



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial
Departamento de Ingeniería Industrial

Trabajo de Diploma

Título: Determinación de la criticidad del equipamiento productivo de la empresa a partir del método Análisis de Envoltura de Datos (DEA) tomando como referencia métodos tradicionales de clasificación.

Autora: Danaís Heredia Almaguer

Tutores: Dr. C. Ing. Aramis Alfonso Llanes

MSc. Ing. Andrey Vinajera Zamora

Santa Clara
2016

PENSAMIENTO

Cuando alguien se propone algo, todo el universo conspira para que lo logre.

Pablo Coelho

DEDICATORIA

A mi mamá, a mi papá, a mi novio, a Lisbet, en general a toda mi familia por su apoyo incondicional, por todo lo que se sacrificaron para darme lo mejor, gracias por recorrer todo este camino a mi lado y siempre tener la certeza de que lo iba a lograr.

AGRADECIMIENTOS

Este momento es pequeño para agradecer a todas las personas que de una forma u otra hicieron posible con su apoyo, la realización de este trabajo. En especial quiero agradecer a:

Mis padres Tania y Ramón por su amor, por lo sacrificado que fueron estos años para ellos, por estar a mi lado en mis triunfos y mis derrotas, por saber aguantar con alegrías y lágrimas que estuviera lejos, por confiar en mí, porque les debo todo lo que soy, por ser los mejores padres que alguien pudiera desear, porque son mi vida.

A toda mi familia en especial a mi sobrina por quererme tanto y ser la niña que nos llena de alegrías, a Lisbet por ser más que una prima para mí por ser mi hermana, a mi tía mari por tener tan buenos sentimientos, por poder confiar en ella y porque a la hora que le pedí cualquier favor siempre estuvo dispuesta, a mi tía Yolanda por todas las malas noches que le hice pasar llevándome a la terminal, también a mi abuela Felicia, a mis primas Marisleidis y Yolexi, al chino todos ellos que fueron los que siempre estuvieron ahí cuando los necesité.

A mi novio Carlos por ser la persona que amo, por tener la paciencia de esperar, por ser una persona maravillosa como novio y amigo, por aguantar todas mis malacrianzas y por enseñarme a ser mejor persona.

A todas mis amistades por soportarme estos cinco años en especial a:

Giselle por ser esa amiga tan especial y buena que todos necesitan tener, por los buenos momentos de fiesta que pasamos juntas.

Lais por todos los momentos de fiestas que compartimos, por escucharme y comprenderme, por ser mi compañera de tiendas.

Desireé por nunca decir que no a peinarme, pintarme y pelarme, por hacerme reír con sus locuras y porque las fiestas con ella son las más divertidas.

Lianet por todos los momentos que pasamos juntas, por ser una amiga incondicional.

Maelis por los buenos momentos que pasamos en las fiestas, por ser mi compañera de aula.

A mis tutores Aramis Alfonso Llanes y Andrey Vinajera Zamora por su profesionalidad, por permitirme apreciarlos más como persona, por tener todo el tiempo disponible para atenderme.

También les agradezco a todos los profesores que me impartieron clases durante estos cinco años en especial a Rainer Domínguez.

A los compañeros Rolando Guerra y Yulibany Rodríguez por la atención brindada en la empresa.

A todas esas personas que siempre confiaron en que este momento llegaría.

A todos gracias

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la criticidad del equipamiento productivo de la Unidad Empresarial de Base (UEB) Fábrica de Fusibles y Desconectivos de Villa Clara a partir del método Análisis de Envoladura de Datos (DEA) tomando como referencia métodos tradicionales de clasificación. En este sentido, se muestra un procedimiento que permite determinar la criticidad mediante la eficiencia técnica calculada por el método DEA para todos los equipos de la empresa.

Para darle al cumplimiento a este objetivo se realiza un estudio bibliográfico detallado con vista a conocer el “estado del arte” sobre algunas de las metodologías que giran en torno al análisis de la criticidad del equipamiento, así como los principales elementos relacionados con la metodología DEA.

Finalmente, la aplicación práctica de la propuesta, en 54 equipos de la entidad objeto de estudio práctico de la investigación, permitió demostrar que es factible realizar análisis de criticidad por el método DEA.

ABSTRACT

This study aims to determine the criticality of the production equipment Unidad Empresarial de Base (UEB) Fábrica de Fusibles y Desconectivos de Villa Clara from Data Envelopment Analysis method (DEA) by reference to traditional classification methods. In this regard, a procedure to determine the criticality through technical efficiency calculated by the DEA method for all company computers is shown.

To give to fulfill this objective a detailed view to know the "state of the art" on some of the methodologies that revolve around the analysis of the criticality of the equipment as well as the main elements related to methodology literature study is done DEA. Finally, the practical implementation of the proposal, 54 equipment of the company, helped to show that is feasible criticality analysis by the DEA method.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO- REFERENCIAL	3
1.1. Generalidades de la Gestión del mantenimiento.....	3
1.1.1. Etapas de la Gestión del mantenimiento	6
1.2. Análisis de criticidad	8
1.2.1. Métodos para el análisis de criticidad	9
1.3. Generalidades del método DEA	16
1.3.1. Principales modelos del Análisis por envoltura de datos	19
1.3.2. El DEA y el análisis de criticidad del equipamiento	21
1.4. Conclusiones parciales.....	22
CAPÍTULO 2. DETERMINACIÓN DE LA CRITICIDAD DEL EQUIPAMIENTO DE LA UEB FÁBRICA DE FUSIBLES Y DESCONECTIVOS DE VILLA CLARA A TRAVÉS DEL MÉTODO DEA.....	23
2.1. Caracterización general de la empresa	23
2.1.1. Caracterización del Departamento de mantenimiento	25
2.2. Procedimiento para hallar la criticidad del equipamiento productivo de la empresa objeto de estudio a partir de la metodología DEA	27
2.3. Aplicación del procedimiento para hallar la criticidad del equipamiento productivo de la empresa objeto de estudio a partir de la metodología DEA.....	31
2.4. Conclusiones parciales.....	38
CONCLUSIONES GENERALES.....	39
RECOMENDACIONES	40
BIBLIOGRAFÍA.....	41

INTRODUCCIÓN

En los últimos treinta años, el mantenimiento dentro de la industria moderna ha experimentado una serie de profundas transformaciones a nivel tecnológico, económico, social, organizacional y humano. Estos cambios son consecuencia de la actual globalización de los mercados la cual trae como resultado una fuerte competencia que, acompañada por un gran desarrollo tecnológico, determina que este éxito dependa del logro de cada uno y de todos sus componentes. En las cambiantes condiciones del mercado, las empresas requieren de una organización flexible que pueda adaptar rápidamente las nuevas herramientas de gestión, de una manera creativa e innovadora, que permita mantener sus productos y servicios con las especificaciones que exijan el cliente y la competencia (García-Garrido, 2010; Bennett, 2009).

Los continuos avances tecnológicos han permitido el desarrollo de nuevas herramientas de diagnóstico de estado de equipos, potenciando el mantenimiento predictivo y ha permitido la evolución de las filosofías de mantenimiento basadas en la fiabilidad. Esto, además de contribuir a la implantación de un Sistema de Gestión de Mantenimiento representa un paso firme para la introducción de un programa de mejora continua.

Con la nueva orientación del mantenimiento en este siglo, reconocido como un elemento fundamental para incrementar la competitividad industrial, la actividad de mantenimiento ha sufrido una metamorfosis en su concepción del trabajo, ha emergido como una sofisticada disciplina que combina técnicas de gestión, organización y planeamiento con aplicaciones ingenieriles de avanzada, pasando a ser de una actividad reactiva (apaga fuegos) a una concepción con enfoque proactivo, debido a que los paros imprevistos son cada vez más costosos con una considerable dosis de quebranto de credibilidad que se refleja en pérdida de mercado (Acosta-Palmar y Troncoso, 2006).

El papel del mantenimiento es el de incrementar la confiabilidad de los sistemas de producción, al realizar actividades como la planificación, organización, control y ejecución de métodos de conservación de los equipos (García-Garrido, 2003; García-Ahumada, 2001 y Torres, 2003). Este va más allá de las reparaciones; su valor se aprecia en la medida en que estas disminuyan como resultado de un trabajo planificado y sistemático con apoyo y recursos de una política de los directivos. El realizar mantenimiento en nuestros días no figura reparar equipos rotos tan pronto como se pueda, sino mantener el equipo en operación a los niveles especificados. Por lo que un buen mantenimiento comienza en la etapa inicial de todo proyecto y continúa cuando se formaliza la compra de aquellos equipos e instalaciones hasta su posterior montaje; teniendo como máxima prioridad la prevención de fallas y reducción de riesgos de paradas imprevistas.

Ante este panorama, los principios de la “Gestión de Activos basada en Ingeniería de la Confiabilidad Operacional”, representan la única vía efectiva que permite a las empresas, enfrentar de forma

eficiente los retos constantes a los cuales están sometidas las organizaciones de hoy. Una de las principales herramientas de la Ingeniería de Confiabilidad es el análisis de criticidad, aunque también existen otras como el FMEA, el RCA y la RBI.

Las técnicas de análisis de criticidad son herramientas que permiten identificar y jerarquizar por su importancia los activos de una instalación sobre los cuales vale la pena dirigir recursos (humanos, económicos y tecnológicos). En otras palabras, el proceso de análisis de criticidad ayuda a determinar la importancia y las consecuencias de los eventos potenciales de fallos de los sistemas de producción dentro del contexto operacional en el cual se desempeñan.

El escenario considerado para objeto de estudio práctico de la presente investigación es la Unidad Empresarial de Base (UEB) Fábrica de Fusibles y Desconectivos de Villa Clara, en ella se han realizado investigaciones donde se han utilizado diferentes métodos para clasificar el equipamiento, todos con resultados satisfactorios, aunque se conoce la criticidad existe inexistencia de documentación sobre la relación criticidad – eficiencia del equipamiento productivo y se desconocimiento de la factibilidad que pueda tener la metodología Análisis de Envoltura de Datos (DEA) en la determinación de la criticidad del equipamiento productivo. Esta situación, constituye la **situación problemática** que fundamenta la investigación a desarrollar.

A partir de este escenario se traza como **problema de investigación**: ¿Cómo determinar el nivel de criticidad del equipamiento productivo a través del método DEA tomando como referencia métodos tradicionales de clasificación?

En correspondencia a la problema de investigación propuesto y para que contribuyan al desarrollo de la investigación se define como **objetivo general**: determinar la criticidad del equipamiento productivo de la de la Unidad Empresarial de Base (UEB) Fábrica de Fusibles y Desconectivos de Villa Clara a partir del método Análisis de Envoltura de Datos (DEA) tomando como referencia métodos tradicionales de clasificación.

Para alcanzar el objetivo general antes expuesto, se plantean los **objetivos específicos** siguientes:

1. Definir qué método tradicional de determinación de la criticidad del equipamiento productivo utilizar para este fin en la UEB Fábrica de Fusibles y Desconectivos de Villa Clara a través del análisis de la literatura disponible sobre el tema.
2. Determinar la criticidad del equipamiento de la empresa objeto de estudio.

Para dar solución al problema de investigación planteado en la Tesis se acudió a diferentes métodos teóricos y empíricos, además de técnicas y herramientas de la investigación científica, que contribuyeron de una forma sinérgica al desarrollo exitoso de la misma. Entre los métodos aplicados se destacan: los de análisis y síntesis, la dinámica de grupos, el análisis comparativo, las entrevistas y herramientas estadísticas, así como el procesamiento computacional de los resultados, sin excluir el

análisis lógico, la analogía, la reflexión y otros procesos mentales que también le son inherentes a toda actividad de investigación científica.

El **valor teórico** de la investigación se fundamenta en el análisis crítico realizado en torno a la problemática que supone la no existencia de estudios sobre la determinación de la criticidad mediante la eficiencia técnica hallada por el método de análisis de envoltura de datos lo que puede constituir un material de referencia para el estudio de futuras investigaciones relacionadas y en el desarrollo de nuevas herramientas y enfoques para responder al problema científico planteado. Su **valor metodológico** queda determinado por la aplicación sistémica de técnicas que tradicionalmente han sido aplicadas dentro de la Gestión de mantenimiento y de la Programación Lineal, de manera independiente en uno y otro proceso, para obtener entonces una solución que permita una administración coordinada de estos subsistemas. Por último su **valor práctico** radica en la factibilidad y pertinencia demostrada de poder implementar el procedimiento propuesto, obteniendo resultados satisfactorios y de perspectiva alentadora.

La presente investigación ha sido estructurada en dos capítulos. En el primer capítulo se resumen los principales hallazgos en la construcción del marco teórico-referencial de la investigación; en el segundo se presenta la propuesta de solución al problema científico planteado, a través de la propuesta y aplicación de un procedimiento general y sus procedimientos específicos; además, se incluyen un grupo de conclusiones y recomendaciones que resaltan los principales resultados obtenidos en la investigación, así como aquellos aspectos que el autor considera deben ser extendidos como parte de la continuidad científica de la investigación. Finalmente se expone un grupo de anexos de necesaria inclusión para fundamentar, destacar y facilitar la comprensión de los aspectos de mayor complejidad tratados en el cuerpo del documento.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO- REFERENCIAL

El marco teórico referencial de la presente investigación ha sido realizado según el hilo conductor que se muestra en la figura 1.1, donde se brinda un análisis crítico de documentos tanto nacionales como internacionales relacionados con las temáticas que se abordarán en el desarrollo del informe, con vistas a precisar los principales aspectos conceptuales involucrados en la investigación, los cuales constituyen el estado del arte y el estado de la práctica para la realización del mismo, y facilitan el análisis y la comprensión del tema que se desarrolla.

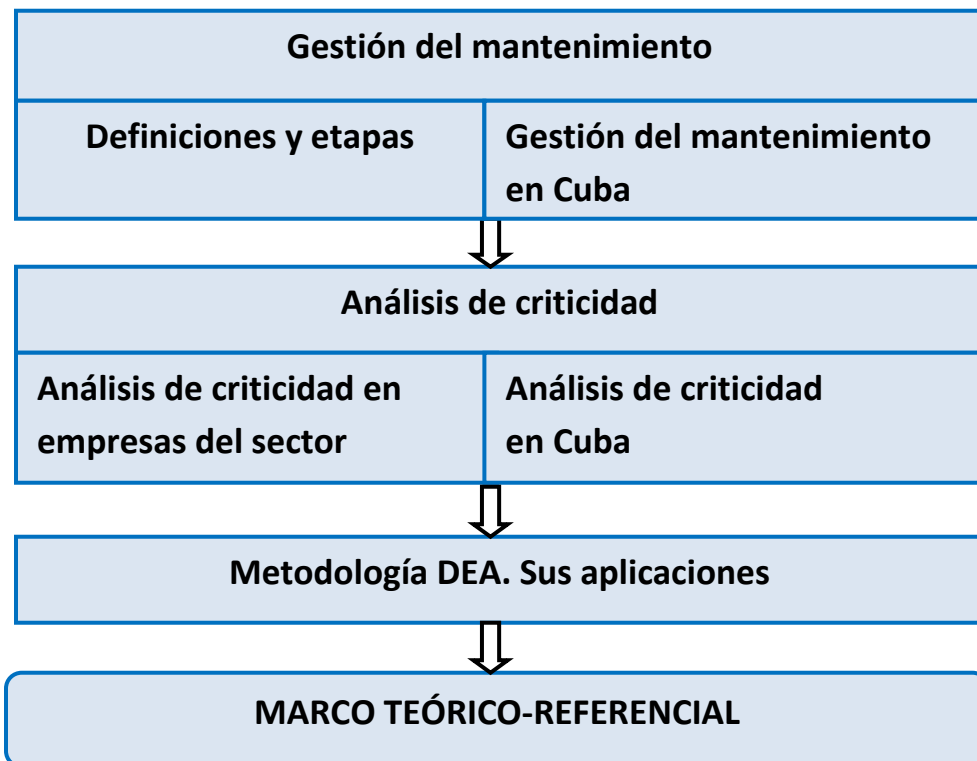


Figura 1.1. Estrategia seguida para la construcción del Marco Teórico- Referencial.

1.1. Generalidades de la Gestión del mantenimiento

En Cuba, antes de 1959 y con la excepción de determinadas industrias, no existía una cultura de mantenimiento, y no fue sino hasta 1961 cuando comenzó a promoverse el respeto hacia esta actividad, a partir de la introducción del Mantenimiento Preventivo Planificado en el Ministerio de Industrias, con la colaboración de algunos especialistas extranjeros amigos de Cuba.

En 1975, el Centro de Servicio Técnico Automotriz (CESETA), publicó el Manual de mantenimiento y reparación de equipos industriales. El objetivo de este manual era guiar la aplicación del Mantenimiento Preventivo Planificado en plantas y talleres, principalmente de la industria mecánica.

En el marco del proceso de institucionalización del país, el primero de diciembre de 1976 se promulgó la Ley No. 1323, Ley de Organización de la Administración Central del Estado, que estableció, entre

las atribuciones y funciones principales del Ministerio de la Industria Sidero-Mecánica, en su artículo 81, inciso ch, "...la elaboración de Normas de Mantenimiento y Explotación para las Máquinas-Herramienta del País". No obstante, ya había sido definido el mantenimiento desde 1978 en la norma cubana (NC 92-10: 78).

En el II Congreso del Partido Comunista de Cuba realizado en 1981, se estableció, un lineamiento para el desarrollo de la industria: "Ejecutar una política sistemática de mantenimiento y reparaciones generales que permitan garantizar o restituir las capacidades potenciales a las unidades..." y, a partir de la política trazada en el país en relación con el mantenimiento, la mayoría de las empresas cubanas asumieron el Sistema de Mantenimiento Preventivo Planificado, conocido por las siglas MPP, adaptándolo a sus características.

En 1996 se realiza un gran avance en la actividad del mantenimiento en el país, este avance está dado por la propuesta realizada por De la Paz Martínez (1996); donde se desarrolla la versión cubana del Sistema Integrado de Mantenimiento, denominado en Cuba Sistema Alternativo de Mantenimiento (SAM) a partir de ese momento se comenzaron a aplicar varios sistemas de mantenimiento, principalmente en plantas productivas del Ministerio de la Industria Ligera.

