zona, estas actividades son de alto riesgo. El proceso consta de 4 ascensos a pie, por el contorno del cerro a través de una vereda escarpada de unos 50 a 80 cm. de ancho, por donde se transporta la maquinaria nece-

saria, así como el material explosivo. Tiene 5 descensos que utilizan para bajar por el material; de los cuales, el último es uno con mayor peligro, ya que se realiza en vertical con ayuda de unas líneas de seguridad (lazos) equivocadamente estructuradas. Una vez que el material llegó al lugar de trabajo, se comienza con las labores de perforación, dependiendo de la profundidad del barreno; un barreno corto se realiza mediante pistola neumática, mientras que uno de mayor profundidad requiere trabajos manuales (golpeteo a mano con barrenas), estos son los más peligrosos a causa del terreno; los operarios llevan a cabo sus tareas sujetos a una línea de seguridad -lazos alrededor de la cintura amarrados por ellos mismos-, cuando deberían utilizar equipos de seguridad.

Cuando los barrenos ya tienen la profundidad adecuada, son cargados con material explosivo, y cuando esta tarea es llevada a cabo se enciende la mecha para el efecto explosivo; es aquí cuando uno de los ascensos en vertical con mayor grado de peligro se hace presente; si el operario no sube a tiempo a lo alto del cerro, puede ser alcanzado por la explosión, o en su defecto podría caer, y el resultado sería fatal.

El tiempo promedio de los trabajos de barrenación es de 18 hrs., 54 minutos; sin embargo, las tareas se pueden extender hasta 36 hrs., dependiendo de la zona a derribar. El operario trabaja en condiciones climáticas adversas, en verano a una temperatura de hasta 22°C y en invierno a temperaturas bajo cero; ningún trabajador usa arnés de seguridad, botas adecuadas para las labores, ni la vestimenta requerida por la STPS, todo esto eleva la probabilidad de jornadas inseguras.

Con este método de extracción, no es posible proyectar el nivel de roca obtenido, ni datos exactos en cuanto a la productividad, debido a la diversidad de los factores que influyen en el banco primario.

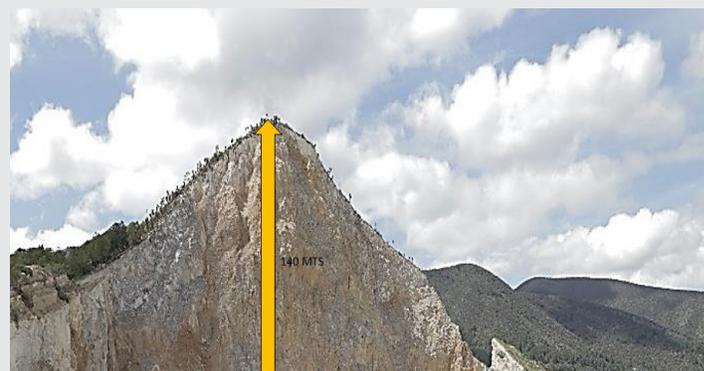


Figura 3. Banco primario de extracción de piedra caliza. Tomado del recorrido realizado en la mina de la empresa Tenextepc y sus Anexos

MÉTODO DE VOLADURAS CONTROLADAS

Dentro de este método, los ascensos y descensos, son eliminados por completo con esta forma de trabajo, dado que las operaciones se realizan a nivel de piso a una altura de 12mts como máximo; los traslados se aminoran, y la exposición del operario con el material explosivo y a situaciones extremas, se reducen considerablemente.

Las actividades son llevadas a cabo por un jefe de pobladores, un perforista, un poblador, un ayudante de poblador y un compresorista.

El operario coloca la máquina en el lugar marcado para barrenar, la sitúa en el punto exacto y la inicia, perforando el suelo de manera autónoma. Una vez realizado el barreno, el poblador carga cada una de las perforaciones con explosivos y las rellena con arena, posteriormente inicia el encendido de los barrenos, dando el tiempo suficiente para que los operarios se resguarden en trincheras y no sean alcanzados por fragmentos de roca.

La perforación de los barrenos se elabora mediante un trackdril, es una máquina perforadora conectada a un compresor; el riesgo principal al que se exponen los operarios, es el uso de herramientas de poder, y la manipulación de material explosivo, es decir, que puede haber daños al no saber manipular la maquinaria, o en su defecto accidentes relacionados con el mal uso o transporte de las cargas de explosivos, así como el cálculo erróneo en la iniciación de los barrenos; si el operario no es cuidadoso, podría ser alcanzado por el efecto de explosión; sin embargo, la exposición del operario en esta forma se reduce casi al 80%.

El tiempo promedio de esta actividad es de 2 hrs con 58 min, y se puede extender hasta 5 hrs dependiendo de las actividades. Este método de voladura de banco, no solo reduce el riesgo de exposición de los trabajadores, sino también la incidencia de accidentes, pero sobre todo, incrementa la productividad en la extracción de piedra caliza.



