

UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
“Oscar Lucero Moya”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

**EVALUACIÓN DE LA CRITICIDAD EN LA ETAPA
CONCEPTUAL DE DISEÑO: CASO DEL CONJUNTO
QUIJADA ESTÁTICA DE LA TRITURADORA DE QUIJADA
TP1-00.00.00.**

MANUEL ALEJANDRO RODRÍGUEZ POZO



HOLGUÍN
2015

UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
“Oscar Lucero Moya”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

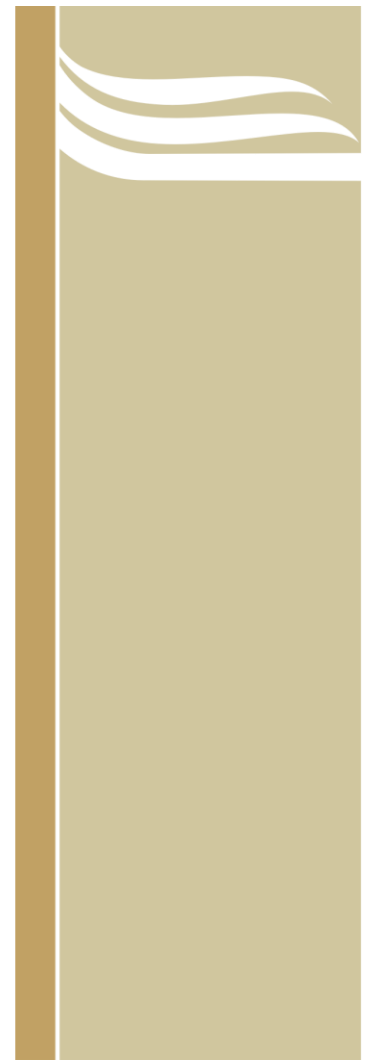
TRABAJO DE DIPLOMA

**EVALUACIÓN DE LA CRITICIDAD EN LA ETAPA
CONCEPTUAL DE DISEÑO: CASO DEL CONJUNTO
QUIJADA ESTÁTICA DE LA TRITURADORA DE QUIJADA
TP1-00.00.00.**

Autor: MANUEL ALEJANDRO RODRÍGUEZ POZO

Tutores: Dr.C. Roberto Pérez Rodríguez
M.Sc. Juan Carlos Oliva Cabrera

HOLGUÍN
2015



DEDICATORIA

Gracias a Dios que siempre me ha ayudado en todos mis planes y propósitos, a mi familia que incondicionalmente me quieren, respetan y han puesto tanto en mi formación como ingeniero.

El autor

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que con su apoyo auxiliaron a que se efectuara con éxito dicho trabajo. En especial a mis tutores y compañeros que tantas horas dedicaron a la realización del mismo.

El autor

RESUMEN

En la actualidad se observa como tendencia la búsqueda de alternativas que garanticen o proporcionen de manera predictiva el comportamiento de un producto mecánico en su etapa conceptual, dando margen a la mejora del diseño antes de su fabricación. El objetivo de la presente investigación es la aplicación **del Método de Diseño Función- Fallo / Criticidad** al conjunto quijada estática de la trituradora de quijada TP1-00.00.00. El método aplicado permitió conocer la criticidad de los elementos que conforman el conjunto de quijada estática, dando así una idea de cómo sería su comportamiento en la producción, basándose en diferentes criterios, factores y experiencias del diseñador. Los resultados de la aplicación del método desarrollado fueron satisfactorios.

ABSTRACT

At present a tendency is observed as the search for alternatives to guarantee or provide predictive way the behavior of a mechanical product in its conceptual stage, making due allowance improving the design before manufacturing. The objective of this research is the application of Function- Failed / Criticality Design Method set to static jaw crusher TP1-00.00.00. The applied method allowed to know the criticality of the elements of the set of static jaw, thus giving an idea of what his behavior in production, based on different criteria, factors and experiences of the designer. The results of the application of the developed method were satisfactory.