Más tarde en el año 1999 se empieza a enfocar el mantenimiento desde un punto de vista más gerencial o de gestión en Sánchez-Sánchez (1999), se realiza una contribución al Sistema de Gestión del Mantenimiento en empresas productoras de azúcar crudo con lo que se pretende mejorar la gestión de los activos físico en el Ministerio del Azúcar.

En el año 2001 se realiza un gran aporte a la Gestión del mantenimiento, esta vez desde una óptica poco tratada pero verdaderamente importante, la planificación de los Recursos Humanos en el SAM. Esta aplicación fue efectuada en plantas textiles del Ministerio de la Industria Ligera (De la Paz Martínez, 1996).

Otro avance notable en la Gestión del mantenimiento; se produjo en Borroto-Pentón (2005) fue confeccionado un procedimiento para la realización de la auditoría de Mantenimiento en el Ministerio de Salud Pública específicamente en hospitales de la provincia Villa Clara. Además, como resultado de las auditorías aplicadas se propuso un sistema de mantenimiento especialmente diseñado para hospitales denominado Sistema Alternativo de Mantenimiento en Hospitales (SAMHOS).

En Torres (2005) se propone un enfoque de Gestión del mantenimiento o servicios técnicos en el MINTUR aplicado a los hoteles de Sol y Playa. Esta investigación constituye un paso importante en el desarrollo de la actividad del mantenimiento en el país, pues siempre se habían desarrollado propuestas para enriquecer la gestión en el sector productivo quedando un poco al margen del desarrollo el sector de los servicios.

Alfonso-Llanes (2009) realiza otro aporte en el cual propone un procedimiento para administrar el proceso de tercerización del mantenimiento, cuya aplicación se realizó en empresas del Ministerio de

la Industria Alimentaria (MINAL), del Ministerio del Turismo (MINTUR), y del Ministerio de la Industria Ligera (MINIL), proveyendo de una herramienta al sistema empresarial efectiva para la administración de los procesos de externalización de actividades y funciones de mantenimiento.

En mayo de 2011, en el VI Congreso del Partido, se ponen en vigor los lineamientos que regirán la política económica y social del país, donde se trata el mantenimiento en 16 de ellos.

Analizar la evolución que ha tenido el desarrollo del mantenimiento en Cuba se puede decir que se ha producido un avance significativo, aunque no todas las empresas ya sea de servicio o de producción han adquirido esta cultura sólida respecto a la Gestión del mantenimiento.

En el contexto actual, la Gestión del mantenimiento en un proceso de producción, no se puede limitar sólo a la simple disminución de los fallos a partir de acciones de mantenimiento seleccionadas sobre la base de un registro histórico de fallos. Este concepto ya no tiene vigencia, por lo cual, el rol del mantenimiento en la actualidad puede describirse de las siguientes formas: “Capacidad para preservar la función de los equipos, definiendo y aplicando estrategias efectivas de mantenimientototales como: sustitución, reparación, restauración y renovación, con el fin de minimizar los riesgos que generan los distintos eventos de fallos dentro del contexto operacional y ayudan a maximizar la rentabilidad del negocio” (Woodhouse-Jhon, 1996)

Para el desarrollo óptimo de la presente investigación se partió del análisis conceptual del término mantenimiento, para lo cual existen diferentes definiciones aportadas por autores como: Woodhouse-Jhon (1996); Torres (2005); Tavares (1999); Mora-Gutiérrez (2009); Durán (2000); Fabro (2003); De La Paz Martínez (2011) y Aguilera-Martínez (2001). La investigación se identifica con el concepto presentado por De La Paz Martínez (2011b) que coincide con lo planteado por los autores del Manual de Gestión del Mantenimiento (2012) donde se establece que:

“El mantenimiento es la integración de acciones técnicas, organizativas y económicas, encaminadas a conservar o restablecer el buen estado de los activos físicos, a partir de la observancia y reducción de su desgaste y con el fin de alargar su vida útil económica, con una mayor disponibilidad y confiabilidad, para cumplir con calidad y eficiencia sus funciones, conservando el medio ambiente y la seguridad del personal”.

Varios autores (De La Paz Martínez, 2011a; Crespo-Márquez, 2007; Sotuyo-Blanco, 2001; García-Garrido, 2003; Torres, 2005; Stefano, 2006; Borroto-Pentón, 2005 y Mora-Gutiérrez, 2012) han definido que los objetivos del mantenimiento son:

- Mejorar la disponibilidad de las instalaciones.
- Mejorar la fiabilidad y la calidad del servicio.
- Incrementar la productividad de los recursos.
- Reducir los costos de mantenimiento.
- Aumentar la vida útil económica de los equipos.

- Garantizar la seguridad del personal y de las instalaciones.
- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.

Durante los últimos veinte años, la Gestión del mantenimiento ha cambiado, quizás más que cualquier otra disciplina gerencial. Estos cambios se deben principalmente al enorme aumento en número y variedad de los activos físicos que deben ser mantenidos en todo el mundo, a la elaboración de diseños más complejos, al uso de nuevos métodos de mantenimiento, y a la existencia de una óptica cambiante en la organización de esta actividad y sus responsabilidades (Jeira & Gibson, 2004).

La Gestión del mantenimiento es responsable de armonizar los medios básicos, minimizando los tiempos de parada y los presupuestos de mantenimiento y por esto se afirma que “una adecuada Gestión del mantenimiento en el marco de un desarrollo tecnológico creciente y de una política de personal orientada hacia la calidad, ayuda a mejorar la productividad bajo la forma de un incremento en la rentabilidad” (Espinosa-Fuentes, 2006). Es por esto que debe llevarse a cabo una buena Gestión de mantenimiento para apoyar el proceso decisional de cada organización. Según la ISO 9000:2001, la gestión no es más que el conjunto de actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización.

Otra de las conceptualizaciones brindadas sobre el término de Gestión de mantenimiento es la brindada por Espinosa-Fuentes (2006) donde expone que esta no es más que “las actuaciones con las que la dirección de una organización de mantenimiento sigue una política determinada”. Esta definición implica que debe estar fijada la política, pero además evidencia que debe existir una organización de mantenimiento que lleve a cabo las referidas actuaciones.

El objetivo de la Gestión del mantenimiento es contribuir a maximizar la productividad general de la empresa a través de un óptimo balance entre el costo del factor de disponibilidad del equipamiento y el costo de su indisponibilidad (Montoliu & Kepcia, 1995) referenciados por De La Paz Martínez (2002)

La Gestión del mantenimiento es responsable de armonizar los activos fijos, además de minimizar los tiempos de parada y los costos asociados a los mismos.

1.1.1. Etapas de la Gestión del mantenimiento

La Gestión de mantenimiento abarca el cumplimiento de un conjunto de funciones: la planificación, la organización, la ejecución y el control. A continuación se especifica cada una por separado.

Planificación

La planificación del mantenimiento es el alma de todos los esfuerzos desarrollados en esta función (Tavares, 1999; Tomlinsong, 2007). La planificación, en general, puede considerarse como un sistema de tratamiento de la información, ya que a partir de ciertas entradas, pretende tener una visión del futuro, reflejando a este como una salida en forma de plan (Rodríguez-Machado; Borroto-Pentón & Alfonso-Llanes, 2012).

En esta fase se definen: las acciones de mantenimiento (preventivo, correctivo) a realizar en los equipos o instalaciones, los recursos necesarios (materiales y humanos), y se establece el balance de las cargas de trabajo con las capacidades de medios y hombres para llevarlas a cabo (Yañez-Medina, 2003; Fabro, 2003).

Organización

La organización del mantenimiento se vale de dos fases: la fase organizativa donde se determina la estructura de trabajo, las funciones dentro de esta, las relaciones externas e internas, los procedimientos para el flujo y registro de información y documentación; y la fase preparatoria donde se define la preparación de los recursos (materiales y humanos), la documentación y las instalaciones (Yañez-Medina, 2003; Fabro, 2003; Torres, 2005).

La organización identifica las actividades básicas u orgánicas que se deben ejecutar y organiza todo el trabajo en torno a ellas. Es fundamental para el área de mantenimiento, estudiar en detalle el diseño de su estructura interna y su organigrama. Estos denotan el reconocimiento correspondiente al mantenimiento y su jerarquización dentro del establecimiento; la presencia de profesionales al frente tanto del área como de las diferentes subáreas es parte de esta organización (De la Paz Matínez; Borroto-Pentón; Alfonso-LLanes, 2013).

Ejecución

La esencia de la ejecución es realizar las actividades de mantenimiento de forma efectiva y eficiente, para aumentar la productividad en la gestión y cumplir exitosamente con los programas establecidos (Yañez-Medina, 2003). La ejecución del mantenimiento puede realizarse por medios propios, por contratación de los trabajos a terceros o por la combinación de ambas. La tendencia general es hacia organizaciones de tipo mixto, descentralizadas por sectores (Tavares, 1999; Sotuyo-Blanco, 2001).

Para ejecutar el mantenimiento por medios propios la empresa debe disponer de los recursos (materiales y humanos) que se necesitan para desarrollar las labores y asegurar una adecuada utilización de los mismos (Borroto-Pentón, 2005).

Evaluación y control

El control es el conjunto de actividades tendientes a verificar el desempeño correcto de la preparación, de su realización correcta, el control funcional y la información al sistema; posteriores a la ejecución (Pérez-Jaramillo, 2004).

Cada sistema de mantenimiento incluye un método de control, por lo general expresado en función de tasas, cuotas y razones o índices, para determinar cómo marchan las cosas y por qué marchan, a fin de que permita tomar decisiones (Stefano, 2006; Gusmão, 2001).

El autor de la presente investigación coincide con Larralde Ledo (1994) referenciado en Borroto-Pentón (2005) al plantear que existen diversas formas para realizar la evaluación de la Gestión del mantenimiento. Todas ellas pueden resumirse en dos grandes grupos: medición de resultados a partir

del cálculo y análisis de indicadores de mantenimiento, y valoración del desarrollo mediante control directo, principalmente a través de auditorías.

1.2. Análisis de criticidad

El análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, al crear una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, que dirige el esfuerzo y los recursos hacia las áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional (Christensen, 2006; Alfonso-Llanes, 2009; Moubray, 1997).

Permite generar una lista ponderada desde el elemento más crítico hasta el menos crítico del total del universo analizado diferenciando tres zonas de clasificación: alta criticidad, media criticidad y baja criticidad.

La clasificación de un componente como “crítico” supondrá la exigencia de establecer alguna tarea eficiente de mantenimiento preventivo que permita atajar sus posibles causas de fallo. En la tabla 1.1 se muestran las diferentes clasificaciones del equipamiento propuestas en la literatura consultada.

La criticidad desde el punto de vista de diferentes autores se puede definir de las siguientes maneras: medición relativa de las consecuencias de un modo de fallo y su frecuencia de ocurrencia (Alvarez, 2008).

Por su parte Vaccaro & Andevs (2011) la definen como: característica (cálculo numérico determinista) de un sistema, que representa el impacto de la falla en cuanto a seguridad, ambiente o producción del proceso al cual pertenece; evalúa la flexibilidad operacional, costos de reparación-mantenimiento y confiabilidad. Esta característica puede ubicarse en bandas alta, media y baja).

Desde el punto de vista matemático la criticidad se puede expresar como: el producto de la frecuencia por consecuencia, donde la frecuencia está asociada al número de eventos o fallas que presenta el sistema o proceso evaluado en un período de tiempo y la consecuencia está referida con: el impacto y flexibilidad operacional, los costos de reparación y los impactos en seguridad y ambiente (Del-Castillo, 2009; Montaña, 2006; Sierra, 2011).

La criticidad tiene una relación directa con los parámetros económicos de cualquier empresa y está basada en riesgo. La escasez actual de los recursos hace necesario lograr la mayor efectividad que permita dirigir los esfuerzos hacia aquellos puntos donde se logre una relación máxima entre los resultados obtenidos y los recursos utilizados.

El análisis de criticidad permite la identificación de esos puntos más críticos estableciendo un grado de jerarquía o prioridad de los activos de una empresa o planta. Un modelo básico de análisis de criticidad es equivalente al mostrado en la figura 1.2.

Tabla 1.1. Clasificación del equipamiento

Fuente	Clasificación
MINBAS [1986]	Fundamentales para la producción No fundamentales en la producción
Ochoa Crespo [1994]	Máxima categoría Categoría media Categoría regular Categoría mínima
ViniciusLucatelli y García Ojeda [1995]	De soporte directo a la vida Con sustitución periódica y obligatoria de piezas Que ofrece altos niveles de energía Con intervalo de mantenimiento normalizado
De la Paz Martínez [1996]	Muy importantes o fundamentales Normales o convencionales Auxiliares
González Danger y Hechavarría Pierre [2002] Torres [2005]	Importancia A Importancia B Importancia C
Espinosa Fuentes [2006]	Crítico Semicrítico No crítico
Torres [1997] Huerta Mendoza [2001] Yañez Medina [2004] Cardoso de Morais [2004] BorotoPentón [2005] Christensen [2006] García Garrido [2009]	Alta criticidad (clase A) Mediana criticidad o importantes (Clase B) Baja criticidad o prescindibles (Clase C)
Rivera Rubio [2011]	Vitales Importantes Triviales
Documentos Técnicos OMS [2012]	Urgentes por emergencia Urgentes Regulares Pospuestos

Fuente: Adaptada de Alfonso Llanes (2009).

1.2.1. Métodos para el análisis de criticidad

Las técnicas de análisis de criticidad son herramientas que permiten identificar y jerarquizar por su importancia los activos de una instalación sobre los cuales vale la pena dirigir recursos (humanos, económicos y tecnológicos). En otras palabras, el proceso de análisis de criticidad ayuda a determinar la importancia y las consecuencias de los eventos potenciales de fallos de los sistemas de producción dentro del contexto operacional en el cual se desempeñan (Woodhouse-Jhon, 1996).

El método clásico de evaluación de la criticidad de los componentes de un sistema se realiza normalmente mediante la técnica de Análisis de los Modos de Fallo y sus Efectos (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) y, en otros casos, mediante la herramienta de Análisis de Modos de Fallo y

Efectos Críticos (FailureModesEffects and CriticalityAnalysis, FMECA) (Fernández-Pérez, 2003; García-González-Quijano, 2004; Altamirano, 2009; Mora, 2006; Bloomquist, 2012), aunque existen otros métodos o enfoques para realizar el análisis de criticidad (ver tabla 1.2).



Figura 1.2. Modelo básico de criticidad. Fuente:(Crespo-Márquez, 2007).

Tabla 1.2. Técnicas para análisis de criticidad

Fuente	Técnica
Crespo, 2007	Método del flujograma de análisis de criticidad
Woodhouse, 1996	Modelo de criticidad semicuantitativo “CTR” (Criticidad total por riesgo)
EnapSipetrol, 2008	Modelo de criticidad semicuantitativo “MCR” (Matriz de criticidad por riesgo)
Saaty,1990	Modelo de criticidad cuantitativo “AHP” (Proceso de análisis jerárquico)
Metodología Ciliberti	Método de criticidad de Ciliberti
DRAFT MIL-STD-882D	Estándar militar MIL-STD-882D
R2M S.A	Método de los puntos
Criticality Based Maintenance, Berwanger, Incorporated.	Método de mantenimiento basado en criticidad
Norzok Z-008, 2001	Criticidad para propósitos de mantenimiento Norsok Standard Z-008
Norma API 581	Criticidad basada en API 581
Crespo Márquez, 2007	Método del flujograma
Crespo Márquez, 2007	Modelo de criticidad semicuantitativo “CTR”
Crespo Márquez, 2007	Modelo de criticidad semicuantitativo “MCR”

La manera generalmente utilizada para realizar la jerarquización de los elementos dentro de un sistema productivo o de servicios es el empleo de un grupo de factores, criterios o variables que caractericen su contexto operacional y valoren las consecuencias que sobre cada una de ellas genera el modo de fallo que se presente. En el anexo 1 se muestra un resumen de las propuestas realizadas por diferentes autores e instituciones concernientes a la realización del análisis de criticidad. Existe un grupo de criterios que son comunes a la mayoría de las propuestas, dígame: seguridad, impacto ambiental, costo de reparación, pérdida de producción y tiempo de reparación (Alfonso-Llanes, 2009). Algunos de estos métodos mencionados en la tabla son:

Método de Ciliberti

Este enfoque combina dos matrices de criticidad; una construida desde la óptica de seguridad de los procesos y otra desde el impacto en producción. Ambas matrices se integran en una matriz de criticidad global, para obtener la criticidad total del equipo bajo análisis. Es uno de los métodos más completo, ya que considera las probabilidades y consecuencias en las áreas de SHA y producción.

El análisis consiste en la determinación de los valores de consecuencia y probabilidad para seguridad, higiene y ambiente, los cuales se introducen en la matriz de SHA para determinar su nivel de riesgo, luego se grafican en la matriz de procesos los valores de consecuencias y probabilidad, para obtener el nivel de riesgo para procesos, posteriormente estos niveles de riesgos se grafican en la matriz de riesgo final y se obtiene el nivel de criticidad del activo bajo análisis.

Mantenimiento Basado en Criticidad

Proceso de análisis de criticidad muy similar a la metodología HAZOP (Hazard Analysis Study) para priorizar el mantenimiento de equipo para las industrias del gas y petróleo y las industrias de procesamiento de producto petroquímico. Este método (CBM) sopesa equitativamente el impacto en el proceso y seguridad para establecer la criticidad del activo. Este enfoque optimiza la eficacia de programas de integridad mecánica enfocados en los activos más importantes o críticos.

Este método emplea algunos criterios particulares para determinar el nivel de criticidad, como por ejemplo, disminuye el nivel de criticidad a uno menor si el equipo cuenta con un respaldo o equipo en espera.