Figura 4. Banco secundario de extracción de piedra caliza. Tomado del recorrido realizado en la mina de la empresa Tenex-tepec y sus Anexos.

La altura del banco se determinó por el tipo de maquinaria utilizada para el proceso, un trackdril con una barrena de 12 mts de largo y 3" de diámetro, por lo tanto, la altura del banco será de 12 metros. Una plantilla de tresbolillo, que es con la que se obtiene una fracturación de roca más uniforme, se establece a través de los cálculos realizados con las siguientes dimensiones:

- Bordo: 2.3 mts
- Diámetro del barreno: 3"
- Subbarrenación: 0.75 mts
- Espaciamiento entre barrenos: 2 mts
- Taco: 1.75 mts

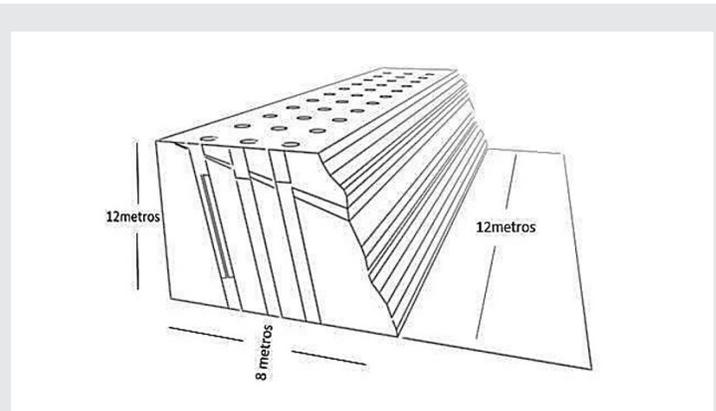


Figura 5. Medidas del banco a derribar mediante el método de voladuras controladas. Tomado de los archivos de la empresa Tenex-tepec y sus Anexos.

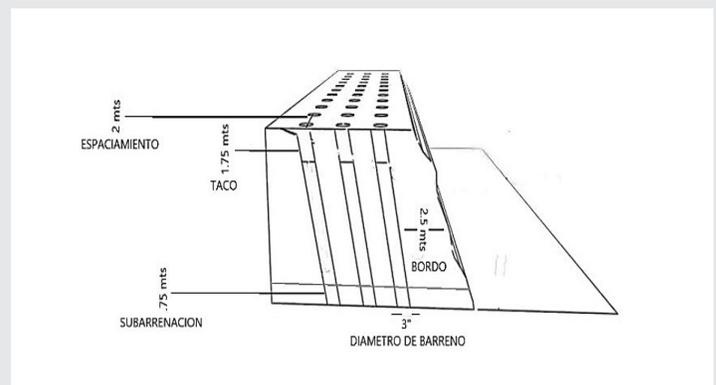


Figura 6. Medidas de barrenos para realizar la voladura controlada. Tomado de los archivos de la empresa Tenex-tepec y sus Anexos.

A diferencia del método antiguo, en éste, es posible determinar el volumen de metros cúbicos que resultarán de la voladura, el resultado de la implementación de este método es de 1152 m³.

ANÁLISIS MODAL DE EFECTOS Y FALLAS POTENCIALES

El análisis Modal de Efectos y Fallas (AMEF), es actualmente la técnica más utilizada para el análisis de riesgos. Éste sigue siendo una parte esencial dentro de

las organizaciones. AMEF es un método efectivo para diseñar y producir análisis de riesgo, el cual permite examinar los procesos de diseño y fabricación, e identificar oportunidades para las deficiencias y defectos que pueden conducir a la insatisfacción del cliente, o afectación a la calidad y productividad.

El algoritmo del AMEF fue desarrollado 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.

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 el área automotriz QS 9000.

Chrysler Corporation, Ford Motor Company y General Motors Corporation, enriquecieron esta metodología en un esfuerzo para estandarizar los sistemas de calidad de los proveedores, 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. Estas normas son el equivalente al procedimiento técnico de la Sociedad de Ingenieros Automotrices SAE J-1739. 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. [3]

De acuerdo con el Manual de Referencia: FMEA-4,[1] 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 Alcance 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.