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES | 7 |
| 1.1. Principales modelos del proceso de diseño | 7 |
| 1.2. Análisis del diseño, en función del diseño conceptual..... | 8 |
| 1.2.1. Etapa del Diseño Conceptual..... | 9 |
| 1.3. Metodología de diseño utilizada por las empresas mecánicas del territorio | 11 |
| 1.3.1. Consideraciones sobre las metodologías de diseño empleadas por las empresas mecánicas del territorio | 14 |
| 1.4. Métodos de identificación de fallos | 15 |
| 1.4.1. Análisis del modo y efecto de falla (AMEF) | 16 |
| 1.4.2. El AMEF y el EMFAC | 16 |
| 1.4.3. Análisis del Árbol de Defectos (AAD o FTA) | 17 |
| 1.4.4. Método de Diseño Función -Fallo (MDFF o FFDM) | 17 |
| 1.4.5. Método de DiseñoFunción –Fallo/Criticidad (MDFF/C) | 18 |
| 1.4.5.1 Etapas generales para el desarrollo del Método Diseño Función – Fallo/Criticidad | 19 |
| 1.4.5.2 Proceso de generación de las matrices por el MDFF | 20 |
| 1.4.5.3 Método para determinar la criticidad de los sistemas | 24 |
| 1.4.5.4 Generador de la matriz en función de los criterios para la criticidad.... | 25 |
| 2. APLICACIÓN DEL MÉTODO FUNCIÓN-FALLO/CRITICIDAD AL CONJUNTO QUIJADA ESTÁTICA DE LA TRITURADORA DE QUIJADA TP1- 00.00.00..... | 29 |
| 2.1 Caracterización Técnica de la Trituradora de Quijada TP1-00.00.00..... | 29 |
| 2.2 Determinación de los vectores: función, componente y modo de fallo..... | 31 |
| 2.3 Generación de las matrices Función– Componente y Componente–Fallo. | 33 |
| 2.4 Determinación del vector Criterio (K) | 35 |
| 2.5 Generador de la nueva matriz en función de los criterios para la criticidad | 35 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.6 | Análisis de los resultados..... | 37 |
| 2.6.1 | Determinación del fallo más crítico | 38 |
| 2.6.2 | Determinación del componente más crítico | 39 |
| 2.6.3 | Funciones organizadas según el nivel de criticidad | 41 |
| | CONCLUSIONES | 42 |
| | RECOMENDACIONES | 43 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 44 |
| | ANEXOS | 46 |

INTRODUCCIÓN

“En el contexto actual, con el aumento de los volúmenes de producción y la complejidad de los procesos productivos, las tareas de creación o generación de nuevos conceptos han obtenido una mayor atención. Por ello, se comenzaron a desarrollar una serie de técnicas que agilizan el proceso de generación de conceptos y aumentan la calidad, no solo de la documentación técnica, sino la del producto final” [1].

A través de las diversas investigaciones realizadas al proceso de diseño se ha determinado que la gran mayoría de los gastos y los problemas son generados en el desarrollo de un producto, y que tales gastos pueden ser determinados durante la etapa de **diseño conceptual**. Actualmente las operaciones de identificación de estos problemas como son: Modo de Fallas y Análisis de Efectos (MFAE), Efecto de Modos de Fallo y Análisis de Criticidad (EMFAC), Anticipación a los Fallos Potenciales (AFP) y el diseño de los experimentos están siendo aplicados para el control de la calidad y para la detección de los modos de fallos potenciales durante el escenario de diseño de detalle o lanzamiento del producto.

Sin embargo, todos estos métodos solo pueden utilizarse en la etapa de diseño del detalle y no en la etapa del diseño conceptual, que es donde se pueden detectar la mayoría de los problemas relacionados con el diseño de una máquina.

Para superar este proceso del análisis de fallos, se creó el Método de Diseño Función - Fallo (MDFF), para permitir que el análisis del error sea llevado a cabo en las primeras etapas del proceso de diseño con la utilización de bases de conocimientos de fallos históricamente archivadas.

El MDFF permite que los diseñadores lleven a cabo la tarea del análisis de fallos en la etapa de diseño conceptual, usando vocabularios normalizados que descarten la ambigüedad del proceso. Llevando a cabo el análisis de fallos a comienzos del proceso de diseño, se pueden evitar los rediseños costosos ya que se evitan los fallos antes de la materialización física del mismo [2].

Al aplicarle un análisis de criticidad al método anterior se está generando un nuevo método que tiene en cuenta el análisis de la criticidad de los modos de fallos, que se le denomina **Método de Diseño Función- Fallo/ Criticidad (MDFF/C)**. Este se aplica en igual medida en el diseño conceptual [9].

En Cuba, específicamente en la provincia Holguín, se encuentra ubicado el Centro de Desarrollo de la Maquinaria Agrícola (CEDEMA), el cual es un referente en el país debido a sus diseños y estudios. Entre sus productos se encuentran las cosechadoras de caña, las cosechadoras de sal sobre esteras y neumáticos, los transportes intermedios para el arroz, la fabricación de equipos para las construcciones como los molinos de martillo y trituradoras de quijada, entre otros.