Todos los equipos del proceso se evalúan con énfasis igual en el peligro (salud, seguridad, y ambiental) y criterios de proceso. Cada equipo recibe un grado compuesto basado en las entradas del peligro y del proceso. El grado compuesto se utiliza para establecer una graduación de la criticidad del proceso y del peligro (PHCR) para ese equipo. El valor de PHCR es una graduación relativa en una jerarquía total de la criticidad que se utilice para determinar las prioridades para los programas de mantenimiento, las inspecciones y las reparaciones. La matriz de la criticidad del proceso y del peligro se muestra en la figura 1.3.

Matriz de graduación de la criticidad del proceso y del Peligro						
P C R	HCR					
		4	3	2	1	0
	4	A44	A34	A24	A14	A04
	3	A43	B33	B23	B13	B03
	2	A42	B32	C22	C12	C02
	1	A41	B31	C21	D11	D01
	0	A40	B30	C20	D10	D00

Figura 1.3. Mantenimiento Basado en Criticidad. Fuente: Crespo Márquez (2007).

Análisis de Criticidad Basada en API 581

Este análisis de criticidad se basa en la aplicación de la etapa inicial del estudio de IBR (Inspección Basada en Riesgo), fundamentada en las normativas API RP-580 y API PUB-581, esta metodología del IBR permite establecer frecuencias y alcance de las inspecciones con base en la combinación del comportamiento histórico, modos de degradación o deterioro, características de diseño, condiciones de operación, mantenimiento, inspección y políticas gerenciales tomando en cuenta al mismo tiempo la calidad y efectividad de la inspección, así como las consecuencias asociadas a las potenciales fallas.

Esta metodología especial de análisis de criticidad para equipos estáticos se basa en la matriz de riesgo de la Norma API 581, y solo aplica aquellos equipos sometidos a los mecanismos de deterioros como corrosión. Gráficamente, esta metodología permite la ubicación del nivel de riesgo de los equipos analizados en una matriz de 5 x 5 que presenta cuatro niveles de clasificación de riesgo que son: riesgo bajo representado típicamente en color blanco o verde, riesgo medio presentado en amarillo, riesgo medio – alto graficado en naranja y alto riesgo mostrado en rojo, como se muestra en la figura 1.4.

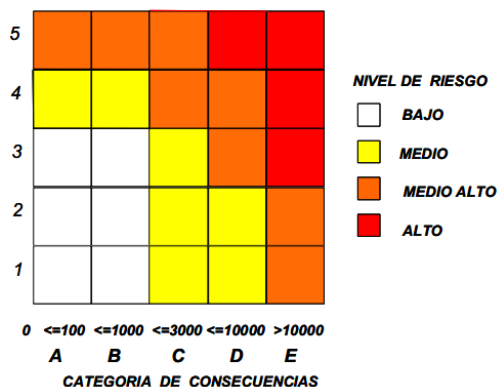


Figura 1.4. Matriz de Riesgo según IBR. Fuente: Crespo Márquez (2007).

Estos cálculos son bastante más detallados y exhaustivos que los realizados para las metodologías de criticidad previamente expuestas y los procedimientos para realizarlos están contenidos las Normativas API 580 y 581.

Criticidad Basada en NORSOK STANDARD Z-008

El propósito del estándar NORSOK Z-008 es mucho más amplio que el de las metodologías de criticidad previamente expuestas, ya que no solo permite establecer las criticidades de los componentes de un sistema de producción, sino que dentro de la misma norma incluye un procedimiento para la optimización de programas de mantenimiento para facilidades nuevas y en servicio, ubicadas en tierra y costa afuera, considerando los riesgos relacionados con personal, ambiente, pérdida de producción y costos económicos directos (todos los costos aparte de los costos de la pérdida de producción).

El objetivo principal de la norma NORSOK es establecer las bases para el diseño y optimización de los programas de mantenimiento para plantas de petróleo y gas nuevas y en servicio, basados en la criticidad de sus componentes, considerando los riesgos relacionados con: personal, ambiente, pérdida de producción y costos económicos directos.

El estándar NORSOK Z-008 aplica para equipos mecánicos (estáticos y rotativos), instrumentos y equipos eléctricos. Están excluidas del alcance de esta norma las estructuras de carga rodante, estructuras flotantes, raisers y gasoductos/oleoductos.

Método del flujograma

Este método fue propuesto por uno de los autores mencionados anteriormente (Crespo-Márquez, 2007), en el mismo se presenta una técnica que hace referencia a un análisis puramente cualitativo sobre la jerarquía de equipos de producción. Como se puede observar en la figura 1.5 el resultado del proceso es una clasificación de los equipos en tres categorías: A, B, C siendo los equipos del tipo A los de mayor prioridad. Para llegar a esa clasificación final se procede de forma secuencial a realizar una serie de preguntas al equipo natural de trabajo conformado en la empresa para tal fin. La secuencia marca la importancia que da el equipo de trabajo a cada atributo que se analiza a la hora de establecer la prioridad del mismo. De alguna forma, el orden en la secuencia marca el peso que se le da en su gestión a cada atributo.

De cada pregunta existen tres respuestas posibles A, B ó C que sirven para caracterizar el equipo.

Modelo de criticidad semicuantitativo "CTR" (Criticidad Total por Riesgo)

Este modelo constituye un proceso de análisis semicuantitativo soportado en el concepto de riesgo, entendido como la consecuencia de multiplicar la frecuencia de un fallo por la severidad del mismo. Este método ha sido ampliamente desarrollado por consultoras y empresas internacionales y adaptadas a un número importante de industrias.

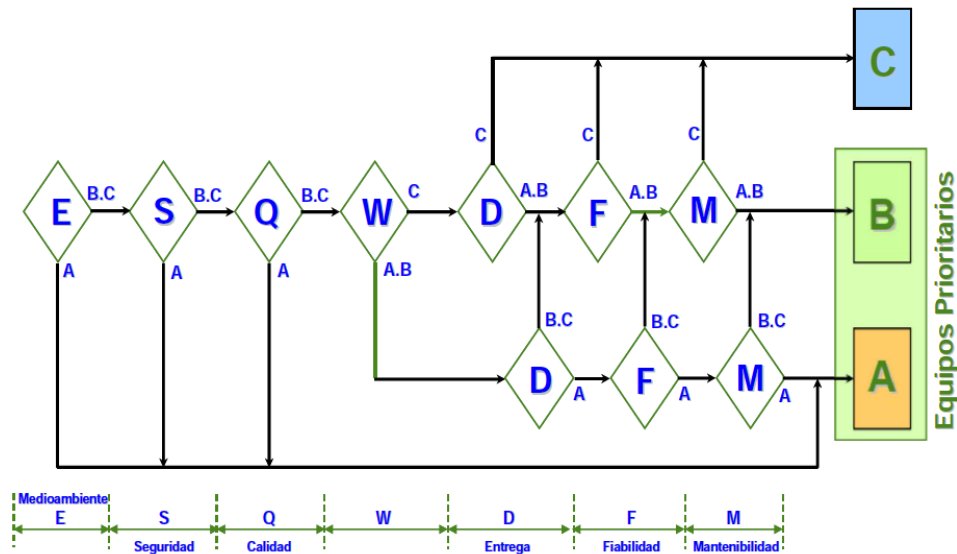


Figura 1.5. Modelo del flujograma de criticidad. Fuente: Parra Márquez y Crespo Márquez (2012).

En la figura 1.6 se muestra la matriz de criticidad propuesta por el modelo CTR donde se muestran las áreas que permite jerarquizar por el mismo.

- Área de sistemas No Criticidad (NC)
- Área de sistemas de Media Criticidad (MC)
- Área de sistemas Críticos (C)

FRECUENCIA	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		10	20	30	40	50
		CONSECUENCIA				

Figura 1.6. Matriz de criticidad propuesta por el modelo CTR. Fuente: Parra Márquez y Crespo Márquez (2012).

Modelo de criticidad semicuantitativo "MCR" (Matriz de Criticidad por Riesgo)

Este modelo toma como referencia el método MCR diseñado para los activos de producción Off-Shore del área de Magallanes, elaborado por la ENAP SIPETROL; este modelo está basado en la estimación del factor riesgo. En la figura 1.7 se muestra la matriz propuesta por este modelo donde se muestran las zonas de criticidad siguientes:

B = Baja criticidad

M = Media criticidad

A = Alta Criticidad

MA = Muy Alta criticidad

Frecuencia	5	A	MA	MA	MA	MA
	4	A	A	A	A	MA
	3	M	M	M	A	MA
	2	B	B	B	M	M
	1	B	B	B	M	M
		1	2	3	4	5
Consecuencias						

Figura 1.7. Matriz de criticidad propuesta por el modelo MCR. Fuente: Parra Márquez y Crespo Márquez (2012).

Modelo de criticidad cuantitativo "AHP" (Analytic Hierarchy Process)

La metodología AHP es una poderosa y flexible herramienta de toma de decisiones multicriterio, utilizada en problemas en los cuales necesitan evaluarse aspectos tanto cualitativos como cuantitativos. La técnica AHP ayuda a los analistas a organizar los aspectos críticos de un problema en una estructura jerárquica similar a la estructura de un árbol familiar, reduciendo las decisiones complejas a una serie de comparaciones que permiten la jerarquización de diferentes aspectos (criterios) evaluados.

1.2.2. El análisis de criticidad en Cuba

Durante los últimos 20 años de servicios científico técnicos prestados por el grupo de análisis de riesgo y confiabilidad de Cuba, a la par de la promoción de los servicios y la capacitación, se fue desarrollando el nivel científico del equipo con la formación de maestrantes y doctores en ciencias técnicas, así como la creación de nuevas metodologías y herramientas en frentes como el de optimización del mantenimiento y los monitores de riesgo, para ampliar el perfil de servicios y garantizarlos.

Entre los servicios científicos técnicos más destacados se encuentran los realizados a instalaciones nucleares como es, las Centrales Diesel Eléctricas (CDE) de Cayo Coco y Cayo Guillermo en Ciego de Ávila donde se realizó un análisis de referencia que incluyó la evaluación de riesgos tecnológicos e informáticos, fueron empleadas técnicas de análisis cualitativas, tipo listas de chequeo, y semicuantitativas, tipo Análisis de Criticidad de Modos y Efectos de Fallos (FMECA), las cuales han sido automatizadas posteriormente a través del código ASeC (Análisis de Seguridad mediante Técnicas de Evaluación Cualitativa).

El estudio y análisis de los modelos de criticidad en plantas y empresas de diferentes países, así como en empresas e instalaciones industriales en Cuba; se puede decir que todas parten de los criterios referenciados Del Castillo (2009), estos incluyen los modelos de análisis de criticidad del parque de

equipos especiales de aeropuertos y el de análisis de criticidad de los subsistemas objetos de mantenimiento en la instalación hotelera NH Parque Central, empleando como instrumento en la mayoría de los casos las entrevistas y encuestas a expertos para determinar las variables o términos de los modelos matemáticos, a aprovechando las experiencias y vivencias de los especialistas en cada planta, permitiendo de esta manera la obtención de los modelos que respondan con mayor exactitud a las características propias y específicas de las mismas.

Uno de los estudios realizados fue la propuesta de un modelo para el análisis de criticidad en plantas de productos biológicos, en el centro de estudios en Ingeniería de Mantenimiento del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, en este estudio se propone un procedimiento para verificar la factibilidad de aplicación de una metodología para realizar el análisis de criticidad y complejidad y así priorizar una atención especial a la gama de activos que intervienen en el proceso productivo de las plantas de bioproductos y mejorar la confiabilidad de estos activos, acorde a las nuevas tendencias en el mantenimiento. Para ello se define una instalación típica, se determinan los indicadores propios de estas plantas a tener en cuenta para el cálculo de criticidad y complejidad.

El resultado que se obtuvieron en el estudio es una lista jerarquizada de los equipos a partir de la comparación, a través de una matriz, entre los criterios que intervienen en el índice de criticidad y el de complejidad de cada activo, dados los valores de ponderaciones obtenidos, mediante la realización de encuestas a ingenieros y especialistas de vasta experiencia en el tema. El modelo fue validado utilizando el método de consulta a especialistas obteniéndose resultados satisfactorios.

Otro estudio realizado fue análisis de criticidad de grupos electrógenos, que tuvo como objetivo la obtención del un modelo matemático para el análisis de criticidad que permita la clasificación jerarquizada de los sistemas, subsistemas y equipos en el proceso de generación de electricidad a partir de los grupos electrógenos de los emplazamientos de tecnología fuel-oil. Se desarrolló un instrumento a partir del criterio de expertos para determinar las variables a considerar en el modelo de criticidad y de complejidad, resultando como variables a analizar: frecuencia de fallo, tiempo promedio para reparar, impacto sobre la producción, incumplimiento con el objeto social, redundancia, costos de reparación, impacto al medio ambiente, impacto a la salud y seguridad personal y detectabilidad. El modelo obtenido se aplica a varias plantas de grupos electrógenos con resultados satisfactorios, mostrando evidencia de su validez, y permitiendo jerarquizar los subsistemas de acuerdo con la criticidad y complejidad de los mismos.

1.3. Generalidades del método DEA

El método de Análisis por Envoltura de Datos (DEA) no es más que una técnica, basada en la programación matemática para medir eficiencia relativa de unidades de decisión y control que tienen salidas y aportes múltiples, es una alternativa no paramétrica para calcular la productividad total de los factores basado en el trabajo seminal de Farrell (1957) e introducido formalmente por Charnes,

Cooper y Rhodes (1978). Que dada una DMU, nos permite identificar aquellas otras que nos sirven para construir la DMU “virtual” con la que compararemos la DMU bajo análisis. Decimos que es una técnica general, porque es posible trabajar en contextos de múltiples recursos y productos.

DEA es una metodología que se utiliza para analizar la eficiencia relativa de varias unidades de negocio que participan en el análisis comparativo (una unidad de negocio se refiere a unidades que tienen características semejantes entre sí, que tienen objetivos y funciones similares). La metodología utiliza técnicas de programación lineal y principios de análisis de frontera para analizar la eficiencia relativa de dichas unidades de negocio, donde la presencia de múltiples entradas y múltiples salidas hace que una comparación sea muy difícil de realizar.

Antes de entrar en detalles sobre la metodología propiamente dicha, conviene repasar las nociones de eficiencia productiva y el cálculo de los índices de eficiencia técnica, tal como los plantea Farrell (1957). La propuesta es visualizar a la eficiencia desde una perspectiva real no ideal, donde cada unidad de producción sea evaluada en relación con otras tomadas de un grupo representativo y comparable. Así, las medidas de eficiencia serían relativas y no absolutas, donde el valor alcanzado por una determinada unidad productiva, corresponda a una expresión de la desviación observada respecto a aquéllas consideradas como más eficientes dada la información disponible. En este sentido, la metodología que propone es una técnica basada en el concepto de “benchmark” o referenciación.

Sea un conjunto más o menos extenso de unidades productivas comparables entre sí con la particularidad de que emplean el mismo tipo de recursos o factores para producir un conjunto de productos similares o equivalentes. Para alcanzar un mayor nivel de generalidad, las denominamos como “Unidades de toma de Decisión” (DMU: “Decision Making Units”). Entonces, es posible definir tres medidas de eficiencia:

Eficiencia técnica: refleja la habilidad de la DMU de obtener el máximo nivel de producción dados ciertos niveles en el uso de los recursos o factores.

Eficiencias de asignación: refleja la habilidad de la DMU de usar los recursos o factores en proporciones óptimas (dados sus precios).

Eficiencias de escala: se manifiestan según la naturaleza de los rendimientos a escala con que opera la DMU.

Es importante destacar, que un aspecto interesante de todas las medidas de eficiencia tal como las trabaja Farrell es que son invariantes y no dependen de la unidad de medida ya que se calculan como cocientes de distancias al origen de magnitudes con similares sistemas de medida.

La propuesta que sugiere es recurrir al uso de cónicas ó poligonales convexas para construir las isocuantas o fronteras, en forma no paramétrica, y sólo partiendo de la información disponible acerca

del comportamiento de numerosas DMU comparables, muchas de las cuales serán más eficientes que otras.

Para la concepción del modelo matemático del DEA, sus creadores basaron las investigaciones en el planteamiento realizado por Farrell (1957) de que la productividad de una determinada unidad productiva se define como la relación existente entre los resultados que obtiene y los recursos que se emplean en su fabricación, como una forma de medir el aprovechamiento de dichos recursos. Para el caso de una sola salida y una sola entrada:

$$Productividad = \frac{Produccióncreada}{Recursoconsumido} = \frac{Salidas}{Entradas} \quad (1.1)$$

Como resulta evidente pensar es improbable desarrollar un modelo con una sola entrada y una única salida. Para el caso de varias entradas y varias salidas la expresión matemática que se propone es:

$$Productividad = \frac{Sumaponderadadesalidas}{Sumaponderadadeentradas} \quad (1.2)$$

Villa-Caro (2003)expone que si se denota como X_{ij} la cantidad de entrada o recurso ‘i’ utilizado por la unidad ‘j’, Y_{kj} la cantidad de salida o resultado ‘k’ que produce la misma unidad, u_{ij} y v_{kj} los pesos correspondientes a cada entrada y salida, m el número total de entradas consideradas, y s el número de salidas de la unidad, entonces se obtienen las expresiones (1.3) y (1.4), las cuales definen la productividad que se observa en la fórmula (1.5), donde se alcanzan resultados de productividad de cada DMU por separado, lo que no resulta significativo por lo que aparece el término “eficiencia relativa”, que queda expresado en la ecuación (1.6), para establecer una comparación entre las DMUs estudiadas.

$$Entradavirtualj = \sum_{i=0}^m u_{ij} X_{ij} \quad (1.3)$$

$$Salidavirtualj = \sum_{k=1}^s v_{kj} Y_{kj} \quad (1.4)$$

$$Productividad = \frac{\sum_{k=1}^s v_{kj} Y_{kj}}{\sum_{i=0}^m u_{ij} X_{ij}} \quad (1.5)$$

$$Eficienciaj = \frac{Productividadj}{Productivado} = \frac{SalidaVirtualj/EntradaVirtualj}{SalidaVirtual0/EntradaVirtual0} \quad (1.6)$$

Meng et al. (2012) y Olanrewaju et al. (2012) coinciden con Charnes et al. (1981) en que una manera sencilla de comprender el funcionamiento del DEA es viéndolo como un principio alternativo para extraer información sobre una población de observaciones. En contraste con los enfoques paramétricos, cuyo objeto es optimizar un plano único a través de la regresión de los datos, DEA optimiza la eficiencia en cada DMU. Tanto en la programación matemática paramétrica y no paramétrica el camino es utilizar toda la información contenida en los datos.