AMEF del proceso de extracción de piedra caliza

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, se debe conformar un grupo interdisciplinario cuyos miembros abarcan los conocimientos y experiencia necesarios para el tema. El equipo (haciendo referencia al puesto dentro de la organización), quedó conformado por:

Jefe de pobladores, Pobladores, Perforistas, ayudante de perforista, Compresorista

Inicialmente se realiza un diagrama causa-efecto (figura 2), para orientarnos acerca de las causas generales sobre las que impacta la calidad y la productividad de la extracción de piedra caliza. De acuerdo con lo referido en el marco teórico, se realiza un diagrama de flujo del proceso, que nos ayuda a emprender el análisis de las actividades que se realizan en la extracción de piedra caliza

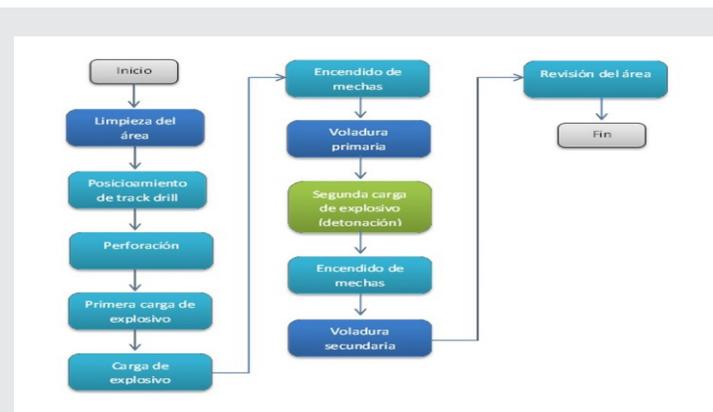


Figura 7. Diagrama del proceso de extracción de piedra caliza. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Diagrama de flujo de proceso del galvanizado de varilla de acero

Diagrama 1		Fecha: Septiembre de 2018		
Producto: piedra caliza		RG:		
		Resumen		
		Observador: JPDF	Actual	Propuesto
Actividad		Operación	01:73:183	
		Transporte	00:55:31	
		Demora	0	
		Inspección	00:10:30	
		Combinada	0	
		Total	02:58:28	
Descripción	Tiempo (min)	Actividad	Tiempo (min.)	Observaciones
Limpieza del área	01:50:09			Poco personal para esta actividad
Transporte de track drill	00:15:34			Traslado lento de la maquinaria
Posicionamiento de track drill	00:03:00			
Perforación	00:05:40			
Inspección de barreno	00:05:30			Visual
Retiro de track drill	00:02:00			Traslado lento de la maquinaria
Transporte de material explosivo	00:07:00			
Primera carga de explosivo (abrir caja)	00:04:50			
Encendido de mecha	00:00:05			
Resguardo de operario	00:01:40			
Voladura primaria	00:01:02			
Segunda carga explosivos (detonación)	00:05:00			
Retiro de personal y maquinaria	00:07:21			
Encendido de mechas	00:00:05			Poco tiempo antes de detonar
Resguardo de operarios	00:02:00			El lugar no cumple con las medidas de seguridad
Voladura secundaria	00:01:32			
Espera obligatoria de operarios	00:01:00			
Revisión del área	00:05:00			
TOTAL	02:58:28	12	4	0

Fuente: Elaboración propia

Se considera la utilización del AMEF como un algoritmo preciso, y una herramienta útil para el estudio de este proyecto, gracias a sus características

Identificación de los modos de falla potencial en el proceso. De acuerdo con Hernández (2005), un modo de falla potencial, es la manera en la cual un componente, subsistema o sistema, puede potencialmente fallar en cumplir una función esperada. Los tipos de modos de falla más ocurrentes son:

No funciona: el sistema o proceso es inoperante.
 Función parcial: desempeño degradado; es decir, que cumple con alguna de las especificaciones pero que no cumple completamente con su función.

Función intermitente: cumple, pero se pierde algo de funcionalidad, o llega a ser inoperativo.

Porsu parte, el manual de referencia FMEA-4P indica que los modos de fallas potenciales deben ser descritos en términos técnicos.

Tabla 2. Modos de falla

Limpieza del área	Mucho tiempo para limpiar el área Pocos operarios para realizar la actividad Condiciones de clima desfavorables
Transporte de track drill	Compresor neumático y fugas de aire Cadena de movimiento desgastada Falta de lubricación Mangueras en mal estado
Perforación	Brocas desgastadas y sin botones de corte Ruptura de resortes y palometas Falta de lubricación Falta de presión de aire
Inspección de barreno	Tapado del barreno Con una plomada se chequea que este vertical Profundidad de acuerdo a la medida deseada Espesor del barreno
Retiro de track drill	Condiciones desfavorables para maniobras Movimiento lento del equipo Pericia del operador para maniobrar y retirar Buena presión de aire y lubricación de los componentes de perforación
Transporte de material explosivo	Falta de transporte adecuado Uso de carretillas con un peso de 100 kilogramos
Primera carga de explosivo	Se mide la profundidad del barreno Barreno tapado con material de caliza al momento de retirar la barra Se verifica con una plomada que esté completamente vertical Verifica de acuerdo a la profundidad que cantidad de explosivo se usa
Encendido de mecha	El encendido es con un encendedor o cerillo Rachas de viento fuertes al momento de encender la mecha Medida de espoleta diferente y detona en diferentes tiempos (minutos)
Resguardo de operario	El fulminante no siempre está sujeto de la mecha Verifica que no haya personal a los alrededores, solo con señales a los compañeros Distancia larga al lugar de refugio del poblador Condición física de los trabajadores desequilibrada