Es meritorio destacar el trabajo de directivos y diseñadores a lo largo de los años, sin embargo, según la recopilación de datos analizados se detecta que en este centro no se introducen los procesos de mantenimiento en las primeras etapas del diseño, lo que trae como consecuencia una menor calidad y mayores gastos de mantenimiento.

Lo anteriormente expuesto permite identificar como **problema de la investigación** la ausencia de criterios evaluativos relacionados con el mantenimiento en el diseño conceptual de la trituradora de quijada TP1-00.00.00 del Centro de Desarrollo de la Maquinaria Agrícola (CEDEMA).

Como **objeto de estudio** se define: el diseño de la trituradora de quijada TP1-00.00.00 y como **campo de acción** la mantenibilidad en la fase del diseño conceptual de este tipo de máquinas.

De lo anteriormente planteado se determina entonces como **hipótesis de la investigación**: la aplicación de un método que permita incorporar, en el proceso de diseño conceptual de la trituradora de quijada TP1-00.00.00, criterios evaluativos relacionados con la criticidad, permitirá determinar los fallos potenciales para las diferentes variantes de diseños.

Así mismo se define como **objetivo general** de la investigación, aplicar un método que permita evaluar la criticidad en la etapa conceptual de diseño de la trituradora de quijada TP1-00.00.00 perteneciente al Centro de Desarrollo de la Maquinaria Agrícola (CEDEMA).

Se resumen como **tareas científicas** de la investigación:

- Análisis de los métodos que permitan determinar las fallas en las etapas tempranas del diseño, así como la mantenibilidad de las máquinas.
- Aplicación de un método que permita evaluar la criticidad en la etapa conceptual de diseño de la trituradora de quijada TP1-00.00.00.
- Análisis los resultados obtenidos del método.
- Desarrollar un informe final.

Como **resultados esperados** se plantea obtener resultados que permitan incorporar en el diseño conceptual de la trituradora de quijada TP1-00.00.00, criterios relacionados a la criticidad del mantenimiento.

Los **métodos científicos** utilizados en el desarrollo de la investigación fueron:

Métodos teóricos:

- Histórico – lógico: para conocer la evolución y desarrollo del objeto de investigación.
- Análisis y síntesis: para distinguir los distintos elementos o partes del todo (sistema u objeto sujeto a investigación), analizándolos por separado para determinar sus relaciones y partiendo de esta base, sintetizar los resultados del análisis.

Métodos empíricos:

- Criterio de expertos: se realizaron entrevistas, no estructuradas, a diseñadores de la trituradora de quijada TP1-00.00.00.
- Observación científica: se puso en práctica al observar las condiciones reales de trabajo de la trituradora de quijada TP1-00.00.00.

La tesis consta de una introducción, dos capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES

En este capítulo se abordan los aspectos teóricos esenciales para el tratamiento de la mantenibilidad en el diseño conceptual de máquinas.

1.1. Principales modelos del proceso de diseño

Una de las actividades más apasionantes, y a menudo más complejas, dentro de la ingeniería es el proceso de creación o diseño de un producto o una máquina a partir de unas funciones y de unas prestaciones previamente especificadas.

Pahl y Beitz[3] definen al diseño como una actividad que afecta a casi todas las áreas de la vida humana, utiliza leyes de la ciencia, se basa en una experiencia especial y define los requisitos para la realización física de la solución.

Según Ullman[4], es la evolución de la formulación de un problema, asistida por la toma de decisiones en la etapa preliminar, que parte de información tecnológica y social, donde las representaciones abstractas evolucionan hacia un producto físico.

Según Mistree[5], el diseño comienza por un proceso de conversión de la información relacionada con las ideas y exigencias para un producto y termina en un conocimiento más exacto sobre el mismo.

Concebir un producto consiste en transformar una idea, en la definición de las características de un objeto que satisfagan la misma y en la determinación de sus modalidades de fabricación. El producto pasará por una serie de etapas que van desde su concepción a nivel conceptual hasta su reciclaje una vez concluida su vida útil. El diseño, en tanto que es una actividad creativa e iterativa, es un proceso de transformación que provoca el cambio de estado de un producto.

En la Tabla 1.1 se muestran las principales escuelas de diseño y dentro de ellas los autores más importantes.