Charnes, Cooper, Lewin & Seiford (1994) explican algunas de las ventajas que tiene el DEA:

- DEA no requiere la imposición de una función específica de producción que relacione las variables independientes con las variables dependientes. DEA asigna matemáticamente valores ponderados para las variables de entrada y de salida, lo que evita que un “experto” asigne los valores ponderados (Nyhan & Martin, 1999).
- DEA realiza comparaciones simultáneas de procesos con múltiples variables de entradas y salidas y produce una “eficiencia” agregada para cada institución.
- DEA puede calcular la cantidad de recursos que se pueden ahorrar, o la cantidad de recursos adicionales para aquellas instituciones que no son eficientes. DEA se puede utilizar para determinar la eficiencia técnica y/o económica, si la información es proporcionada.

Sin embargo, también DEA tiene sus limitantes, entre ellas están.

- DEA no tiene indicadores para medir error.
- DEA no es apropiado para probar hipótesis.

Es importante mencionar que DEA ofrece una considerable flexibilidad al seleccionar las variables de entrada y de salida, ya que pueden ser variables continuas, ordinales, e incluso variables categóricas. Inclusive para modelos de DEA más complejos, las variables de entrada pueden ser catalogadas como controlables e incontrolables por parte de la administración.

1.3.1. Principales modelos del Análisis por envoltura de datos

Como ha ocurrido con otras metodologías de investigación de operaciones, el desarrollo del DEA ha evolucionado a través de los problemas que fueron surgiendo en el proceso de aplicación del método. Fue entonces que se produjeron varias extensiones del DEA, evidenciadas en los diversos modelos y aplicaciones de esta herramienta que han tenido lugar. Estos modelos se dividen formando dos grandes grupos: los retornos de escalas constantes y los retornos de escalas variables, donde juegan un papel fundamental los términos de orientación de entrada y orientación de salida.

La orientación de entrada (input orientation) se refiere al hecho de que una unidad alcance la productividad de la unidad de referencia a costa de reducir la cantidad de recursos que consume. Por otra parte la orientación de salida (outputs orientation) hace referencia al hecho de que una unidad obtenga la productividad de la unidad con la que se compara a través del aumento de la cantidad que produce.

Villa-Caro (2003) reconoce por retornos con escalas constantes (CRS, por sus siglas en inglés) al hecho de que cualquier unidad pueda alcanzar la productividad de las unidades eficientes, y por lo tanto ser la de mayor productividad, independientemente de su tamaño. Por ende la eficiencia global es la que se calcula durante el estudio, ya que todas las DMUs tienen como unidades de referencia a las de mayor productividad de entre todas las posibles, y se consideran posibles todas las unidades pertenecientes a:

$$T_{CRS} = \{(\vec{x}, \vec{y}) : \exists \vec{\lambda} \geq 0, \vec{\lambda}X \leq \vec{x}; \vec{\lambda}Y \geq \vec{y}\} \quad (1.7)$$

donde $\vec{\lambda}$ es un vector con tantas componentes como DMUs tenga el problema. Por otra parte X y Y son respectivamente las matrices de entradas y salidas observadas en las unidades del problema. Ambas matrices tienen tantas filas como DMUs. Para X existen tantas columnas como entradas se consideren en el problema. De igual forma para la matriz Y hay tantas columnas como salidas.

Charnes et al. (1981) señalan que entre sus principales métodos se encuentran:

- el Modelo Ratio, el cual consiste en la resolución de problemas de maximización correspondientes a cada una de las DMUs cuya eficiencia se quiere evaluar. La función objetivo elige los pesos que hacen máxima la eficiencia de la DMU que se estudia. Sin embargo el autor explica que el nombre ratio proviene del hecho de que la función objetivo es un cociente, lo que complica la resolución pues no es un problema lineal.
- CCR- INPUT (CCR se corresponde con las iniciales de sus autores Charnes, Cooper y Rhodes): el cual resuelve las complicaciones del método anterior pues, para convertir la función objetivo en lineal y eliminar los cocientes, este método opera manteniendo constantes las salidas y variando las entradas de modo tal que se logre maximizar la eficiencia y, por ende, la productividad.
- CCR-OUTPUT: este modelo opera de forma similar al anterior, solo que en este caso, las salidas variarán en búsqueda de la optimización de la eficiencia mientras las entradas se mantendrán constantes.

Yadav et al. (2013) consideran además la existencia de retornos de escalas variables (VRS por sus siglas en inglés) cuando existen unidades con tamaños diferentes al de las unidades reconocidas como eficientes que sean incapaces de alcanzar la productividad de estas. Entonces obtiene la ecuación $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$, localizando la diferencia de este con los retornos de escalas constantes, pues en este caso las componentes del vector $\vec{\lambda}$ deben sumar la unidad, obteniendo en estos casos, la eficiencia técnica. Esto traduce la fórmula (1.7) de los retornos de escalas constantes en la que sigue:

$$T_{VRS} = \{(\vec{x}, \vec{y}) : \exists \vec{\lambda} \geq 0, \vec{\lambda}X \leq \vec{x}; \vec{\lambda}Y \geq \vec{y}; \vec{\lambda}\vec{e}^T = 1\} \quad (1.8)$$

Banker et al. (1989) reconocen que entre los principales modelos con retornos de escalas variables se pueden observar:

- BCC-INPUT y BBC-OUTPUT (BCC corresponde con las iniciales de sus autores Banker, Charnes y Cooper): estos modelos consisten en, utilizando el Modelo ratio linealizado, introducir restricciones que indiquen que cada DMU debe ser comparada solo con aquellas de su tamaño y no con todas las unidades que tenga el problema con orientaciones de entradas y salidas respectivamente.
- Modelo aditivo: este modelo no soluciona los problemas mediante la proyección radial de las unidades sobre la frontera eficiente (aumento radial de salidas o disminución radial de entradas), sino

que efectúa una proyección rectangular de las DMUs, o sea, este modelo no tiene en cuenta si existe orientaciones de entradas o salidas, solo opera con el hecho de que las holguras deben ser maximizadas.

1.3.2. El DEA y el análisis de criticidad del equipamiento

Debido a los desarrollos llevados a cabo en los últimos años, el propósito, aplicaciones y perspectivas del futuro de DEA se han extendido más allá del concepto inicial. DEA y sus aplicaciones facilitan un nuevo enfoque para analizar y organizar datos. Así, ha llegado a ser una alternativa y un complemento a los análisis tradicionales de tendencias centrales aportando, igualmente, un nuevo punto de vista para los análisis de coste-beneficio, estimación de fronteras, diseño de estrategias, aprovechamiento de características de los elementos punteros e inducción de teorías a partir de observaciones externas.

Desde su origen en 1978 las ventajas evidentes del DEA llevaron a estudios e investigadores a emplear esta herramienta para medir el rendimiento de innumerables actividades. Los ejemplos incluyen desde el desempeño del tren (Yu & Lin, 2008) hasta la evaluación de los logros olímpicos (Li et al., 2008). Algunas otras aplicaciones del Análisis por envoltura de datos en diversos sectores de la economía mundial son medición de la eficiencia a los municipios de Asturias en el reciclado de vidrio, también se han realizado estudios en organizaciones dependientes de la administración pública tales como departamentos universitarios, estaciones de policía, sistemas hospitalarios y por supuesto en organizaciones de tipo privada, aunque no se evidencia la realización de ningún estudio que trate sobre el análisis de criticidad y el DEA.

La metodología DEA ha sido empleada de diferentes formas, Arieu (2005) publica un artículo dedicado a identificar el nivel de eficiencia comparativa para 14 terminales de granos argentinos, localizados en su costa atlántica y sobre el Río Paraná, obtenidas con aplicación del Análisis Envoltente de Datos (DEA), un método basado en la programación lineal. El papel muestra que la eficiencia global de las terminales de Bahía Blanca es suficientemente buena, una de ellas (Toepfer) situándose al más alto nivel nacional, es comparable con ACA Necochea, Vicentín y Punta Alvear, localizadas en otras regiones de Argentina.

En el sector energético, específicamente en el análisis de las emisiones de CO₂ Ricardo Schuschny (2007) presenta un ejemplo de aplicación en el que se analiza el desempeño energético de 37 países de la región de América Latina y el Caribe. La investigación empírica se basa en el uso de cuatro indicadores que dan cuenta por un lado de la actividad económica, la intensidad de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y el consumo de energía basado en el uso de fuentes fósiles o limpias y alternativas.

También en la evaluación de la eficiencia económica en escuelas Miranda y Araya (2003) realizan una investigación cuyo objetivo es proponer una metodología no paramétrica a través del Análisis

Envolvente de Datos (DEA), herramienta que posibilita la valoración de la eficiencia técnica en las diferentes escuelas rurales que formaron parte del Programa de Mejoramiento de la Calidad y la Equidad de la Educación (MECE/BASICA/RURAL). Esta metodología también se aplicó en la determinación de la eficiencia de actividades turísticas Montes de Oca Quiñones (2009).

1.4. Conclusiones parciales

1. La metodología DEA ha sido empleada para evaluar la eficiencia aplicada a un amplio número de funciones empresariales; sin embargo, no se ha encontrado, en la literatura consultada, ninguna aplicación asociada a la Gestión de mantenimiento.
2. El análisis de criticidad se encarga de establecer una jerarquía de actividades, procesos, sistemas y equipos; por su parte la metodología DEA se encarga de determinar la eficiencia de los mismos a partir de un grupo de variables de entrada y salida. Sin embargo, existe desconocimiento sobre la aplicación de la técnica DEA a la clasificación del equipamiento productivo en una empresa.

CAPÍTULO 2. DETERMINACIÓN DE LA CRITICIDAD DEL EQUIPAMIENTO DE LA UEB FÁBRICA DE FUSIBLES Y DESCONECTIVOS DE VILLA CLARA A TRAVÉS DEL MÉTODO DEA

En el presente capítulo, se toma como punto de partida el problema de investigación planteado y para dar continuidad a las conclusiones parciales derivadas de la construcción del marco teórico-referencial de la investigación, se presenta la propuesta de un procedimiento general por el cual se va a determinar la criticidad del equipamiento a través del método DEA y tomando como referencia la clasificación obtenida por un método tradicional.

2.1. Caracterización general de la empresa

El escenario considerado para la comprobación de la hipótesis de la investigación, constituye la Unidad Empresarial de Base (UEB) Fábrica de Fusibles y Desconectivos de Villa Clara creada desde año 2000 por la Empresa de Grupos Electrónicos y Servicios Eléctricos (GEYSE) y desde el 01 de abril del año 2007 pertenece a la Empresa de Producciones Electromecánicas (EPE), al Ministerio de Energía y Minas (MINEM). Su sede principal se encuentra ubicada en la carretera a Camajuaní, km 4 ½, dentro del área del Politécnico General Lázaro Cárdenas del Río, y posee además dos instalaciones, situadas una en carretera central, km 307, Banda Placetas, desvío Universidad, y otra en Calle B, número 34, entre 6ta y Final, Reparto Moro, todas en la ciudad de Santa Clara, provincia de Villa Clara.

Su objeto social es la producción y comercialización de forma mayorista de componentes electrotécnicos y electromecánicos, así como prestar servicios de calibración y pruebas eléctricas a componentes electrotécnicos a las entidades de la Unión Eléctrica. Tiene como política satisfacer las necesidades y expectativas de sus clientes, preservar el medioambiente y garantizar la seguridad y salud de sus trabajadores, lo cual logra a partir de los compromisos de la alta dirección. Los cuales se listan a continuación:

- cumplir los requisitos acordados con los clientes y otros suscritos por la organización;
- cumplir la legislación vigente y aplicable a sus actividades y productos;
- prevenir la contaminación asociada a sus actividades, disminuir las emisiones de residuales líquidos, mantener el control y manejo adecuado de los desechos peligrosos;
- utilizar racional y eficazmente los recursos asignados, fomentando el ahorro energético en el desarrollo de sus actividades;
- identificar, evaluar, controlar, minimizar o eliminar de manera continua, los riesgos a la salud, los accidentes y siniestros asociados a sus actividades, manteniendo un ambiente de trabajo seguro;

- realizar la calibración de contadores de energía eléctrica de manera confiable, aplicando una buena práctica profesional, con trazabilidad a patrones nacionales o internacionales, cumpliendo los requisitos de la NC-ISO/IEC 17025:2006 y del órgano acreditador;
- garantizar la competencia del personal de la organización por medio de su motivación y familiarización con la documentación del sistema de gestión integrado y la implementación de las políticas y los procedimientos en su trabajo.

La organización tiene implementado y certificado un sistema de gestión que integra calidad, medioambiente, seguridad y salud en el trabajo. Los sistemas de gestión de la calidad y medioambiente cumplen respectivamente los requisitos de la NC ISO 9001:2008 y la NC ISO 14001:2004 y se encuentran certificados por la Oficina Nacional de Normalización (ONN) y el Bureau Veritas, mientras que el sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo cumple con la NC 18001:2005 y está certificado por la ONN.

Cuenta además con un laboratorio de calibración de contadores de energía eléctrica y un laboratorio de ensayos eléctricos los que demuestran su competencia técnica por medio de la condición de laboratorio acreditado por el Órgano Nacional de Acreditación de las República de Cuba (ONARC) según los requisitos de la NC-ISO/IEC 17025:2006.

Entre sus principales productos se encuentran el eslabón fusible tipo K de media tensión para 15 kV y 34 kV, los cortacircuitos de expulsión (drop-out), los seccionadores monopolares y tripolares, las cadenas de prueba, los guardacabos, la calibración de contadores de energía eléctrica, el ensamblaje de luminarias de alumbrado público y de gabinetes para contadores de energía eléctrica.

En la figura 2.1 aparece la estructura organizativa de la UEB Fábrica de Fusibles y Desconectivos, en la que se observa que el personal de dirección está subordinado directamente al director, lo que facilita la comunicación y toma de decisiones. Cuenta con una plantilla cubierta por un total de 118 trabajadores los cuales se encuentran divididos en distintas categorías ocupacionales como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Plantilla de personal de la entidad objeto de estudio

Categoría ocupacional	Cantidad
Técnicos	34
Servicios	12
Obreros	68
Administrativos	1
Ejecutivos	3

Fuente: Documentos de la empresa.

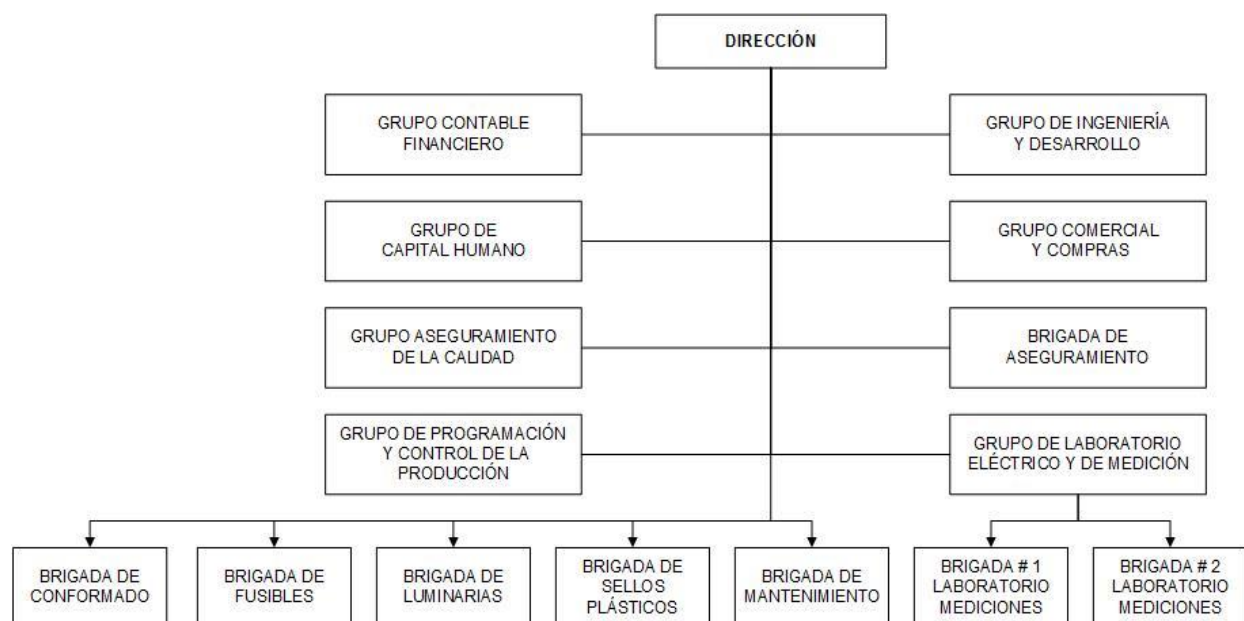


Figura 2.1. Estructura organizativa de la UEB Fábrica de Fusibles y Desconectivos. Fuente: Documentos de la empresa.

La empresa ha implantado un sistema de innovación tecnológica que abarca todos los procesos pertinentes, donde cada línea y laboratorio crea su propio plan de desarrollo tecnológico en el que son tomados en cuenta los posibles nuevos proyectos que aportan los conocimientos de sus innovadores, cuenta con un grupo de ingeniería que entre sus principales funciones se encuentra trabajar la cartera de productos de importación de la Unión Eléctrica con la finalidad de sustituir importaciones lo que complementa la estrategia trazada de inversión en nuevas tecnologías.