Fuente: Elaboración propia

Proceso: Extracción de piedra caliza	Actividad	○
	Operación	
	Transporte	⇒
Actividad: Barrenado	Demora	D
	Inspección	□
Lugar: Mina de la empresa "Tenex-tepec y sus Anexos"	Almacenamiento	▽
	Tiempo (min)	

Figura 8a: Símbolos de referencia del diagrama de flujo

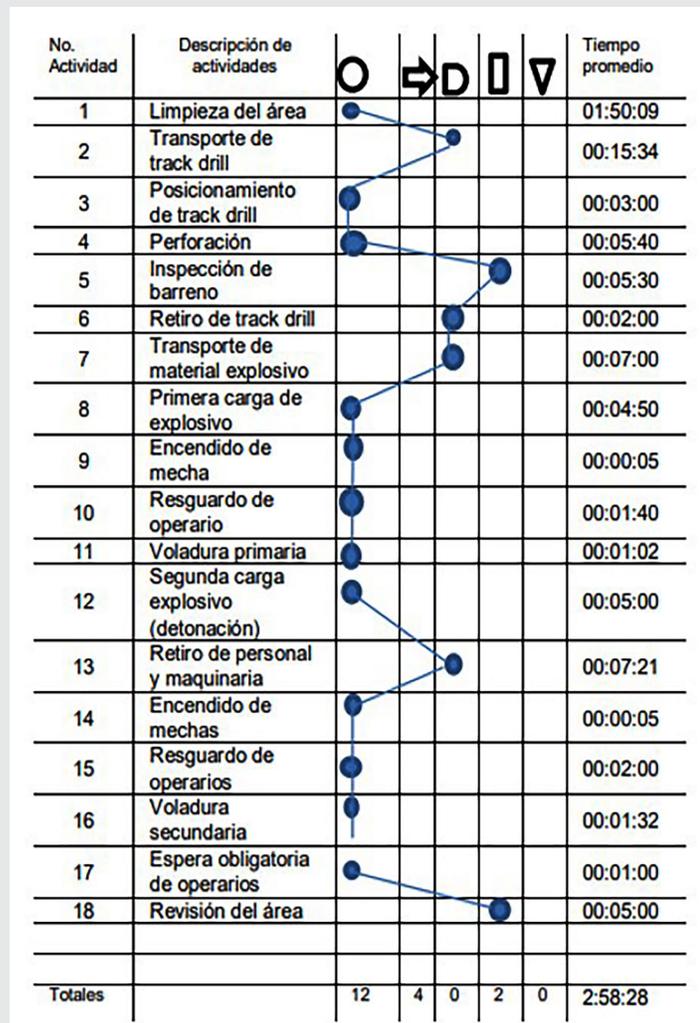


Figura 8b: Diagrama de flujo de operaciones de la extracción de piedra caliza. Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se hace un diagrama de flujo de proceso de la extracción de piedra caliza, a fin de encontrar información consistente y detallada que sea útil en la configuración del AMEF.

Efectos potenciales de las fallas

El equipo multidisciplinario realiza un análisis que determina los efectos y causas potenciales de los modos de falla. Por su parte, el manual de referencia FMEA-4P indica que los efectos de fallas deben ser descritos en términos de lo que los clientes puedan notar o experimentar, recordando que el cliente puede ser interno.