Tabla 1.1. Desarrollo actual de las escuelas de diseño (2002 – 2015).

| Autor | Trabajo o Metodología | País | Año |
|--------------|--|-------------|------------|
| Riba | Diseño concurrente | España | 2002 |
| Chaur | Diseño conceptual de productos asistido por ordenador: Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa | España | 2005 |
| Saiz | Cómo potenciar la generación de nuevas ideas en la fase creativa | España | 2005 |
| León | Metodología para la detección de requerimientos subjetivos en el diseño de producto | España | 2005 |
| Pahl/Beitz | Diseño en Ingeniería | Alemania | 2007 |
| Moreira | Modelado y desarrollo de un modelo computacional de síntesis interactivo y multirrelacional para guiar la actividad de diseño en la fase conceptual | España | 2007 |
| Ferrer | Contribución metodológica en técnicas de diseñar para fabricación | España | 2007 |
| Ullman | Proceso de Diseño Mecánico | EE.UU | 2009 |

Fuente: Morales, 2012

1.2. Análisis del diseño, en función del diseño conceptual.

Definir un proceso para llegar a un diseño completamente perfecto, en donde el cliente y el diseñador estén satisfechos es difícil o a veces hasta imposible llegar, sin embargo existen ciertos puntos en los que debemos de poner atención para que la interacción con el cliente sea más efectiva, eficaz y satisfactoria.

El proceso de diseño se basa en la idea de que este puede expresarse en cuatro niveles de definición, que determinan los resultados de cada una de las etapas sucesivas. La primera etapa define las especificaciones del producto. La segunda etapa es el diseño conceptual. La tercera se denomina diseño de materialización y como última etapa el diseño de detalle. De estas etapas es solamente meritoria

para nuestra investigación el diseño conceptual.[9]

1.2.1. Etapa del Diseño Conceptual

Cuando se trabaja bajo el análisis conceptual de una situación, nos referimos a la abstracción de hechos reales de los cuales se emite un concepto o es posible hacer una idea de ello. Para poder realizar la abstracción de un tema en un área específica, es necesario tener los requerimientos funcionales que deberán tener el equipo o máquina a fabricar. Estos requerimientos contienen el conjunto de hechos y reglas que dan pauta a la creación del esquema conceptual donde por medio de este se podrá realizar una descripción de alto nivel de la tarea en cuestión.

El **Diseño Conceptual** no es más que la representación gráfica de una representación mental de un objeto o máquina que dependerá de un grupo de informaciones previas o cultura del diseño. Según Pahl y Beitz, después de terminar la fase de clarificación de la tarea, la fase de diseño conceptual determina el principio de solución. Esto se logra resumiendo los problemas esenciales, estableciendo las estructuras de funciones, buscando los principios básicos apropiados y luego combinando esos principios en una estructura de trabajo. El diseño conceptual resulta en la especificación de un principio de solución (el concepto). La representación de un principio de solución puede tomar diversas variantes. Para componentes básicos, una representación esquemática en forma de una estructura funcional, un diagrama de circuito o un diagrama de flujo podrían ser suficientes. En otros casos un bosquejo podría ser más apropiado, y a veces es necesario un dibujo a escala preliminar. [9]

La fase de diseño conceptual (Figura 1.1) consta de diversas etapas, ninguna debe ser pasada por alto. En la fase de diseño básico y luego en el diseño de detalle es sumamente difícil o imposible corregir los defectos implícitos en el principio de solución. Una buena solución se obtiene generalmente a partir del resultado de la elección de los principios de solución más apropiados. Esta afirmación no está en contradicción con el hecho de que los problemas pueden

aparecer durante la etapa de diseño de detalle, incluso utilizando los principios de solución más prometedores.