Como principal proveedor de materias primas y materiales importados tienen a ENERGOMAT, y opera con otros proveedores nacionales como: AUSA, CIMEX, ACINOX, Adypel, Geocuba, EMI Ernesto Guevara, DIVEP y se utiliza como importador de los suministros principales a ENERGOIMPORT.

2.1.1. Caracterización del Departamento de mantenimiento

El área del mantenimiento se encuentra organizada de manera que asegure la disponibilidad máxima planificada de los equipos al menor costo, dentro de los requisitos de seguridad. Por cuanto, el departamento de mantenimiento dispone del personal técnico capaz de aplicar las exigencias del sistema, el desarrollo tecnológico, y a su vez garantizar la ejecución de las labores de mantenimiento en la empresa.

El departamento de mantenimiento cuenta con una plantilla aprobada de cuatro trabajadores completamente cubierta (ver tabla 2.2) que brinda servicios a un total 54 equipos de las líneas de producción de la entidad.

Tabla 2.2. Plantilla del personal del área de mantenimiento

Especialidad	Cantidad
Jefe de Mantenimiento	1
Jefe de Brigada	1
Ajustador herramental	1
Mecánico	1

Fuente: Documentos de la empresa.

Cada trabajador labora un turno de ocho horas por día, subordinados al jefe de mantenimiento que a la vez es el jefe de producción. Los obreros son los encargados de cumplir con las tareas de mantenimiento que sean necesarias ejecutar para garantizar la capacidad operativa del equipamiento productivo de la fábrica: los sistemas de refrigeración y acondicionadores de aire, las tuberías e instalaciones eléctricas y todos los demás problemas que se presentan, siempre y cuando, estos se puedan resolver en relación con la calificación de la brigada, además, se encargan de la limpieza y cuidado de las áreas verdes y la pintura de todas las instalaciones.

La política del área de mantenimiento está encaminada a garantizar el máximo nivel de calidad en los productos con costos de mantenimiento bajos y asegurar el funcionamiento de los equipos e instalaciones con el máximo de rendimiento y el mínimo de consumo.

Los objetivos que se proponen como parte de la Gestión del mantenimiento son: maximizar la disponibilidad de las maquinarias y equipos para la producción, de manera que siempre estén aptos y en condiciones de operación inmediata; lograr el mayor tiempo de servicio de las instalaciones y maquinarias productivas; preservar el valor de las instalaciones, optimizando su uso y minimizando el deterioro y en consecuencia, su depreciación; disminuir los paros imprevistos de producción ocasionados por fallas inesperadas, tanto en los equipos como en las instalaciones; y lograr la creación de un sistema de mantenimiento preventivo capaz de alcanzar metas en la forma más económica posible.

Al realizar un análisis del desempeño del sistema de mantenimiento se observó que en la empresa objeto de estudio no se está logrando la función de mantenimiento a plenitud, ya que con sus actividades de evaluación y control no se garantiza fiablemente el funcionamiento regular de las instalaciones productivas debido a que solamente se le da seguimiento a la disponibilidad de los equipos y no se le presta atención al resto de los indicadores de mantenimiento, que son necesarios para realizar una correcta gestión de esta función.

Al realizar una revisión del cubrimiento de los elementos de la lista de chequeo quedaron identificados como posibles problemas los siguientes:

- No se encuentran definidas las reglas a seguir para el establecimiento de prioridades a la hora de afrontar acciones de mantenimiento correctivo que sean demandadas simultáneamente.
- No existe ningún procedimiento para determinar la política de mantenimiento adecuado para cada equipo.
- Son ineficientes las tareas de mantenimiento que se realizan.
- Tecnología obsoleta e inexistencia de una política de reemplazo de equipos en la empresa.
- Los suministros ofertados no satisfacen las necesidades del área de mantenimiento.
- No está definido un procedimiento para el pronóstico de la demanda de piezas de repuesto y las solicitudes de repuestos de emergencia.
- No es posible definir con exactitud el tiempo requerido para diagnosticar un fallo.

2.2. Procedimiento para hallar la criticidad del equipamiento productivo de la empresa objeto de estudio a partir de la metodología DEA

En este epígrafe se procede a describir el procedimiento propuesto para hallar la criticidad del equipamiento productivo en la UEB Fábrica de Fusibles y Desconectivos a partir de la metodología DEA y tomando como referencia métodos tradicionales (ver figura 2.2).

Etapas 1. Determinar eficiencia por el método DEA

Para el cumplimiento de esta etapa se deben desarrollar los tres pasos siguientes.

Paso 1.1. Definir variables de entrada y salida

Para definir las variables de entrada y salida del procedimiento se utilizará el método de los expertos.

Paso 1.2. Determinar los pesos de las variables de entrada y salida

Para el desarrollo de este paso se debe emplear las fórmulas matemáticas que se describen a continuación (ver expresiones 2.1, 2.2, y 2.3). El modelo seleccionado es el Modelo CCR-INPUT con orientación de entrada para el logro de que una unidad alcance la eficiencia de la unidad de referencia a costa de reducir la cantidad de recursos que consume.

$$Max \sum_{k=1}^p v_{kj} y_{kj} \quad (2.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k=1}^p v_{kj} y_{kj} - \sum_{i=1}^m u_{ij} x_{ij} \leq \theta_j x_{ij} \quad (2.2)$$

$$j=1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{k=1}^p u_{ij} x_{ij} = 1 \quad (2.3)$$

$$p=1, 2, \dots, p$$

$$u_{ij}, v_{kj} \geq \varepsilon$$

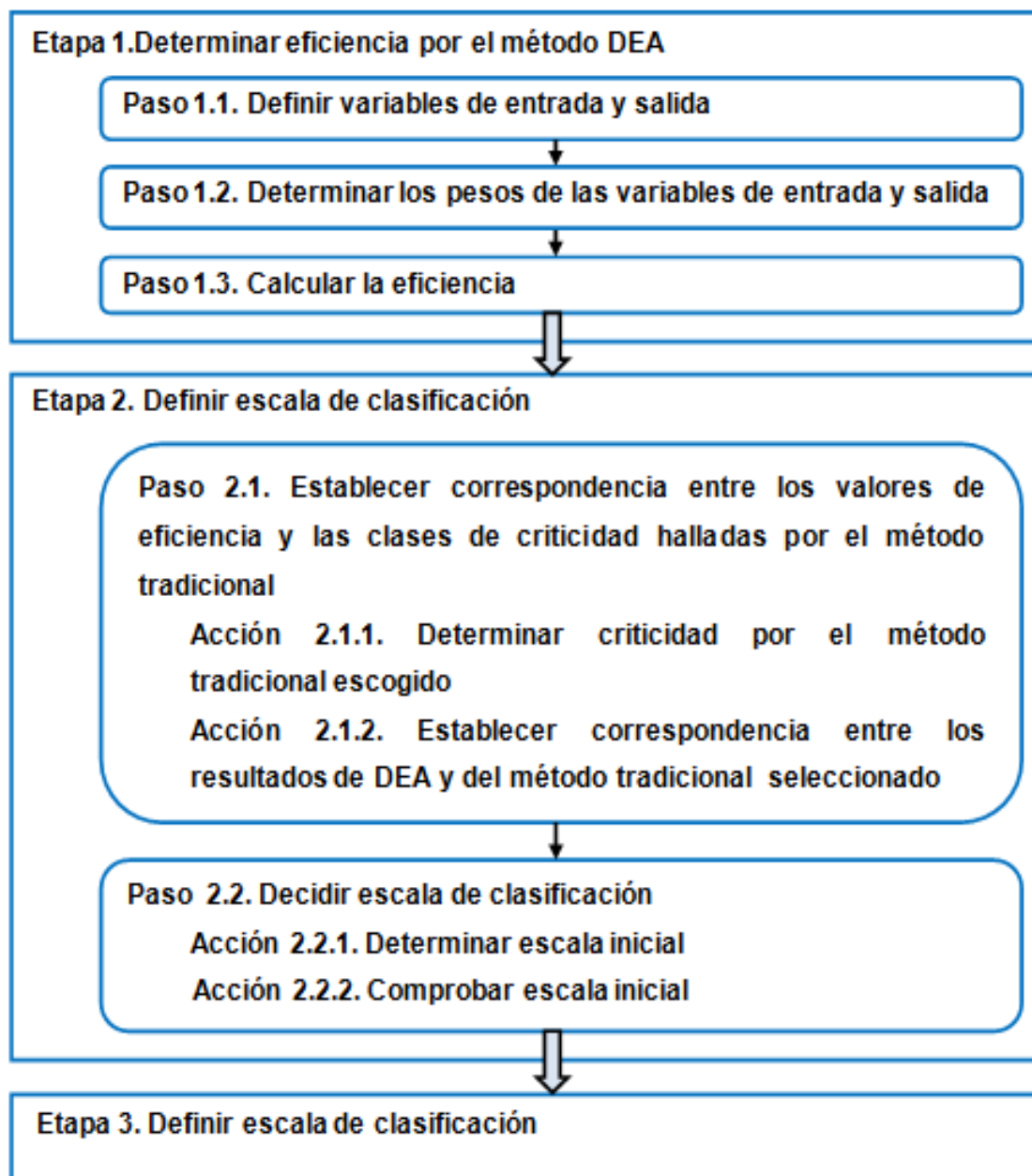


Figura 2.2. Procedimiento para determinar criticidad del equipamiento productivo a través del método DEA.

Donde i y k son las entradas y salidas del sistema, x_{ij} son los valores de las entradas i en el proceso j , y_{kj} son los valores de las salidas k en el proceso j , u_{ij} es el peso específico de la entrada i en el proceso j , v_{kj} es el peso específico de la salida k en el proceso j y m y p son la cantidad máxima de entradas y salidas, respectivamente.

La solución de este modelo matemático se propone determinarla a través del software WINQSB, versión 2.0.

Paso 1.3. Calcular la eficiencia

El cálculo de la eficiencia se debe realizar a través de la expresión 2.4.

$$e_m = \frac{\sum_{i=1}^m V_{kj} y_{kj}}{\sum_{i=1}^m U_{kj} x_{kj}} \quad (2.4)$$

donde:

e_m : eficiencia media comparativa del equipo “m”.

m: cantidad de equipos considerados en el estudio.

Etapa 2. Definir escala de clasificación

En esta etapa se procede a determinar la escala que dará la criticidad del equipamiento productivo según la eficiencia de los mismos. Para ello se proponen los pasos siguientes.

Paso 2.1. Establecer correspondencia entre los valores de eficiencia y las clases de criticidad halladas por el método tradicional

Para el desarrollo de este paso se proponen las acciones siguientes.

Acción 2.1.1. Determinar criticidad por el método tradicional escogido

En esta etapa el algoritmo utilizado para medir la criticidad del equipamiento productivo es el descrito por Alfonso-Llanes (2009) (ver figura 2.3), se seleccionó este método porque ha sido utilizado en varias empresas del país y principalmente en la región central, y se ha trabajado con él en varias tesis realizadas en la empresa objeto de estudio con resultados satisfactorios. Este método consiste en clasificar un conjunto de siete variables¹ (seguridad, calidad, régimen de trabajo, afectaciones, frecuencia de fallo, tiempo de reparación y costo de reparación), en ellas se pueden presentar 3 posibles efectos (niveles) ante un fallo del equipamiento.

Nivel 1: estado crítico

Nivel 2: estado intermedio

Nivel 3: estado aceptable

Para alcanzar la clasificación de cada equipo las categorías de criticidad asumidas fueron: Clase “A”, Clase “B” y Clase “C”; criticidad alta, mediana y baja, respectivamente. A continuación, se describe cada una de las variables consideradas en el algoritmo.

Seguridad: capacidad del fallo de ocasionar daño a las personas que se encuentran en la zona donde opera el equipo o en general al medio ambiente.

Calidad: nivel de afectación a la calidad del producto que conlleva el fallo del equipo.

Régimen de trabajo: cantidad de tiempo que opera el equipo en la jornada de

¹ En la propuesta se considera que estas variables son las que caracterizan el contexto operacional del equipamiento bajo estudio.

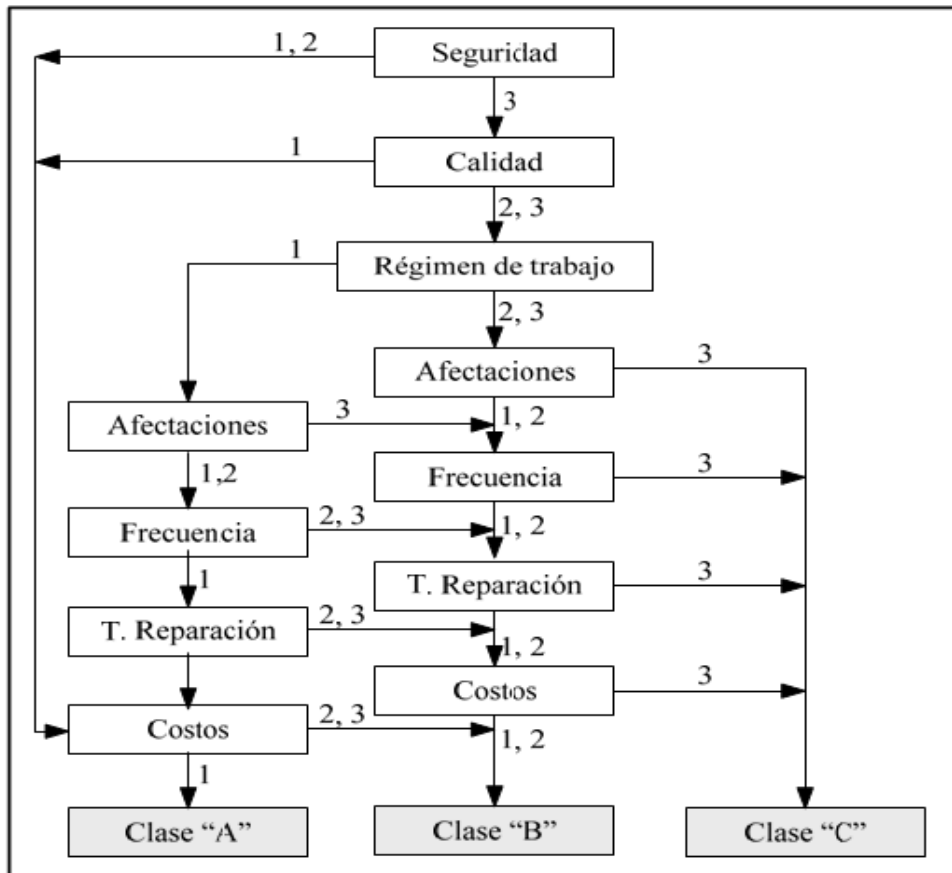


Figura 2.3. Algoritmo para la definición del nivel de criticidad del equipamiento. Fuente: Alfonso-Llanes (2009).

Afectaciones: se asocia al efecto del fallo del equipo en el proceso y su capacidad de interrumpirlo de forma total o parcial.

Frecuencia de fallos: cantidad de fallos de cualquier componente del sistema por período de utilización (fallos/unidad de tiempo).

Tiempo de reparación: tiempo necesario para reparar el fallo.

Costo de reparación: costo asociado a la reposición del estado de funcionamiento del elemento que ha fallado (costo del fallo).

La evaluación de cada variable precisa que la empresa disponga de un sistema de estadística de fallos fiable, lo cual permitirá realizar cálculos “exactos y absolutos”; sin embargo, desde el punto de vista práctico, dado que pocas veces se dispone de una data histórica de excelente calidad, el análisis de criticidad permite trabajar en rangos, es decir, establecer cuál sería la condición más favorable, así como la condición menos favorable de cada uno de los criterios a evaluar (Alfonso-Llanes 2009).

Acción 2.1.2. Establecer correspondencia entre los resultados de DEA y del método tradicional seleccionado

En esta acción primeramente se ordenan los equipos de menor a mayor eficiencia y se le coloca la clase de clasificación determinada por el método tradicional.

Paso 2.2. Decidir escala de clasificación

Para el desarrollo de este paso se proponen las acciones siguientes.

Acción 2.2.1. Determinar escala inicial

Luego de haber obtenido la correspondencia entre los resultados de ambos métodos se establecerá la escala inicial según los valores de eficiencia que le corresponda a cada clase.

Acción 2.2.2. Comprobar escala inicial

A partir de la escala inicial se comprobará la misma mediante el método del discriminante por el software IBM SPSS Statistics versión 22, el cual proporcionará más exactitud en los límites de cada escala.

Etapas 3. Definir clasificación de criticidad

En esta etapa se procederá finalmente a determinar la criticidad del equipamiento productivo a partir de los resultados obtenidos en las etapas anteriores.

2.3. Aplicación del procedimiento para hallar la criticidad del equipamiento productivo de la empresa objeto de estudio a partir de la metodología DEA

En este epígrafe se realizará la aplicación práctica del procedimiento antes propuesto, para lo cual se procedió a resolver cada una de las etapas que están presentes en este con el objetivo de determinar la criticidad del equipamiento productivo de la fábrica.

Etapas 1. Determinar eficiencia por el método DEA

Paso 1.1. Definir variables de entrada y salida

En este paso primeramente se seleccionó el grupo de expertos encargado de proponer las variables a emplear, para ello se empleó el procedimiento propuesto por Hurtado-de-Mendoza-Fernández (2003). En la tabla 2.3 se muestra la relación de los expertos seleccionados.

Las variables de salida recomendadas por los expertos son la confiabilidad del equipo y el costo de mantenimiento. Para la definición de las variables de entrada primeramente se hizo un levantamiento de las propuestas por los expertos y luego se determinó el nivel de correlación de ellas con las variables de salida² (en el anexo 2 se muestran los niveles de correlación obtenidos), quedando definidas las siguientes: régimen de trabajo, frecuencia de fallo y tiempo de reparación. Los datos correspondientes a las variables de entrada y salida se muestran en el anexo 3.

Paso 1.2. Determinar los pesos de las variables de entrada y salida

En el anexo 3 se muestran los pesos de las entradas y salidas obtenidos a través del software WINQSB.

²Para determinar el nivel de correlación se utilizó el software IBM SPSS Statistics, versión 22.0, evaluando el coeficiente de correlación de Pearson.