Tabla 3. Efectos y causas de fallo

MODO DE FALLA POTENCIAL	EFEECTO	CAUSA DE FALLA
Mucho tiempo para limpiar el área	Retrasa la detonación para la extracción de caliza	Áreas de grandes dimensiones
Pocos operarios para realizar la actividad	Retrasa la detonación para la extracción de caliza	Falta de contratación de personal
Condiciones de clima desfavorables	Disminución de la obtención de caliza	Mal estado del clima
Compresor neumático con fugas de aire	Mal barrenado	Falta de mantenimiento preventivo y/o correctivo
Cadena de movimiento desgastada	Traslado lento al área de barrenar	Desatención por parte de los administradores
Falta de lubricación	Traslado lento y oxidación de la maquinaria	Falta de mantenimiento preventivo y/o correctivo
Mangueras en mal estado	Mal barrenado dentro de los bancos de piedra	Falta de mantenimiento preventivo y/o correctivo
Brocas desgastadas y sin bolones de corte	Mayor tiempo y desgaste del equipo para realizar la actividad	Desatención por parte de los administradores
Ruptura de resortes y palmetas	Equipo trabajando al 80% de su totalidad	Falta de mantenimiento preventivo y/o correctivo
Falta de lubricación	Desgaste del equipo	Falta de mantenimiento preventivo y/o correctivo
Falta de presión de aire	Mayor tiempo en realizar la perforación y perforación	Compresor con fugas de aire
Tapado de barrenos	Mala detonación del barreno	Desatención del trabajador y/o mala limpieza del área
Con una plomada se chequea que esté vertical	Mala detonación del barreno si no se encuentra en esa posición	No se cuenta con el equipo para realizar esta actividad
Profundidad distinta de acuerdo a la medida deseada	Mala detonación de los barrenos	Equipo desgastado
Espesor del barreno	Medidas distintas	Equipo desgastado
Condiciones desfavorables para maniobras	Mucho tiempo en retirar del equipo	Condiciones del suelo
Movimiento lento del equipo	Retraso para poder realizar la carga de explosivos	Condiciones de suelo y cadenas del equipo
Pericia del operador para maniobrar y retirar	Retraso en las siguientes actividades del proceso	Falta de compromiso con la empresa
Falta de presión de aire y lubricación de los componentes de perf	Bajo rendimiento del equipo	Falta de mantenimiento preventivo y/o correctivo
Falta de transporte adecuado	Mucho tiempo en realizar la actividad	Falta de adquisición de equipo adecuado para el
Uso de carretillas con un peso de 100 kilogramos	Alto riesgo para el trabajador y desgaste físico del mismo	Solo se cuenta con este tipo de transporte para esta
Medida de la profundidad del barreno	Mala detonación del barreno	Equipo desgastado
Barreno tapado con material de caliza al momento de retirar la barra	Tapado de barreno impidiendo la carga de explosivo	Desatención por parte del operario del equipo
Se verifica con una plomada que esté completamente vertical	Mucho tiempo en verificar	Solo se cuenta con ese equipo para realizar la
Diferente longitud de profundidad	Uso de más o de menos explosivo	Mal estado del equipo (Track Drill)
El encendido es con un encendedor o cerillo	Riesgo para los trabajadores	Este método se ha utilizado en los 40 años de la mina
Rachas de viento fuertes al momento de encender la mecha	Mayor tiempo para poder encender las mechas	Condiciones inestables del clima
Medida de espoleta diferente y detona en diferentes tiempos (minutos)	El explosivo detone en diferentes tiempos	El proveedor así lo entrega
El fulminante no siempre está sujeto de la mecha	Que no detone el explosivo	El proveedor así lo entrega
Verifica que no haya personal a los alrededores, solo con señales a los compañeros	Riesgo para los trabajadores que se encuentran en la mina	Método antiguo usado por los trabajadores
Distancia larga al lugar de refugio del poblador	Accidentes en los trabajadores	Solo existe un refugio en un mismo lugar
Condición física de los trabajadores desequilibrada	Accidentes de trabajo para pobladores	Trabajadores con mas de 20 años de trabajo en la empresa
Correr de forma acelerada al lugar seguro para no ser alcanzado por algún proyectil de caliza	Accidentes de trabajo por las condiciones del suelo	Poco tiempo para activar el explosivo
Esperarse en el refugio después de la detonación 15 minutos	Mucho tiempo de espera	Normalidad de los explosivos
Condiciones de refugio inadecuadas	Aumenta el riesgo de accidentes de los trabajadores	El refugio es improvisado ya que por las condiciones de la mina no se podrían construir algo adecuado
Muy poco tiempo (milisegundos) para la detonación en la instalación de los iniciadores o	Accidentes de trabajo en los pobladores	Mechas cortas
Se utiliza alto explosivo, agente explosivo, cordón detonante, mecha e iniciador	Riesgo de trabajo alto	Material requerido para la función que se necesita
No siempre se determina el número de barrenos y líneas de barrenos a detonar	No saber cuánta piedra caliza se obtiene	Depende de la demanda de cal hidratada

Se utiliza alto explosivo, agente explosivo, cordón detonante, mecha e iniciador	Riesgo de trabajo alto	Material requerido para la función que se necesita
No siempre se determina el número de barrenos y líneas de barrenos	No saber cuánta piedra caliza se obtiene	Depende de la demanda de cal hidratada
Diferente programación para las detonaciones, para realizarla no debe haber personal ni	No se sabe con exactitud cuánta caliza se obtiene y en	Depende de la demanda de cal hidratada
Durante el traslado de explosivo se observa movimiento de maquinaria	Riesgo para los trabajadores que se encuentran en la mina	Desatención de los operarios de maquinaria
No se tiene el cálculo en tiempo de que va ardiendo la mecha (longitud de mecha)	No se determina el tiempo de detonación	Diferentes medidas de las mechas
Los guías que dan aviso a los trabajadores de las detonaciones no cuentan con el equipo de seguridad necesario	Riesgo de trabajo alto	Desatención por parte de los jefes de turno
No se encuentran en la zona, en su caso se resguardan en lugares seguros	Ninguno	El método así lo permite
Lejos del lugar de la detonación	Ninguno	El método así lo permite (voladura controlada)
Poca supervisión en la profundidad de cada barreno	Tapado de barrenos	Desatención del jefe de turno
Se encuentra tapado el barreno se procede a barrenos nuevamente	Mayor tiempo para realizar la actividad e incremento de	Mal manejo del equipo por parte del operario
En caso de no poder pasar la barra se procede a no cargar con explosivo la segunda línea	Disminución de extracción de caliza	Mal barrenado por parte del operario
Se supervisa después de la detonación, 15 minutos después	Riesgo de trabajo	Normalidad de los explosivos
En su caso al día siguiente se supervisa que todos los barrenos detonaron	Riesgo de trabajo	Condiciones desfavorables en la zona
Se revisa o supervisa el borde de manera visual que no esté fracturado para hacer maniobras	Accidentes de trabajo	No se cuenta con equipo para poder supervisar la zona
No siempre detonan todos los barrenos	No se obtiene la caliza esperada	Defectos de fábrica por parte del proveedor del material
Explosivo que no detonó	Incremento de costos y mano de obra	Defectos de fábrica por parte del proveedor del material
Maniobras por detonar explosivo que no detonó en el momento	Incremento de costos y mano de obra	Se tiene que detonar el explosivo que no detone para que no impida la siguiente detonación