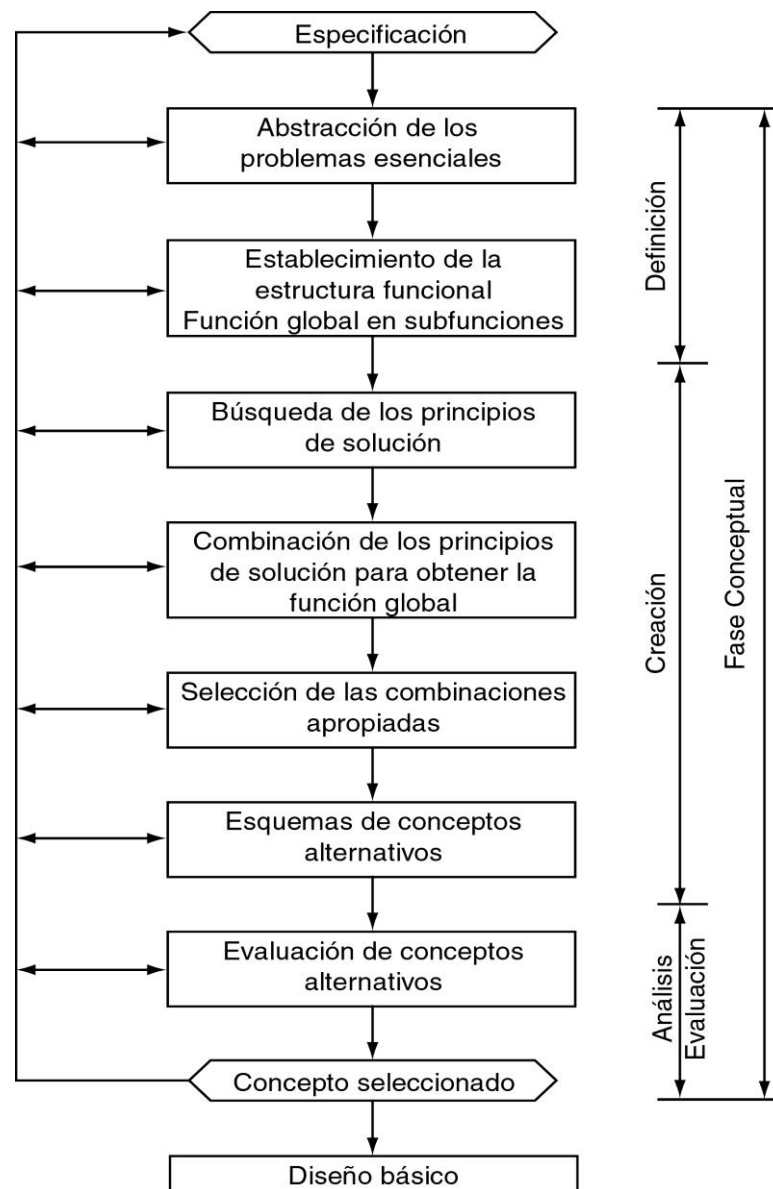


Figura 1.1. Fases de la etapa de diseño conceptual [9].

Luego continúa la valoración de las variantes de solución. Las variantes que no satisfacen las demandas de los requerimientos deben ser modificadas o eliminadas; el resto debe ser evaluado por la aplicación metódica de criterios específicos. Durante esta fase, los criterios principales son de una naturaleza

técnica, aunque los criterios económicos preliminares también son importantes. Sobre la base de esta evaluación, se selecciona el mejor concepto.[9]

Las actividades de diseño conceptual son las que obtienen más beneficios de los equipos de diseño pluridisciplinarios y de las decisiones compartidas. El gestor del proyecto, además de participar en las tareas colectivas, tiene también la tarea de preparar las reuniones y de obtener o generar la información [6].

1.3. Metodología de diseño utilizada por las empresas mecánicas del territorio

La Empresa de Implementos Agrícolas “Héroes del 26 de Julio” y la Empresa de Combinadas Cañeras “60 Aniversario de la Revolución de Octubre” poseen similares metodologías de diseño. Las mismas han sido modificadas en los años 2009 y 2011 respectivamente.

Estas empresas poseen un Sistema de Gestión de la Calidad pero el mismo no está certificado. Incluye los procedimientos de diseño, desarrollo y fabricación de un producto, donde el papel protagónico lo desempeñan las etapas de fabricación, al ser estas empresas en su gran totalidad dedicadas a esta esfera.[8].

Por su parte, la ejecución del diseño o desarrollo en estas empresas se inicia de acuerdo con las siguientes posibilidades: (a) A solicitud de un cliente potencial, (b) A solicitud de organismos superiores; o (c) Por decisión interna de la empresa. En los dos primeros casos, la “Solicitud de diseño o desarrollo” se presenta al Grupo de Negocios y el jefe de esta área la remite al Grupo de Tecnología y Desarrollo para su evaluación. Este examina la solicitud y remite sus conclusiones al Director Técnico, quien la acepta o deniega y la devuelve al Grupo de Tecnología y Desarrollo para desarrollar el trabajo.

Cuando se trata de una decisión interna de la empresa, la solicitud la presenta directamente el Director Técnico, quien la entrega al Grupo de Tecnología y Desarrollo o al grupo técnico del área que va a desarrollar el trabajo.

En ambas empresas luego de aceptar el proyecto o servicio de diseño el Jefe del Grupo de Ingeniería y Desarrollo elabora la planificación, tomando en

consideración las etapas de desarrollo del producto, reflejando en el registro “Planificación del Diseño” como son: la tarea técnica, el anteproyecto, la documentación de trabajo, la verificación, el prototipo y la validación (Figura 1.2).