Tabla 2.3. Grupo de expertos participantes en el estudio

Expertos	Ocupación
Pablo Fernández García	Director General
Rolando Guerra Ramírez	Jefe de Producción
José Esbel Torres Hernández.	Técnico en Seguridad y Protección
Yulibany Rodríguez Estrada	Especialista en Gestión de los Recursos Humanos
Oneido Miranda Dubernal	Jefe de mantenimiento
Lidice Rodríguez García.	Especialista en Gestión de la Calidad
Rafael Quintero Flores	Especialista en Gestión Económica

Paso 1.3. Calcular la eficiencia

En la tabla 2.4 se muestran la eficiencia de cada equipo.

Paso 2.1. Establecer correspondencia entre los valores de eficiencia y las clases de criticidad halladas por el método tradicional

Acción 2.1.1. Determinar criticidad por el método tradicional escogido

En este paso, primeramente el grupo de expertos definió el intervalo correspondiente a cada nivel de las variables estudiadas (a partir de los datos mostrados en el anexo 3), tal y como se muestra a continuación.

Régimen de trabajo

Nivel 1: el equipo es utilizado intensivamente (mayor de 6 h/día).

Nivel 2: el equipo es utilizado medianamente (entre 4 y 6 h/día).

Nivel 3: el equipo es de uso ocasional o de baja utilización (menor de 4 h/día).

Frecuencia de fallos

Nivel 1: muchas paradas ocasionadas por los fallos (mayor de 6 veces/año).

Nivel 2: paradas ocasionales (entre 4 y 6 veces/año).

Nivel 3: paradas poco frecuentes (menor de 4 veces/año).

Tiempo de reparación

Nivel 1: el tiempo promedio de reparación del equipo ante un fallo es elevado (mayor de 4 h).

Nivel 2: el tiempo promedio de reparación del equipo ante un fallo es moderado (entre 1y 4 h).

Nivel 3: el tiempo promedio de reparación del equipo ante un fallo es pequeño (menor de 1h).

Costo de reparación

Nivel 1: el costo promedio de reparación del equipo ante un fallo es elevado (mayor de \$3000).

Nivel 2: el costo promedio de reparación del equipo ante un fallo es moderado (entre \$1000 y \$3000).

Tabla 2.4. Eficiencia del equipamiento productivo

Equipos	Eficiencia	Equipos	Eficiencia
Torno mecánico (1)	0.39743	Cizalla manual	0.99998
Fresadora vertical	0.49665	Cizalla múltiple	0.99991
Fresadora universal	0.49555	Torno mecánico Hiller	0.99907
Recortador	0.99988	Taladro vertical	0.57064
Torno especial	0.99845	Extractor fusibles	0.88534
Rectificadora plana	0.49826	Prensa 5t	0.99886
Rectificadora cilíndrica	0.66471	Prensa 5t	0.99886
Electro esmeriladora (1)	0.99998	Prensa 10t	0.99905
Afiladora	0.99772	Prensa 10t	0.99097
Fresadora viking	0.49813	Torno automático A-12	0.28316
Torno mecánico (2)	0.33121	Torno automático A-40	0.26512
Torno mecánico (3)	0.39906	Prensa 8 t	0.28415
Torno automático	0.28187	Prensa16 t	0.36014
Segueta mecánica	0.99999	Prensa 40 t	0.28605
Taladro columna	0.99964	Máquina de cortar tubo (1)	0.98831
Dobladora de tubo	0.99998	Compresor SK-15 T	0.56157
Electro esmeriladora (2)	0.99930	Prensa 6.3 t	0.40037
Electro esmeriladora (3)	0.99930	Tambora	0.98217
Taladro mesa (1)	0.58484	Cizalla eléctrica	0.33128
Taladro mesa (2)	0.67037	Prensa hidráulica	0.99989
Prensa 6t (1)	0.28383	Máquina de cortar tubo (2)	0.99997
T 40t	0.36232	Máquina de cortar alambre	0.98222
T 100t	0.49806	Prensa 6t (2)	0.33050
Prensa 4,40t	0.30621	Prensa 4t	0.36351
Taladro mesa (3)	0.57022	Torno A-20	0.28026
Cizalla pulman (1)	0.66217	Torno automático ATA-125	0.26224
Cizalla pulman (2)	0.66214	Torno automático IB-118	0.26217

Nivel 3: el tiempo promedio de reparación del equipo ante un fallo es pequeño (menor de \$ 1000).
A continuación se presenta la aplicación del algoritmo para algunos equipos representantes de las líneas productivas de la empresa.

Clasificación del Torno Automático A-12 (Línea de maquinado)

Se procederá a presentar el comportamiento de este equipo en función de cada una de las variables que conforman el algoritmo (ver Figura 2.3).

Seguridad: el fallo del equipo trae riesgos para los operarios y/o para el medio ambiente (nivel 2).

Calidad: el fallo del equipo afecta la calidad del producto y no puede ser reprocesado (nivel 1).

Régimen de trabajo: el equipo es utilizado intensivamente durante la jornada laboral (nivel 1).

Afectaciones: la parada de este equipo repercute en la continuidad del resto de los equipos, es decir, la rotura paraliza la línea completamente (nivel 1).

Frecuencia: existen muchas paradas ocasionadas por fallos (nivel 1).

Tiempo de reparación: el tiempo de reparación es medio, ya que se encuentra entre el intervalo fijado (nivel 2).

Costo de reparación: el costo de reparación es alto, o sea, está por encima de los \$3000(nivel 1).

A partir del comportamiento observado, en función de las variables del algoritmo de decisión, la criticidad de este equipo se clasifica como “Clase A”.

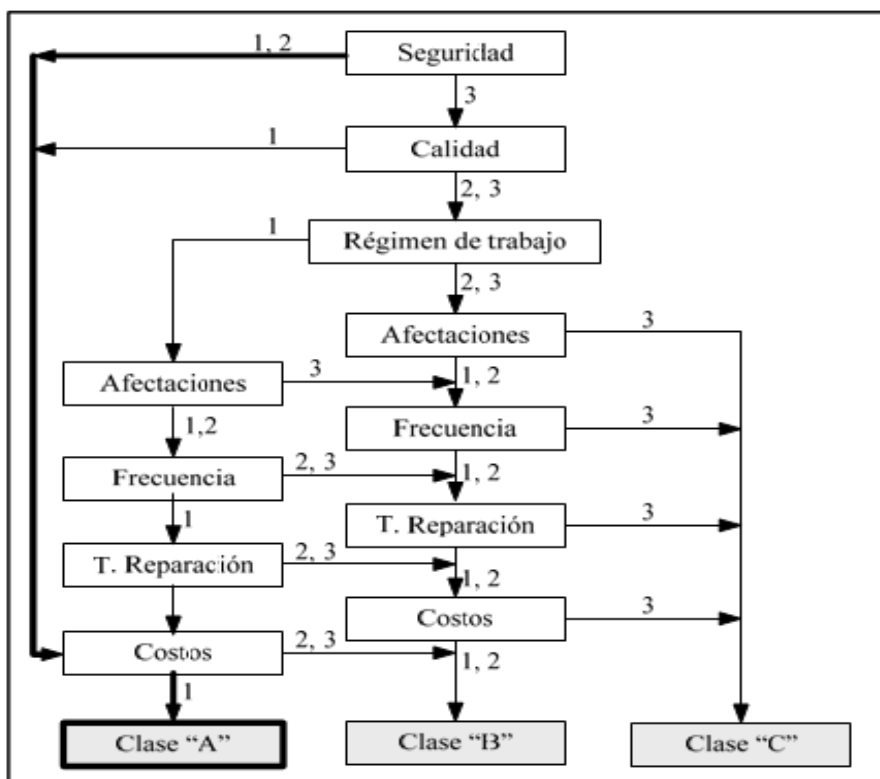


Figura 2.3. Algoritmo para la definición del nivel de criticidad del equipo torno automático A-

Clasificación de la máquina de cortar tubo (Línea de fusibles)

El comportamiento de este equipo en función de cada una de las variables del algoritmo se muestra en la figura 2.4.

Seguridad: el fallo del equipo no trae riesgos para los operarios ni al medio ambiente (nivel 3).

Calidad: el fallo del equipo afecta la calidad del producto (nivel 1).

Régimen de trabajo: el equipo es de uso ocasional o de baja utilización durante la jornada laboral (nivel 1).

Afectaciones: este es el equipo provoca la interrupción de un sistema importante en la línea productiva (nivel 2).

Frecuencia: las paradas que realiza son poco frecuentes (nivel 3).

Tiempo de reparación: el tiempo promedio de reparación es pequeño (nivel 3).

Costo de reparación: el tiempo promedio de reparación del equipo ante un fallo es pequeño (nivel 3).

A partir del comportamiento observado, en función de las variables del algoritmo de decisión, la criticidad de este equipo se clasifica como “Clase B”.

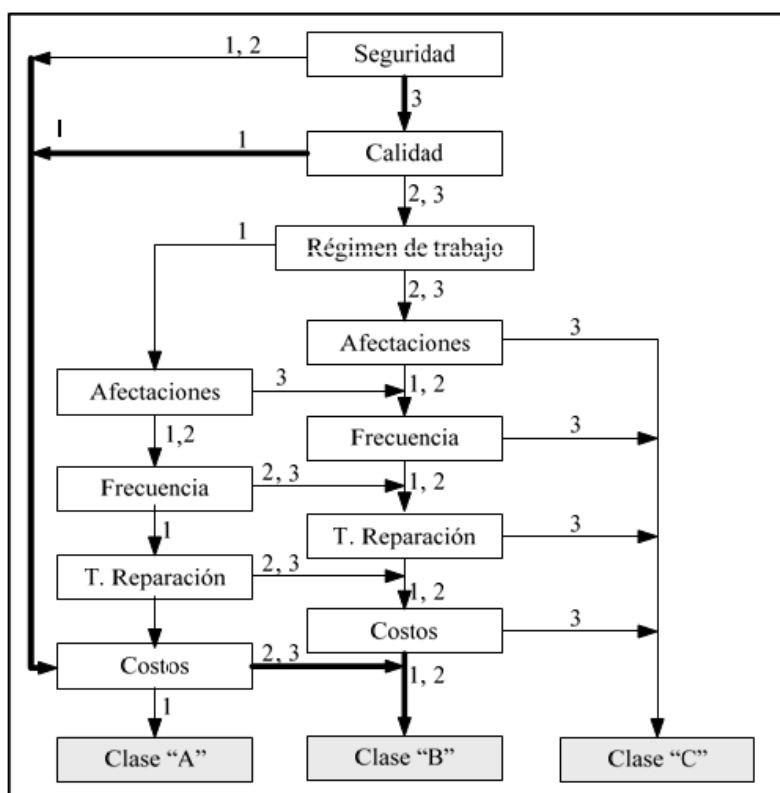


Figura 2.4. Algoritmo para la definición del nivel de criticidad de la máquina de cortar tubo.

Clasificación de la Electro Esmeriladora (Línea de maquinado).

El comportamiento de este equipo en función de cada una de las variables se muestra en la figura 2.5.

Tabla 2.5. Cantidad de equipos por cada clase

Clase	Total de equipos
A	6
B	37
C	11

Acción 2.1.2. Establecer correspondencia entre los resultados del DEA y del método tradicional seleccionado

Luego de haber determinado la criticidad de cada equipo y con la eficiencia obtenida en la etapa 1 se procede a establecer la correspondencia entre ambos resultados para lo cual se ordenaron los datos de la eficiencia de menor a mayor, obteniéndose que mientras menor es la misma mayor es la criticidad obtenida por el método tradicional, por la que observa que tienen una relación inversamente proporcional (ver anexo 5).

Paso 2.2. Decidir escala de clasificación

A partir de la eficiencia y de la criticidad de cada equipo se estableció la escala que se muestra en la tabla 2.6.

Tabla 2.6. Escala de clasificación inicial

Clase	Escala
A	$0 < e_j \leq 0.35$
B	$0.35 < e_j \leq 0.84$
C	$0.84 < e_j \leq 1.00$

Luego de haber definido la escala inicial se procedió a comprobarla, lo cual se realizó a través del software IBM SPSS Statistics, versión 22.0, empleando el método del discriminante, un fragmento de estos resultados se muestran en el anexo 6. En la tabla 2.7 se presenta la escala decidida finalmente.

Tabla 2.7. Escala de clasificación inicial comprobada

Clase	Escala
A	$0 < e_j \leq 0.30$
B	$0.30 < e_j \leq 0.80$
C	$0.80 < e_j \leq 1.00$

Etapas 3. Definir clasificación de criticidad

Luego de obtener la escala de clasificación se procede a determinar la criticidad del equipamiento productivo a partir de la eficiencia obtenida por el método DEA. En la tabla 2.8 se muestran la cantidad de equipos clasificados en cada una de las clases, observándose que la mayoría del equipamiento se encuentra entre las clases B (46%) y C (38%).

Tabla 2.8. Cantidad de equipos por cada clase

Clase	Total de equipos
A	8
B	25
C	21

2.4. Conclusiones parciales

1. El procedimiento desarrollado para determinar la criticidad del equipamiento, tomando como referencia los resultados de un método tradicional, permite definir una escala de clasificación más precisa al eliminar las variabilidades alrededor de los límites de las clases, en correspondencia con las características numéricas de las variables utilizadas en el estudio.

CONCLUSIONES GENERALES

1- El estudio bibliográfico realizado para la construcción del marco teórico - referencial de la investigación confirma la existencia de una amplia base conceptual sobre la clasificación del equipamiento y sus aplicaciones en el sector industrial, específicamente en la Gestión del mantenimiento; sin embargo, son nulos los precedentes, en la literatura científica consultada, sobre la aplicación del método DEA a esta rama empresarial, por lo cual, el problema de investigación formulado para la presente tesis se considera de gran actualidad y pertinencia.

2- El análisis de la situación problemática que fundamentó la presente Tesis demostró la necesidad de desarrollar un accionar metodológico que sirva de soporte al proceso de clasificación del equipamiento productivo en la empresa Fábrica de Fusibles y Desconectivos.

3-La efectividad del accionar metodológico desarrollado para realizar la clasificación del equipamiento productivo a partir del método DEA, tomando como patrón de referencia un método tradicional, quedó demostrada mediante su aplicación en organización objeto de estudio práctico de la investigación. Ello se evidencia en la clasificación del equipamiento mediante el método tradicional seleccionado, la definición de una escala de clasificación numérica a partir de la eficiencia técnica resultante del método DEA, y finalmente la clasificación del equipamiento por este método.

RECOMENDACIONES

Con el objetivo de incentivar la realización de investigaciones futuras que enriquezcan el resultado de este trabajo, se plantean las recomendaciones siguientes.

1. Generalizar el estudio a otras empresas en aras de lograr rangos de clasificación con mayor nivel de confiabilidad a partir de la eficiencia arrojada por el método DEA.
2. Realizar estudios similares para clasificar el equipamiento a partir del método DEA tomando como referencia otros métodos de clasificación.
3. Realizar estudios orientados a identificar qué comportamiento de las variables provocan clasificaciones excepcionales dentro de las clases.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACOSTA-PALMAR&TRONCOSO, 2006. "Metodología para el Diagnóstico y Evaluación de la Función Mantenimiento". *Sociedad Uruguaya de Mantenimiento, Gestión de Activos y Confiabilidad* [en línea], Disponible en: http://www.uruman.org/TrabajosTec/Hector_Acosta.pdf.
2. AGUILERA-MARTÍNEZ, 2001. *Perfeccionamiento de la planificación de recursos humanos en el Sistema Alternativo de Mantenimiento (SAM). Una aplicación en la Industria Textil Cubana*. S.l.: Santa Clara. Cuba.
3. AGUSTÍN&ARIEU, 2005. *Eficiencia técnica comparada en elevadores de granos de Argentina, bajo una aplicación de análisis de envolvente de datos. La situación del puerto de Bahía Blanca*. 2005. S.l.: s.n.
4. ALFONSO-LLANES, 2009. *Procedimiento para la asistencia decisional al proceso de tercerización de la ejecución del mantenimiento* *Procedimiento para la asistencia decisional al proceso de tercerización de la ejecución del mantenimiento*. S.l.: UCLV, Santa Clara. Cuba.
5. ALTAMIRANO, 2009. Análisis de la Criticidad de Modos y Efectos de Falla de Subestaciones Eléctricas de Distribución de Comisión Federal de Electricidad. *VII Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico, CIINDET 2009, Cuernavaca, Morelos, México.*,
6. ALVAREZ, 2008. *Análisis y Reparto de cortes de conexión de régimen especial a redes de distribución [en línea]* [en línea]. S.l.: Universidad de Comillas ICAI. Disponible en: <http://www.iit.upcomillas.es/docs/tm-08-105.pdf>.
7. BANKER, 1989. An introduction to data envelopment analysis with some of its models and their uses. *Research in governmental and nonprofit accounting*, vol. 5, pp. 125-163.
8. BENNETT, 2009. "Maintenance Management".s.l: s.n. 2009. S.l.: s.n.
9. BLOOMQUIST, 2012. *Capturando la Cantidad Correcta de Datos* [en línea]. 2012. S.l.: s.n. Disponible en: <http://confiabilidad.net/articulos/capturando-la-cantidad-correcta-de-datos/>.
10. BORROTO-PENTÓN, 2005. *Contribución al mejoramiento de la gestión del mantenimiento en hospitales en Cuba . Aplicación en hospitales de la provincia Villa* *Contribución al mejoramiento de la gestión del mantenimiento en hospitales en Cuba . Aplicación en hospitales de la provinc*. S.l.: UCLV, Santa Clara. Cuba.
11. CHARNES, 1981. Evaluating program and managerial efficiency: an application of data envelopment analysis to program follow through. *Management Science*,

- vol. 6, no. 27, pp. 668-697.
12. CHARNES;COOPER&RHODES, 1978. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, vol. 2, no. 6, pp. 668-697.
 13. CHARNES;COOPER;LEWIN&SEIFORD, 1994. *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Application: Kluwer Academic Publishers*. 1994. S.I.: s.n.
 14. CHRISTENSEN, 2006. *Criticidad de equipos* [en línea]. 2006. S.I.: s.n. Disponible en: www.clubdemantenimiento.com.
 15. CRESPO-MÁRQUEZ, 2007. *The maintenance management framework. Models and methods for complex systems maintenance*. 2007. S.I.: s.n.
 16. DE-LA-PAZ-MARTÍNEZ, 1996. *Perfeccionamiento del sistema de mantenimiento en la Industria Textil Cubana. Aplicación en la Empresa Textil «Desembarco del Granma»*. Santa Clara, Cuba: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
 17. DE-LA-PAZ-MARTÍNEZ, 2002. Herramientas para la toma de decisiones en la gestión integral del mantenimiento de activos fijos. *Material complementario de curso, UCLV*,
 18. DE-LA-PAZ-MARTÍNEZ, 2011a. Estrategias y criterios en la función de mantenimiento. *Especialidad Gestión de los servicios técnicos del turismo*,
 19. DE-LA-PAZ-MARTÍNEZ, 2011b. *Mantenimiento*. 8va. S.I.: UCLV, Cuba.
 20. DE-LA-PAZ-MATÍNEZ;BORROTO-PENTÓN;ALFONSO-LLANES, 2013. *Estrategias y criterios en la función mantenimiento*. 2013. S.I.: UCLV. Santa Clara, Cuba.
 21. DEL-CASTILLO, 2009. *Análisis de Criticidad Personalizados*. 2009. S.I.: Ingeniería Mecánica, La Habana.
 22. DURÁN, 2000. Nuevas tendencias del mantenimiento industrial. *The Woodhouse Partnership Limited* [en línea], Disponible en: <http://www.cides.cl/junio/duran-nuevas.html>.
 23. ESPINOSA-FUENTES, 2006. *Metodología para inovacao da gestao de manutencao industrial*. S.I.: Universidad Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Brasil.
 24. FABRO, 2003. *Modelo para planejamento de manutencao baseado em indicadores de criticidade de processo II*. S.I.: Universidad Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Brasil.
 25. FARRELL, 1957. The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, no. Series A(120), pp. 253-290.