Fuente: Elaboración propia

La información generada de los modos de fallas, causas potenciales y efectos debe integrarse al formato del AMEF de procesos, el cual fue diseñado con base en el Manual de Referencia FMEA-4, [1].

Tabla 4. Formato de AMEF de procesos

ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS POTENCIALES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE PIEDRA CALIZA																			
AMEF DE PROCESOS												Número de AMEF _____							
Responsabilidades del proceso _____												Página _____							
Fecha clave _____												Preparado por _____							
Equipo central _____												Fecha de AMEF _____							
Función	Requerimiento	Modo de falla potencial	Efectos potenciales	Severidad	Causas potenciales de la falla	Directo/actual				Acciones recomendadas	Responsabilidad y fecha de terminación	Resultados de las acciones							
						Control de prevención	Ocurrencia	Control de detección	Detección			IPS	IPS	IPS	IPS				

Fuente: Elaboración propia (basada en FMEA-4)

Número de Prioridad de Riesgo (NPR)

El número de prioridad de riesgo, también conocido como Índice de Prioridad de Riesgo, es una métrica esencial del AMEF. De acuerdo con [4], permite evaluar cada uno de los efectos de fallo con el fin de priorizar las causas de fallo, sobre las cuales habrá que aplicar acciones correctivas.

Al respecto, [3] indica que cuando los modos de falla han sido ordenados por el NPR, las acciones correctivas deberán dirigirse, primero a los problemas y puntos de grado e ítems críticos. La intención de cualquier acción recomendada, es reducir los gastos de ocurrencia, severidad y/o detección.

En el Manual de Referencia: [1], se expresa con la siguiente fórmula:

$$PR = Severidad(S) \times Ocurrencia(O) \times Detección(D)$$

Continúa la tabla en la columna derecha

Dependiendo del alcance del AMEF, es recomendable que el NPR tenga valores entre 1 a 1000.

Severidad

Severidad es el valor asociado con el más serio efecto para un modo de fallo dado. De acuerdo con [4], se define como índice de severidad al parámetro que evalúa la gravedad del efecto de fallo para el cliente, el cual se mide en una escala de 1 al 10, en donde, 1 representa un índice de severidad nulo, y diez un índice de severidad extremo.

Si la severidad tiene valores entre 9 y 10, debe hacerse énfasis especial sobre las posibles acciones para eliminarlos modos de falla, o que cambie su impacto en el desempeño del proceso.

Tabla 5. Efectos y causas de fallos

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 la producción se detenga. Pérdida de una función primaria	8
Interrupción significativa	Desviación del proceso, incluyendo un decremento en la velocidad de la actividad o adición de mano de obra.	7
Interrupción moderada	Puede ser que un alto porcentaje de la corrida de producción tenga que retrabajarse, fuera de la línea y ser aceptada	6
	Puede ser que una proporción de la corrida de producción tenga que retrabajarse, fuera de la línea y ser aceptada	5
	Puede ser que un porcentaje de la corrida de producción tenga que retrabajarse en la estación, antes de continuar con el proceso	4
	Puede ser que una proporción de la corrida de producción tenga que retrabajarse fuera de la línea y ser aceptada	3
Interrupción menor	Ligera conveniencia al proceso, operación u operador.	2
Sin efecto discernible	Sin efecto	1

Ocurrencia

El Manual de Referencia: [1], define la ocurrencia como la probabilidad de que alguna causa específica, de que una falla ocurra. El número de rango de probabilidad de ocurrencia, es de un significado relativo más, que de un valor absoluto.

Se estima la probabilidad de ocurrencia de la causa potencial de una falla en una escala de 1 al 10. Debe usarse un sistema de rangos de ocurrencia consistente para asegurar continuidad. El número de rango de ocurrencia, es de un rango relativo dentro del alcance del AMEF, y puede no reflejar la probabilidad actual de ocurrencia.