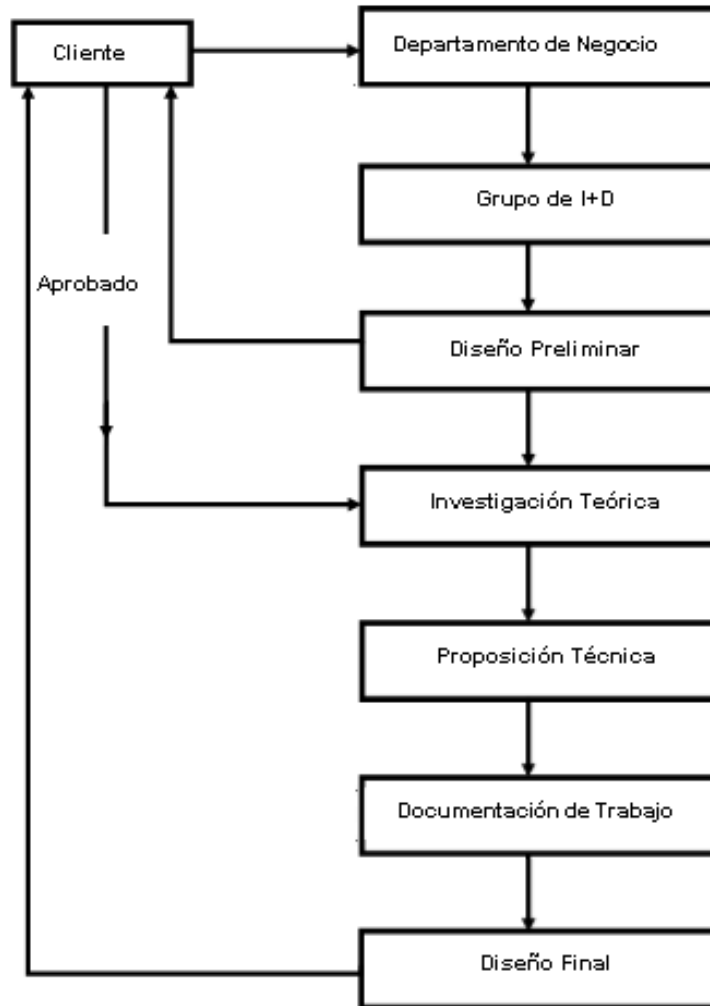


Figura 1.2. Metodología de diseño utilizada por las empresas de la industria metal mecánica del territorio.

En el Centro de Desarrollo de la Maquinaria Agrícola (CEDEMA) está implementado un Sistema de Gestión de la Calidad certificado que satisface los requisitos establecidos en la NC-ISO 9001:2008, el cual integra el factor ecológico al proceso de diseño de máquinas agrícolas, con el objetivo de reducir los costos, aumentar el valor de los equipos y máquinas que se diseñan, así como su calidad

y competitividad.

Una vez hecha la solicitud del proyecto de investigación y desarrollo o servicio de diseño al Grupo de Servicios Técnicos, por parte de un cliente potencial u organismos superiores por medio de una Tarea Técnica, el jefe de esta área la remite al Grupo de Investigación y Desarrollo el cual la analiza en su consejo científico. Este examina la solicitud y envía sus conclusiones al jefe de Negocios. Si la solicitud procede, entonces comienza el procedimiento de investigación y desarrollo a partir de la Planificación y Gestión de los Proyectos donde se lleva a cabo las Instrucciones de Trabajo.

En la guía para la propuesta del proyecto de investigación y desarrollo se deben plasmar el título del programa, el título del proyecto, la clasificación del proyecto, el nombre y dirección de la institución ejecutora principal del proyecto, el organismo al que pertenece, la dirección, el teléfono, el correo, el nombre, apellidos y categoría científica del jefe del proyecto, otras instituciones participantes, organismo al que pertenece, dirección, fax, teléfono, correo, posibles clientes, beneficiarios identificados, duración, presupuesto total, resumen del proyecto y por último, un cronograma de ejecución del mismo.