26. FERNÁNDEZ-PÉREZ, 2003. Optimización del mantenimiento. Implantación de la metodología RCM en máximo. *Revista Ingeniería y Gestión de Mantenimiento.*, vol. 2, pp. 40-45.
27. GARCÍA-AHUMADA, 2001. Función del mantenimiento y las nuevas tecnologías. *Revista Mantenimiento*, vol. 141, no. enero/febrero 2003.
28. GARCÍA-GARRIDO, 2003. Organización y Gestión Integral de Mantenimiento. *Manual práctico para la implantación de sistemas de gestión avanzadas de mantenimiento industrial*,
29. GARCÍA-GARRIDO, 2010. "Organización y Gestión Integral de Mantenimiento. *Manual práctico para la implantación de sistemas de gestión avanzados de mantenimiento industrial* "(Kou et al. 2016)" [en línea]. 2010. S.I.: Editorial Díaz de Santos. España. Disponible en: <http://diazdesantos.es/ediciones>.
30. GARCÍA-GONZÁLEZ-QUIJANO, 2004. *Mejora en la confiabilidad operacional de las plantas de generación de energía eléctrica: desarrollo de una metodología de gestión de Mantenimiento Basado en el Riesgo (RBM)*. S.I.: Universidad Pontificia Comillas, Madrid. España.
31. GUSMÃO, 2001. Índices de desempenho da manutenção. *Revista Club de Mantenimiento* [en línea], no. 4. Disponible en: <http://www.mantenimientomundial.com/articulos/4indices.asp> .
32. HURTADO-DE-MENDOZA-FERNÁNDEZ, 2003. Criterio de expertos. Su procesamiento a través del método Delphy. [en línea], Disponible en: <http://www.ub.es/histodidactica/Epistemolog%EDa/Delphy.htm> / Última consulta: 21.01.2016..
33. JEIRA&GIBSON, 2004. *Las tendencias del mercado moderno. Outsourcing* [en línea]. 2004. S.I.: s.n. Disponible en: <http://www.kpmg.cl/documentos/Final-Presentación BPO-july-2004>.
34. LARRALDE-LEDO, 1994. Métodos de evaluación de la gestión de mantenimiento. *Revista Mantenimiento*, no. 72, pp. 7-13.
35. MENG, 2012. Measuring environmental performance in China's industrial sectors with non-radial DEA. *Mathematical and Computer Modelling*,
36. MIRANDA;ARAYA, 2003. EFICIENCIA ECONOMICA EN LAS ESCUELAS DEL MECE/RURAL DESDE LA PERSPECTIVA DEL ANALISIS ENVOLVENTE DE DATOS (DEA). *Estudios pedagógicos (Valdivia)*,
37. MONTAÑA, 2006. *Diseño de un Sistema de Mantenimiento con Base en Análisis de Criticidad y Análisis de Modos y Efectos de Falla en la Planta de Coque de Fabricación Primaria en la Empresa Acerías Paz del Río S.A.* 2006. S.I.: Escuela de Ingeniería Electromecánica U.P.T.C. Facultad Seccional

Duitama, Colombia.

38. MONTES-DE-OCA-QUIÑONES, 2009. *MIDIENDO LA EFICIENCIA EN LA ACTIVIDAD TURÍSTICA MEDIANTE EL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS. TURyDES. Rvista de investigacion en el turismo y desarrollo local*,
39. MORA, 2006. *Mantenimiento Estratégico para Empresas Industriales o de Servicio*. Edición AM. S.l.: , España.
40. MORA-GUTIÉRREZ, 2009. *Mantenimiento estratégico para empresas industriales o de servicios*. 2009. S.l.: Medellín. Colombia: AMG.
41. MORA-GUTIÉRREZ, 2012. *Mantenimiento eatratégico para empresas industriales o de servicio*. 3era. S.l.: Colombia.
42. MOUBRAY, 1997. *RCM II. Mantenimiento Centrado en Confiabilidad*. 2da. S.l.: Ellmann, Sueiro y Asociados. España.
43. NYHAN&MARTIN, 1999. Comparative Performance Measurement, a Primer on Data Envelopment Analysis. *Public Productivity & Management Review*, no. 22(3), pp. 348-364.
44. OLANREWAJU, 2012. *Integrated IDA-ANN-DEA for assessment and optimization of energy consumption in industrial sectors*. *Energy*. 2012. S.l.: s.n.
45. PARRA-MÁRQUEZ&CRESCO-MÁRQUEZ, 2012. *Métodos de Análisis de Criticidad y Jerarquización de Activos*. 2012. Sevilla: s.n.
46. PÉREZ-JARAMILLO, 2004. *El futuro del mantenimiento de la ingeniería de manufactura* [en línea]. 2004. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.soporteycia.com.co/documentos/mtopasado1.doc>.
47. RODRÍGUEZ-MACHADO;BORROTO-PENTÓN&ALFONSO-LLANES, 2012. *Manual de gestión de mantenimiento*. S.l.: UCLV. Santa Clara. Cuba.
48. SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, 1999. *Contribución al perfeccionamiento del sistema de gestión del mantenimiento a las máquinas y equipos productivos y energéticos en la fase de operación en las fábricas de azúcar crudo cubanas*. Santa Clara, Cuba: UCLV.
49. SCHUSCHNY, 2007. *El método DEA y su aplicación al estudio del sector energético y las emisiones de CO2 en América Latina y el Caribe*. 2007. Santiago de Chile: s.n.
50. SIERRA, 2011. *Desarrollo de un Sistema de Diagnóstico y Mantenimiento para los Agregados de las Turbinas de Vapor de 100 MW de la CTE Máximo Gómez*. S.l.: CIPEL, Cuba.
51. SOTUYO-BLANCO, 2001. *Optimización Integral de Mantenimiento (OIM)* [en línea]. 2001. S.l.: s.n. Disponible en: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/bib/notas/oim.asp>.

52. STEFANO, 2006. *Maintenance global service contracts: a guide to develop maintenance management strategies and performance indicators*. S.l.: Universidad de Pisa, Italia.
53. TAVARES, 1999. *Administración Moderna de Mantenimiento II*. 1era. S.l.: Brasil.
54. TOMLINGSON, 2007. Achieving World-Class Maintenance Status II. *Coal Age*, vol. 112, no. 8, pp. 40-42.
55. TORRES, 2003. *El mantenimiento. Su implementación y gestión*. 2da. S.l.: Córdoba, España.
56. TORRES, 2005. *Mantenimiento. Su implementación y gestión*. 2da. S.l.: Argentina.
57. VACCARO Y ANDEVES, 2011. *Innovations in Power Systems Reliability*. 1era. S.l.: Springer, USA.
58. VILLA-CARO, 2003. *Análisis por envoltura de datos (DEA): nuevos modelos y aplicaciones*. 2003. S.l.: Universidad de Sevilla.
59. WOODHOUSE-JHON, 1996. *Criticality Analysis Revisited*. S.l.: UCLV, Cuba.
60. YADAV, 2013. A novel power sector restructuring model based on Data Envelopment Analysis (DEA). *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 1, no. 44, pp. 629-637.
61. YAÑEZ-MEDINA, 2003. Aspectos Generales de Confiabilidad como Soporte del SAM. *Reliability and Risk Management*, vol. Módulo III, pp. 316.
62. YU&LIN, 2008. *Efficiency and effectiveness in railway performance using a multi-activity network DEA model*. 2008. S.l.: s.n.

ANEXOS

Anexo 1. Resumen de las variables de priorización del equipamiento propuestas por los autores

Nº	Fuente	Variables de priorización
1	Fennigkoh& Smith [1989]	- Función del equipamiento;
2	Moussavi&Whitmore [1993]	- Riesgo físico para el paciente/operador;
3	Hertz [1990]	- Histórico de fallas;
		- Necesidad de mantenimiento.
4	Martins, et al. [1990]	- Probabilidad de falla del equipamiento;
		- Probabilidad de que el operador no perciba la falla;
		- Probabilidad de que la falla dañe al paciente;
		- Equipamiento con un MP atrasado.
5	Anderson [1992]	- Grado de urgencia del equipamiento;
		- Grado de dependencia del equipamiento;
		- Grado de utilización del equipamiento;
		- No confiabilidad del equipamiento;
		- No existencia de alternativas;
		- Viabilidad de realización de MP;
		- Costo de reparación.
6	Kendall, et al. [1993]	- Riesgo físico para el paciente/operador;
		- Efectos sobre el tratamiento del paciente;
		- Efecto de la falla del equipamiento en el paciente.
7	Marín [1994]	Prioridad para equipamientos:
		- de soporte de vida;
		- con piezas de vida útil predeterminada;
		- que consumen altos niveles de energía;
		- sujetos a normas de MP.
8	MINAL [1994]	-Costo de implementación
		- Costo por dejar de producir
		- Costo por parada de equipos
		- Costos asociados a existencias de repuestos
9	Moreu de León, Crespo Márquez y Sánchez Herguedas [2000]	- Afectación a la producción
		- Seguridad
		- Efectos en el entorno
		- Disponibilidad requerida por el plan de producción
		- La existencia de equipos de reserva
		- Los costos de reparación
10	Ramírez [1996]	- Riesgo físico para los pacientes/operadores;
		- Requerimientos de mantenimiento (fabricante);
		- Histórico de fallas;
		- Importancia estratégica;
		- Viabilidad de realización del MP.
11	De la Paz Martínez [1996]	- Cantidad de producción
		- Calidad
		- Costo
		- Seguridad
12	Torres [1997]	- Seguridad
		- Calidad
		- Régimen de trabajo

Anexo 1. Continuación...

		- Afectaciones o confiabilidad operacional - Frecuencia de fallas - Costo
13	Capuano y Koritko [1998]	- Riesgo físico para el paciente/operador; - Función del equipamiento; - Consecuencias de la falla; - Histórico de fallas; - Análisis de los costos del ciclo de vida del equipamiento.
14	Sánchez [1997]	- Riesgo físico para los pacientes/operadores; - Dispositivos de protección; - Grado de utilización y razón de uso; - Complejidad del equipamiento; - Régimen de operación; - Requerimiento de mantenimiento (fabricante); - Condiciones de operación;
15	Calil y Teixeira [1998]	- Riesgo físico para el paciente/operador; - Dificultad de prestación de servicios; - Grado de utilización; - Existencia de normas de fiscalización gubernamentales; - Requerimientos de mantenimiento (fabricante).
16	Silva y Pineda [2000]	- Riesgo físico para el paciente/operador; - Características del proyecto; - Condiciones de operación; - Costos de reparación.
17	Wang y Levenson [2000]	- Riesgo físico para el paciente/operador; - Importancia estratégica; - Requerimientos de mantenimiento (fabricante).
18	Bevilacqua y Braglia [2000]	- Seguridad - Importancia del equipo en el proceso - Costo de mantenimiento - Frecuencia de fallos - Tiempo de reparación - Condiciones de operación
19	Huerta Mendoza [2001 y 2006]	- Impacto en seguridad del personal - Impacto ambiente - Nivel de producción - Costos (operacionales y de mantenimiento) - Tiempo promedio para reparar - Frecuencia de falla
20	García Garrido [2003]	- Seguridad y medio ambiente - Producción (pérdidas de producción) - Calidad - Mantenimiento (costos)
21	Murthi [2003]	- Impacto en el proceso de producción Disponibilidad - Productividad funcional - Calidad funcional - Tiempo de reparación (Lead Time) - Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) - Costos de Mantenimiento

Anexo 1. Continuación...

22	García González-Quijano	- Matriz de Riesgo - Probabilidad de Fallo - Consecuencia del Fallo
23	Seifeddine [2003]	- Salud y Seguridad - Integridad Ambiental - Rendimiento - Calidad de producción - Costo de operación y mantenimiento - Frecuencia de la falla
24	Fabro [2003]	- Riesgo ambiental - Riesgo de accidente - Índice de falla (TMEF) - Tiempo para reparación (TMPR) - Costo de mantenimiento - Informatización - Equipo limitante (cuello de botella) - Índice de relación preventivo-correctivo - Índice de monitoreo de las condiciones del equipamiento
25	Cardoso de Moraes [2004]	- Factor de riesgo - Factor de costo - Factor de falla - Importancia del equipo - Factor de mantenimiento - Factor de operación - Factor de proyecto
26	Alsyounf [2004]	- Grupo: Orientado al negocio - Ventajas competitivas a partir de aspectos claves del negocio - Grupo: Los verdes - Salud - Seguridad del medio ambiente - Grupo: Los seguidores - Recomendaciones de los fabricantes
27	Pettersson y Martel [2005]	- Producción - Condiciones medioambientales - Conformidades de salud y seguridad - Viabilidad financiera (costo) - Mantenimiento (recursos disponibles)
28	Espinosa Fuentes [2005]	- Factor de velocidad de manifestación de la falla - Factor de seguridad del personal y ambiente - Factor de costos de la parada de producción - Factor de costos de reparación
29	Zorita, et al. [2006]	- Gravedad (a través del tiempo medio de reparación) - Detectabilidad (a través del tiempo medio de retraso generado) - Ocurrencia (a través de la tasa de fallo)

Anexo 1. Continuación...

30	Torres [2005]	- Influencia sobre producción ☐ Porcentaje de tiempo de uso del equipo ☐ Redundancia o la producción es recuperable con otro equipo - Importancia sobre la calidad ☐ Pérdidas por no cumplir requisitos de calidad ☐ Influencia del equipo en la calidad final del producto - Influencia sobre el mantenimiento ☐ Frecuencia o costo de las averías ☐ Número de horas paradas por mes ☐ Grado de especialización del equipo y personal para atenderlo - Seguridad ☐ Riesgo de las personas ☐ Riesgo de los equipos - Medio ambiente
31	BorrotóPentón [2005]	- Seguridad - Calidad - Afectaciones - Frecuencia de Fallas - Utilización - Tiempo
32	Colombi [2006]	- Seguridad- Mantenibilidad - Medio ambiente - Producción - Clientes - Tiempo de reparación - Capacidad operativa - Frecuencia del fallo
33	Wikoff [2006]	- Misión e impacto en el cliente - Seguridad e impacto ambiental - Habilidad para separar los puntos de fallo - Historia de las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo - Tiempo Medio Entre Fallos (MTBF) o fiabilidad - Probabilidad de fallo - Tiempo de suministro de los repuestos - Valor de reemplazo del activo - Tasa de utilización planificada
34	Christensen[2006]	- Seguridad y medio ambiente - Calidad y productividad - Oportunidad de producción - Tasa de ocupación - Frecuencia de parada - Mantenibilidad
35	Espinosa Fuentes [2006]	- Velocidad de manifestación del fallo - Seguridad del personal y del medio ambiente - Costo de la parada de la producción - Costo de reparación

Anexo 1. Continuación...

36	Braglia, Fantoni y Frosolini [2007]	- Seguridad humana - Impacto medioambiental - Calidad (pérdida de desempeño) - Costo de mantenimiento - Pérdida de producción
37	Alfonso Llanes [2009]	- Seguridad - Calidad - Afectaciones - Frecuencia de Fallas - Utilización - Tiempo - Costo
38	García Garrido [2010]	-Seguridad y medio ambiente -Producción -Calidad -Mantenimiento
39	Amendola [2011]	-Flexibilidad operacional -Efecto del fallo -Coste de reparación - - Seguridad/higiene/ambiente -Frecuencia de fallas

Anexo 2 Correlación entre las variables de entrada y las de salida.

➤ Correlación entre la variable probabilidad y tiempo de reparación

Correlations					probabilidad	tiempo
Spearman's rho	probabilidad	Correlation Coefficient			1.000	-.335*
		Sig. (2-tailed)			.	.013
		N			54	54
		Bootstrap ^c	Bias		.000	.000
			Std. Error		.000	.154
		99% Confidence Interval		Lower	1.000	-.702
				Upper	1.000	.101
	tiempo	Correlation Coefficient			-.335*	1.000
		Sig. (2-tailed)			.013	.
		N			54	54
		Bootstrap ^c	Bias		.000	.000
			Std. Error		.154	.000
		99% Confidence Interval		Lower	-.702	1.000
				Upper	.101	1.000

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

c. Unless otherwise noted, bootstrap results are based on 1000 bootstrap samples

Anexo 2. Continuación...