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 em-

presa. Al respecto, [3] establece que un método alternativo para estimar la probabilidad de la ocurrencia, es el uso del mejor criterio del equipo multidisciplinario, cuántos casos se han presentado del total que sean vistos.

Tabla 6. Criterios para la evaluación de ocurrencia

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

Detección

La detección es un rango relativo dentro al alcance del AMEF. Se asume que la falla ha ocurrido, y entonces se evalúan las capacidades de todos los controles del proceso, para prevenir el envío de materiales que tengan ese modo de falla. (Manual de Referencia: [1]).

Tabla 7. Criterios para la evaluación de detección

Oportunidad de detección	Probabilidad de detección por controles del proceso	Rango	Probabilidad de detección
Oportunidad de no detección	Sin control de proceso primario; No puede detectarse o no es analizado	10	Casi imposible
Sin probabilidad de detección en ninguna etapa	Causa del modo de falla y/o error no es fácilmente detectado	9	Muy remota
Detección del problema posterior al procesamiento	Detección del modo de falla, en la estación por el operador a través de medios visuales, táctiles, audibles	8	Remota
Detección del problema en la fuente	Detección del modo de falla, en la estación por el operador a través de medios visuales, táctiles, audibles o posterior al procesamiento con el uso de equipos de medición	7	Muy baja
Detección del problema posterior al procesamiento	Detección del modo de falla posterior al procesamiento por el operador con el uso de equipos de medición o por controles	6	Baja
Detección del problema en la fuente	Detección de las causas del modo de falla o error en la estación por el operador a través del uso de equipos o por controles en la estación que detecten la parte discrepante y notifiquen al operador	5	Moderada
Detección del problema posterior al procesamiento	Detección del modo de falla posterior al procesamiento por controles que detectan la parte discrepante y aseguran la parte para prevenir algún procesamiento posterior	4	Altamente moderada
Detección del problema en la fuente	Detección del modo de falla en la estación por controles que detectan la parte discrepante y aseguran automáticamente la parte en la estación para prevenir algún procesamiento posterior	3	Alta
Detección del error y/o prevención del problema	Detección de las causas del error en la estación por controles que detectan el error y previenen que la parte discrepante sea hecha	2	Muy alta
Detección no aplica; Prevención de errores	Prevención de las causas del error como resultado del diseño de un dispositivo, diseño de máquina o diseño de la parte. Partes discrepantes no pueden hacerse por que el ítem se ha hecho a prueba de errores del proceso	1	Casi cierta

A continuación, se presenta el AMEF desarrollado para el proyecto de extracción de piedra caliza, en la empresa Tenex-tepec y sus Anexos.

RESULTADOS

El AMEF arrojó resultados del número de Prioridades de Riesgos, los cuales se grafican a continuación:

Como se observa, las causas potenciales de falla que tiene un mayor NPR en la gráfica son:

El número de prioridad de riesgo, indica que las primeras causas de falla a ser atendidas, son las que se relacionan con la ruptura de resortes, palometas, y el uso de alto explosivo.

A través del NPR, el AMEF permite identificar este problema potencial, estableciendo que la ocurrencia de este evento, genere un foco de atención inmediata.

Esta información reconoce lo siguiente:

De acuerdo al estudio realizado mediante AMEF, y en base a los resultados arrojados por el mismo, se determina que el método de extracción de piedra caliza más óptimo, es el Método Secundario, ya que a diferencia del Método Primario, implica menor riesgo de trabajo, mayor productividad y menos costo de operación.

Se determina lo urgente de la implementación de un programa de mantenimiento correctivo y/o preventivo, para evitar aplazamientos en las actividades operativas.

De igual forma, las demás causas potenciales de fallas (ver tabla 9), está relacionadas con los paros en la producción.

El AMEF nos indica, que es oportuno la implementación de un programa de mantenimiento preventivo de estos equipos, y la revisión de la eficacia del mantenimiento correctivo, a fin de minimizar los paros, o aumento de tiempo por el desgaste de piezas de la maquinaria.

CONCLUSIONES

El AMEF es una herramienta confiable para reconocer y evaluar los modos de falla de procesos, metodología probada en compañías importantes a nivel mundial.

A través del desarrollo del AMEF para el caso de estudio del procesamiento de la extracción de piedra caliza en la empresa Tenex-tepec y sus Anexos, se identificaron los modos de fallas potenciales y las causas que las provocaron, contribuyendo de esta forma, a identificar las características críticas de este proceso.

Tabla 8. AMEF del proyecto de Extracción de Piedra Caliza en Tenex-tepec y sus Anexos.

Tabla 9. AMEF del proyecto de Extracción de Piedra Caliza en Tenex-tepec y sus Anexos.