En la investigación teórica se realizan varias acciones, como pueden ser la búsqueda de patentes, antecedentes y el estado actual del proyecto a ejecutar en el mundo y en el país, así como un análisis de las necesidades. En la proposición técnica es donde se analizan y comparan las diferentes variantes de diseño y de soluciones técnicas, seleccionándose la variante óptima con relación a la fiabilidad, seguridad y protección del trabajo, posibilidades tecnológicas de producción, ventajas técnico económicas y productivas, ventajas con respecto al ahorro de materiales y recursos energéticos, ergonomía, tendencias y perspectivas del desarrollo. Luego de seleccionar la variante a proponer, al cliente se le elabora el documento del proyecto, el que incluye el esquema de los principios de funcionamiento (cinemático, eléctrico, hidráulico y otros).

En la documentación de trabajo se elabora la documentación de proyecto donde se incluyen los planos de las piezas, los ensambles, la vista general, las especificaciones técnicas, la nómina de artículos de compra (NAC), y la nómina de las especificaciones técnicas (NET). Una vez realizada la corrección de la documentación de proyecto, se incluyen además el plano de montaje, el plano de montaje eléctrico, hidráulico, el plano de cementación y el plano de transportación.

En la atención a la fabricación se controlan los materiales de las piezas de importancia y sus tratamientos térmicos. Se realiza una comprobación de las masas y centros de masas. Se diseñan los utillajes tecnológicos para fabricar el prototipo. Si existen modificaciones durante la fabricación del prototipo se realiza el control de los cambios de diseño.

En la revisión y verificación del diseño se presenta el proyecto y la entrega de la documentación. Se hace un análisis interno de la documentación, realizando la revisión conjunta del diseño y por último, se elabora el informe final. Para realizar el proceso de validación del diseño, se realizan pruebas de campo y se registran los datos e incidencias ocurridas en el terreno.

Si el diseño precisa de cambios, se realizan las siguientes operaciones: al recibir las recomendaciones a realizar en las etapas del diseño correspondiente, se ejecutan los cambios del mismo y se asientan en el formulario Notificación de modificaciones. Luego el informe aprobado se archiva en la carpeta correspondiente, concluyendo así, las etapas del proceso de diseño.

1.3.1. Consideraciones sobre las metodologías de diseño empleadas por las empresas mecánicas del territorio

En las metodologías consultadas no existen diferencias con respecto a los tipos de diseños a utilizar (diseño de variante, diseño de adaptación, diseño original). No cuentan además, con criterios de mantenimientos vinculados a los estudios iterativos de compromiso del diseño, algunos de los cuales pueden ser requeridos antes de elegir el diseño óptimo. Con el fin de suministrar buenos resultados, los

análisis no se basan en un concepto de mantenimiento establecido en paralelo con la optimización del diseño [8].

Se observa una notable diferencia en el nivel de profundidad conceptual. No se aplican métodos de identificación de fallos en el proceso de diseño, dando lugar a rediseños costosos. El diseñador es responsable del cumplimiento de los requisitos operativos incluyendo los requisitos de mantenibilidad para el mismo, dentro de los límites usuales de plazo y costos. Con el fin de satisfacer estos requisitos, la mantenibilidad no se especifica al principio del proceso de diseño, por lo que en esta etapa no se realizan los estudios de mantenibilidad necesarios.

1.4. Métodos de identificación de fallos

Las consecuencias de una falla pueden ir desde la pérdida de producción, pasando por las horas hombre improductivas de operaciones, hasta la degradación y rotura de las propias máquinas. Una falla ocurre cuando la pieza queda completamente inservible, cuando a pesar de que funciona no cumple su función satisfactoriamente, o cuando su funcionamiento es poco confiable debido a las fallas y, por tanto, presenta riesgos [8].

El surgimiento de una falla puede estar determinado por una mala orientación durante la etapa de diseño, el no análisis de las condiciones a la que está sometido el equipo o máquina, o a la mala manipulación del personal responsable.

Existen diversos métodos para determinar el fallo entre los que se pueden mencionar: Análisis de Modo de Fallo y sus Efectos (AMEF), Método de Efecto de los Modos de Fallo y Análisis de Criticidad (EMFCA), Análisis del Árbol de Defectos (AAD), Método de Diseño Función - Fallo (MDFF), Método de Diseño Función - Fallo/Criticidad (MDFF/C), los cuales se abordarán brevemente a continuación.

1.4.1. Análisis del modo y efecto de falla (AMEF)

El AMEF es un proceso sistemático para la identificación de las fallas potenciales del diseño de un producto o de un proceso antes de que éstas ocurran, con el propósito de eliminarlas o de minimizar el riesgo asociado a las mismas [10].

De acuerdo a Gotera es un método que nos permite determinar los modos de fallas de los componentes de un sistema, el impacto y la frecuencia con que se presentan. De esta forma se podrán clasificar las fallas por orden de importancia, lo que permite directamente establecer tareas de mantenimiento en aquellas áreas que están generando un mayor impacto económico, con el fin de mitigarlas o eliminarlas por completo [11].