➤ Correlación entre la variable probabilidad y régimen de trabajo

Correlations					probabilidad	Regimen
Spearman's rho	probabilidad	Correlation Coefficient			1.000	-.299*
		Sig. (2-tailed)			.	.028
		N			54	54
		Bootstrap ^c	Bias		.000	.001
			Std. Error		.000	.132
		99% Confidence Interval		Lower	1.000	-.598
				Upper	1.000	.090
	Regimen	Correlation Coefficient			-.299*	1.000
		Sig. (2-tailed)			.028	.
		N			54	54
		Bootstrap ^c	Bias		.001	.000
			Std. Error		.132	.000
		99% Confidence Interval		Lower	-.598	1.000
				Upper	.090	1.000

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

c. Unless otherwise noted, bootstrap results are based on 1000 bootstrap samples

Anexo 2. Continuación...

➤ Correlación entre la variable probabilidad y frecuencia de fallos

Correlations							probabilidad	frecuencia	
Spearman's rho	probabilidad	Correlation Coefficient					1.000	-.545**	
		Sig. (2-tailed)					.	.000	
		N					54	54	
		Bootstrap ^c	Bias				.000	.006	
			Std. Error				.000	.115	
			99% Confidence Interval	Lower	1.000	-.802			
		Upper		1.000	-.209				
		frecuencia	Correlation Coefficient					-.545**	1.000
			Sig. (2-tailed)					.000	.
			N					54	54
	Bootstrap ^c		Bias				.006	.000	
		Std. Error				.115	.000		
		99% Confidence Interval	Lower	-.802	1.000				
	Upper		-.209	1.000					

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

c. Unless otherwise noted, bootstrap results are based on 1000 bootstrap samples

Anexo 2. Continuación...

➤ Correlación entre la variable costo y régimen de trabajo

Correlations							costo	Regimen	
Spearman's rho	costo	Correlation Coefficient					1.000	.602**	
		Sig. (2-tailed)					.	.000	
		N					54	54	
		Bootstrap ^c	Bias				.000	-.007	
			Std. Error				.000	.094	
			99% Confidence Interval	Lower	1.000	.329			
		Upper		1.000	.801				
		Regimen	Correlation Coefficient					.602**	1.000
			Sig. (2-tailed)					.000	.
			N					54	54
	Bootstrap ^c		Bias				-.007	.000	
		Std. Error				.094	.000		
		99% Confidence Interval	Lower	.329	1.000				
	Upper		.801	1.000					

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

c. Unless otherwise noted, bootstrap results are based on 1000 bootstrap samples

Anexo 2. Continuación...

➤ Correlación entre la variable costo y frecuencia de fallos

Correlations							costo	frecuencia
Spearman's rho	costo	Correlation Coefficient					1.000	.591**
		Sig. (2-tailed)					.	.000
		N					54	54
		Bootstrap ^c	Bias				.000	-.012
			Std. Error				.000	.103
			99% Confidence Interval				Lower	1.000
						Upper	1.000	.796
	frecuencia	Correlation Coefficient					.591**	1.000
		Sig. (2-tailed)					.000	.
		N					54	54
		Bootstrap ^c	Bias				-.012	.000
			Std. Error				.103	.000
			99% Confidence Interval				Lower	.286
						Upper	.796	1.000

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

c. Unless otherwise noted, bootstrap results are based on 1000 bootstrap samples

Anexo 3. Valores de las variables de entrada y salida y sus pesos correspondientes

Equipos	Variables de salida				Variables de entrada					
	Confiabilidad del equipo		Costo		Régimen de trabajo		Frecuencia de fallo		Tiempo de reparación	
	Valor real	Valor del peso	Valor real	Valor del peso	Valor real	Valor del peso	Valor real	Valor del peso	Valor real	Valor del peso
Torno mecánico(1)	0.981	0.4009	1226	0	5	0.2	5	0	2	0
Fresadora vertical	0.982	0.5011	1300	0	4	0.25	4	0	2	0
Fresadora universal	0.992	0.5011	1020	0	4	0.25	5	0	2	0
Recortador	0.989	1.0007	852	0	3	0.250	1	0.2489	0.5	0
Torno especial	0.991	1.0005	640	0	4	0.002	1	0.9992	2	0
Rectificadora plana	0.999	0.5007	1138.2	0	5	0.125	3	0.1245	2	0
Rectificadora cilíndrica	0.993	0.6675	1100	0	4	0.167	2	0.166	2	0
Electro esmeriladora (1)	0.989	1.0022	1505	0	2	0.5	2	0	0.5	0
Afiladora	0.991	1.0007	1315.3	0	3	0.250	1	0.2489	2	0
Frezadora viking	0.992	0.5007	1280.1	0	5	0.125	3	0.1245	2	0
Torno mecánico (2)	0.989	0	1656	0	6	0.166	6	0	2	0
Torno mecánico (3)	0.995	0	1484	0	6	0.102	4	0.0996	2	0
Torno automático	0.998	0	1310	0	8	0.071	6	0.0712	5	0
Segueta mecánica	0.992	1.0004	728.1	0	5	0.001	1	0.9994	0.5	0.0002
Taladro columna	0.991	1	550.3	2.935	4	0.001	2	0.0002	0.5	1.9879
Dobladora de tubo	0.995	1.0005	610.25	0	4	0.002	1	0.9992	0.5	0
Electro esmeriladora (2)	0.998	1.0007	1125	0	3	0.001	2	0	0.5	1.991
Electro esmeriladora (3)	0.999	1.0007	1200	0	3	0.001	2	0	0.5	1.991
Taladro mesa (1)	0.988	0.4235	754.3	122.8	5	0.141	2	0.1404	2	0.0065
Taladro mesa (2)	0.991	0.2963	680	210.4	4	0.097	2	0.2437	2	0.0116

Anexo 3. Continuación...

Prensa 6t (1)	0.994	0.2863	2350	0	7	0.142	7	0	2	0
T 40t	0.998	0.3641	1968.8	0	7	0.091	4	0.0906	2	0
T 100t	0.981	0.5007	2210	0	5	0.125	3	0.1245	2	0
Prensa 4,40t	0.996	0.3083	3209	0	7	0.077	6	0.0767	2	0
Taladro mesa (3)	0.996	0.572	1854.4	0	5	0.143	2	0.1422	2	0
Cizalla pulman (1)	0.998	0.6681	1452	0	3	0.333	3	0	2	0
Cizalla pulman (2)	0.998	0.6681	1768.5	0	3	0.333	3	0	2	0
Cizalla manual	0.999	1.0022	854	0	2	0.5	2	0	0.5	0
Cizalla múltiple	0.995	0.9731	759.35	23.51	3	0.250	1	0.2489	3	0
Torno mecánico Hiller	0.984	1.0004	908	0	6	0	1	1	2	0
Taladro vertical	0.991	0.5562	829	13.44	5	0.143	2	0.1422	2	0
Extractor fusibles	0.991	1.0004	1704	0	7	0	6	0	0.5	2.00
Prensa 5t (1)	0.998	1.0004	2349	0	5	0.001	1	0.9994	2	0
Prensa 5t (2)	0.998	1.0004	2005.2	0	5	0.001	1	0.9994	2	0
Prensa 10t (1)	0.979	1.0004	2312.0	0	6	0	1	1	2	0
Prensa 10t (2)	0.999	1.0004	2100	0	6	0	1	1	2	0
Torno automático A-12	0.994	0.2862	3178.2	0	8	0.071	6	0.0712	3	0
Torno automático A-40	0.995	0.2672	3236	0	8	0.066	7	0.0665	3	0
Prensa 8 t	0.996	0.2863	2580.6	0	7	0.142	7	0	2	0
Prensa16 t	0.991	0.3641	3489.7	0	7	0.091	4	0.0906	3	0
Prensa 40 t	0.997	0.2862	2900.5	0	8	0.071	6	0.0712	3	0
Máquina de cortar tubo (1)	0.997	0.9896	427	7.954	3	0.003	2	0.0011	0.5	2

Anexo 3. Continuación...

Compresor SK-15 T	0.885	0.5724	1215	0	4	0.143	3	0.1424	2	0
Prensa 6.3 t	0.995	0.4009	2050	0	5	0.2	6	0	3	0
Tambora	0.995	1.0005	650.03	0	4	0.002	3	0	0.5	1.9984
Cizalla eléctrica	0.981	0.3337	1066.1	0	8	0.083	4	0.083	4.5	0
Prensa hidráulica	0.981	1.0022	2048.2	0	2	0.5	7	0	2	0
Máquina de cortar tubo (2)	0.990	0.9997	450	0	5	0	2	0	0.5	2
Máquina de cortar alambre	0.997	1.0005	630.1	0	4	0.002	2	0	0.5	1.9984
Prensa 6t (2)	0.998	0.3341	2352	0	6	0.166	6	0	3	0
Prensa 4t	0.998	0.3641	2920.3	0	6	0.091	5	0.0906	3	0
Torno A-20	0.999	0.2863	1960	0	7	0.142	7	0	5	0
Torno automático ATA-125	0.997	0.2672	3145.2	0	8	0.066	7	0.0665	5	0
Torno automático IB-118	0.999	0.2672	3180	0	8	0.066	7	0.0665	5	0

Anexo 4. Clasificación de criticidad por el algoritmo de Alfonso Llanes (2005)

Equipos	Seguridad y medio ambiente	Calidad	Régimen de trabajo	Afectaciones	Frecuencia de fallos	Tiempo de reparación	Costo de reparación	Clasificación
Torno mecánico(1)	2	1	2	2	2	2	2	B
Fresadora vertical	2	2	2	2	2	2	2	B
Fresadora universal	2	2	2	2	2	2	2	B
Recortador	3	1	3	2	3	3	3	B
Torno especial	2	1	2	2	3	2	3	B
Rectificadora plana	3	3	2	2	2	2	2	C
Rectificadora cilíndrica	3	3	2	2	3	2	2	C
Electro esmeriladora (1)	3	2	3	2	3	3	2	C
Afiladora	3	2	3	2	3	2	2	C
Frezadora viking	3	2	2	2	2	2	2	C
Torno mecánico (2)	2	1	1	2	1	2	2	B
Torno mecánico (3)	2	1	1	2	2	2	2	B
Torno automático	2	1	1	1	1	1	1	B
Segueta mecánica	2	2	2	2	3	3	3	B
Taladro columna	3	2	2	2	3	3	3	C
Dobladora de tubo	3	2	2	2	3	3	3	C
Electro esmeriladora (2)	3	2	3	2	3	3	2	C
Electro esmeriladora (3)	3	2	3	2	3	3	2	C

Anexo 4. Continuación...

Taladro mesa (1)	3	2	2	2	3	2	3	C
Taladro mesa (2)	3	2	2	2	3	2	3	C
Prensa 6t (1)	1	1	1	2	1	2	1	B
T 40t	2	2	1	2	2	2	2	B
T 100t	2	2	2	1	2	2	2	B
Prensa 4,40t	2	1	1	1	1	2	1	A
Taladro mesa (3)	2	2	2	2	3	2	2	B
Cizalla pulman (1)	2	1	3	2	2	2	2	B
Cizalla pulman (2)	2	1	3	2	2	2	2	B
Cizalla manual	2	1	3	2	3	3	3	B
Cizalla múltiple	2	1	3	2	3	2	3	B
Torno mecánico Hiller	2	1	1	2	3	2	3	B
Taladro vertical	2	2	2	2	3	2	3	B
Extractor fusibles	2	3	1	2	1	3	2	B
Prensa 5t (1)	1	1	2	2	3	2	1	B
Prensa 5t (2)	1	1	2	2	3	2	1	B
Prensa 10t (1)	1	1	2	2	3	2	1	B
Prensa 10t (2)	1	1	2	2	3	2	1	B
Torno automático A-12	2	1	1	1	1	2	1	A
Torno automático A-40	2	1	1	1	1	2	1	A
Prensa 8 t	1	1	1	2	1	2	1	B
Prensa16 t	1	1	1	1	2	2	1	A

Anexo 4. Continuación...

Prensa 40 t	1	1	1	1	1	2	1	B
Máquina de cortar tubo (1)	3	1	3	2	3	3	3	B
Compresor SK-15 T	2	2	2	1	2	2	2	B
Prensa 6.3 t	2	1	2	2	1	2	1	B
Tambora	1	3	2	2	2	3	3	B
Cizalla eléctrica	1	1	1	2	2	1	2	B
Prensa hidráulica	2	1	3	2	1	2	2	B
Máquina de cortar tubo (2)	2	1	2	2	3	3	3	B
Máquina de cortar alambre	2	1	2	2	3	3	3	B
Prensa 6t (2)	1	1	2	2	1	2	1	B
Prensa 4t	1	1	2	2	2	2	1	B
Torno A-20	2	1	1	1	1	1	2	B
Torno automático ATA-125	2	1	1	1	1	1	1	A
Torno automático IB-118	2	1	1	1	1	1	1	A

Anexo 5. Correlación entre eficiencia y criticidad

Equipos	Criticidad	Eficiencia
Torno automático IB-118	A	0.262
Torno automáticoATA-125	A	0.262
Torno automático A-40	A	0.265
Torno automático A-12	A	0.283
Prensa 6t (1)	B	0.284
Prensa 40 t	B	0.286
Prensa 4,40t	A	0.306
Prensa 6t (2)	B	0.331
Torno mecánico (1)	B	0.331
Cizalla eléctrica	B	0.331
Prensa16 t	A	0.356
T 40t	B	0.362
Prensa 4t	B	0.364
Prensa 8 t	B	0.395
Torno mecánico (2)	B	0.397
Torno mecánico (3)	B	0.399
Prensa 6.3 t	B	0.400
Máquina de cortar tubo(1)	B	0.444
Fresadora universal	B	0.496
Fresadora vertical	B	0.497
T 100t	B	0.498
Torno especial	B	0.555
Compresor SK-15 T	B	0.562
Taladro mesa (1)	B	0.570
Taladro vertical	B	0.571
Prensa 10t (1)	B	0.571
Torno mecánico Hiller	B	0.571
Recortador	B	0.571
Cizalla múltiple	B	0.571
Torno automático	B	0.641
Cizalla pulman (1)	B	0.662
Cizalla pulman (2)	B	0.662
Prensa 5t (1)	B	0.666
Prensa 5t (2)	B	0.666
Torno A-20	B	0.757
Segueta mecánica	B	0.785
Frezadora viking	C	0.795
Rectificadora plana	C	0.795
Taladro mesa (2)	C	0.812
Máquina de cortar tubo(2)	B	0.832
Cizalla manual	B	0.833
Prensa hidráulica	B	0.885
Extractor fusibles	B	0.885

Anexo 6. Continuación...

Taladro mesa (3)	C	0.941
Rectificadora cilíndrica	C	0.948
Tambora	B	0.982
Máquina de cortar alambre	B	0.982
Prensa 10t (2)	B	0.991
Afiladora	C	0.998
Electro esmeriladora (1)	C	0.999
Electro esmeriladora (2)	C	0.999
Dobladora de tubo	C	1.000
Electro esmeriladora (3)	C	1.000
Taladro columna	C	1.000

Anexo 6. Método del discriminante

Casewise Statistics												
Case Number			Highest Group					Second Highest Group			Discriminant Scores	
			Actual Group	P(D>d G=g)		Squared Mahalanobis Distance to Centroid	Group	P(G=g D=d)	Squared Mahalanobis Distance to Centroid	Function 1	Function 2	
				Predicted Group	p							df
Original	1	2	3	.549	2	.797	1.200	2	.203	3.937	-2.090	-.205
	2	3	3	.761	2	.754	.547	2	.246	2.785	-1.774	-.041
	3	2	3	.971	2	.700	.058	2	.300	1.753	-1.367	.279
	4	2	3	.768	2	.807	.527	2	.193	3.386	-1.771	.657
	5	3	3	.546	2	.714	1.209	2	.286	3.041	-.940	1.403
	6	3	3	.843	2	.773	.341	2	.227	2.788	-1.712	.332
	7	2	3	.680	2	.714	.771	2	.285	2.606	-1.708	-.341
	8	2	3	.911	2	.708	.187	2	.292	1.962	-1.492	.085
	9	2	2	.921	2	.611	.165	3	.375	1.141	-.061	.274
	10	2	3	.800	2	.788	.447	2	.212	3.078	-1.598	.796
	11	3	3	.886	2	.720	.241	2	.280	2.131	-1.234	.799
	12	3	3	.852	2	.708	.320	2	.292	2.092	-1.138	.885
	13	2	3	.893	2	.534	.226	2	.465	.506	-.812	-.035
	14	2	2	.130	2	.491	4.083	1	.323	4.922	.980	1.574
	15	2	2	.100	2	.511	4.605	3	.250	6.040	.833	1.800
	16	2	2	.272	2	.569	2.607	3	.364	3.499	.394	1.405
	17	2	3	.878	2	.713	.261	2	.287	2.081	-1.542	.020
	18	3	3	.787	2	.656	.479	2	.343	1.773	-.871	.962
	19	2	2	.328	2	.596	2.229	3	.231	4.128	.750	1.093
	20	2	3	.667	2	.677	.811	2	.323	2.292	-1.585	-.457
	21	2	3	.531	2	.641	1.265	2	.358	2.428	-1.547	-.724

Anexo 5. Continuación...

Prior Probabilities for Groups

Criticidad	Prior	Cases Used in Analysis	
		Unweighted	Weighted
1	.333	6	6.000
2	.333	37	37.000
3	.333	11	11.000
Total	1.000	54	54.000

Classification Results^a

		Criticidad	Predicted Group Membership			Total
			1	2	3	
Original	Count	1	6	0	0	6
		2	3	22	12	37
		3	0	2	9	11
	%	1	100.0	.0	.0	100.0
		2	8.1	59.5	32.4	100.0
		3	.0	18.2	81.8	100.0

a. 68.5% of original grouped cases correctly classified.