Fuente: Elaboración propia

De esta forma, el AMEF puede incorporarse a la administración de Tenex-tepec y sus Anexos, como una herramienta integral de la gestión de riesgos

potenciales en sus procesos, ya que se probó consistentemente, que a través de su implementación, se contribuye a mejoras orientadas hacia la productividad y calidad de sus operaciones.

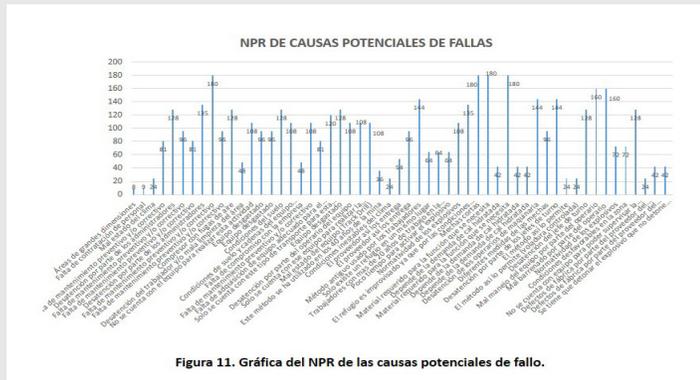


Figura 11. Gráfica del NPR de las causas potenciales de fallo.

Figura 11. Gráfica del NPR de las causas potenciales de fallo. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Causas potenciales de falla con mayor NPR para el proyecto de Extracción de Piedra Caliza.

Causas potenciales de falla	Modo de falla potencial asociada a la causa	NPR
Ruptura de resortes y palometas	Falta de mantenimiento preventivo y/o correctivo	180
Muy poco tiempo (milisegundos) para la detonación en la instalación de los iniciadores o noneles	Mechas cortas	180
Se utiliza alto explosivo, agente explosivo, cordón detonante, mecha e iniciador	Material requerido para la función que se necesita	180
Se utiliza alto explosivo, agente explosivo, cordón detonante, mecha e iniciador	Material requerido para la función que se necesita	180
Se encuentra tapado el barrenos se procede a barrenas nuevamente	Mal manejo del equipo por parte del operario	160
En caso de no poder pasar la barra se procede a no cargar con explosivo la segunda línea	Mal barrenado por parte del operario	160
Verifica que no haya personal a los alrededores, solo con señales a los compañeros	Método antiguo usado por los trabajadores	144
Durante el traslado de explosivo se observa movimiento de maquinaria	Desatención de los operarios de maquinaria	144

Fuente: Elaboración propia

BIBLIOGRAFÍA

[1] Chrysler LCC, Ford Motor Company, General Motors Corporation, Manual de referencia: FMEA-4. Análisis de Modos y Efectos de Fallas p o t e n c i a l e s. Publicación de AIAG (2008).

[2] Zapata Carlos Mario y Sandra Milena Villegas. Reglas entre modelos de requisitos de un método (pp 40-59), Universidad EAFIT, Medellín-Colombia (2006).

[3] Hernández, D., Análisis del Modo y Efecto de las Fallas Potenciales aplicados a un caso de estudio. Universidad Nacional Autónoma de México. (2005).ELSEVIER.

[4] 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).

[5] Alonzo L. etal / Ingeniería 7-1 (2003) 27-36 Estudio de las propiedades de la roca caliza de Yucatán Universidad Autónoma de Yucatán [6] Cement and Concrete Research Calced clay limestone cements ELSEVIER.

[7] Cesar Alejandro Martínez Lugo Implementación de un análisis de modo y efecto de falla en una línea de manufactura Universidad Autónoma de Nuevo León

[8] Javier Augusto Barros Leal, Julio César Martínez Espinosa (2018) Modelo para detección y simulación de fallas bajo la gestión de mantenimiento y proyectos Colombiano. MsC. Universidad International Iberoamericana

[8] Javier Augusto Barros Leal, Julio César Martínez Espinosa (2018) Modelo para detección y simulación de fallas bajo la gestión de mantenimiento y proyectos Colombiano. MsC. Universidad International Iberoamericana

[9] International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Thermal effects on the physical properties of limestones from the Yucatan Peninsula ELSEVIER.

[10] Computers and Chemical Engineering 115 (2018) Fault detection and diagnosis using empirical mode decomposition based principal component analysis.

[11] Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems (2017) Fault diagnosis with between mode similarity analysis reconstructions for multimode procesos ELSEVIER.

[12] Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad.

[13] Ortiz, R. et al, Mejoramiento del servicio de galvanizado mediante seis sigma y el análisis de la información. Ingeniería Industrial-Año 10, N°2:81-102 (2011)

[14] Pedro Mauricio Arévalo Berrezuela (2010) Reingeniería de los planes de control en ERCO, basada en la técnica del AMEF Universidad de cuenca

[15] Sartenejas, Junio de 2006 Análisis de Modo y Efecto de Falla de una llenadora tipo lineal de margarina. Universidad Simón Bolívar