Es utilizado habitualmente por empresas manufactureras en varias fases del ciclo de vida del producto, y recientemente se está utilizando también en la industria de servicios. Las causas de los fallos pueden ser cualquier error o defecto en los procesos o diseño, especialmente aquellos que afectan a los consumidores, y pueden ser potenciales o reales. El término análisis de efectos hace referencia al estudio de las consecuencias de esos fallos.

1.4.2. El AMEF y el EMFAC

El Análisis de Modos de Falla y Efectos, AMEF (FMEA, por sus siglas en inglés), en combinación con una calificación o jerarquización del grado de criticidad del riesgo, es normalmente empleada para la planeación del mantenimiento centrado en confiabilidad, ya que nos permite lograr un entendimiento global del sistema, así como del funcionamiento y la forma en la que pueden presentarse las fallas de los equipos que componen este sistema. Las acciones de recomendación derivadas de un FMECA o AMFEC quedan definidas como acciones o tareas de mantenimiento. Lo que permite diseñar una estrategia completa de mantenimiento aplicando criterios de riesgo para cada activo o equipo considerado en la evaluación, para de esta forma poder evaluar el impacto del plan de mantenimiento en el riesgo de la instalación, así como también, asegurar que el

plan de mantenimiento es aplicado en los equipos que representan un mayor riesgo para las personas, medio ambiente, producción e instalación.[9]

Como resultado, el AMEF/EMFCA es utilizado en las etapas más avanzadas del ciclo de vida del producto, donde el costo de cambios en el diseño o modificaciones puede ser enorme. Además de que el proceso AMEF/EMFCA es tedioso y consume mucho tiempo, requiere de un conocimiento experto detallado de la estructura y función del sistema bajo consideración. Una debilidad fundamental del AMEF es la carencia de un lenguaje natural de los modos de fallo [12].

1.4.3. Análisis del Árbol de Defectos (AAD o FTA)

El FTA fue desarrollado por ingenieros para mejorar la seguridad de los sistemas de misiles. Entendieron que la mayoría de accidentes/incidentes resultan de fallas inherentes a un sistema.

El motivo principal del análisis árbol de falla es el ayudar a identificar causas potenciales de falla de sistemas antes de que las fallas ocurran. También puede ser utilizado para evaluar la probabilidad del evento más alto utilizando métodos analíticos o estadísticos. Estos cálculos envuelven sistemas de relatividad cuantitativos e información de mantenimiento tal como probabilidad de falla, tarifa de falla, y tarifa de reparación. Después de terminar un FTA, puede enfocar sus esfuerzos en mejorar el sistema de seguridad y relatividad.[9]

1.4.4. Método de Diseño Función -Fallo (MDFF o FFDM)

El Método de Diseño Función - Fallo (MDFF o FFDM), desarrollado por Tumer y Stone, utilizan la base de conocimientos estandarizados donde los modos de fallo pueden ser obtenidos sobre la base de la funcionalidad del componente y a un vocabulario funcional normalizado. Como en el AMEF/EMFCA y el AAD, el conocimiento detallado y el entendimiento de los sistemas que son considerados es requerido para construir la base del conocimiento del DFF, pero la ventaja de utilizar este método es que una vez que la información ha sido almacenada en

esta base de conocimientos, la información detallada puede ser usada y recuperada por los diseñadores de menos experiencia [9].

En particular para este método el diseñador necesita una matriz elemental entre Función - Componente (EC) y otra Componente - Fallo (CF). La base de conocimientos de función- fallo, también conocida como matriz elemental de Función- Fallo (EF), existe como un resultado computado de estas primeras dos matrices y es desarrollado a través del proceso detallado por Stone [9].

Dentro de (EF), las filas representan la función y las columnas representan los modos de fracaso. Las anotaciones en la matriz, la ef_{ij} , demuestran el número de componentes distintos que solucionan la función i que han fallado por el modo de fallo j . El proceso de poblar la base de conocimientos de una función-fallo, comienza obteniendo la información del fallo verdadero de un producto. La información del fallo es investigada para condicionar el componente fallido y el modo de fallo. Un modelo funcional para el componente fallido es desarrollado luego en un nivel detallado. [9]

Las sub-funciones del modelo funcional detallado son entradas en la matriz de (EC) entonces y a través del cálculo son correlacionadas a su respectivo modo de fallo y añadidas a la base de conocimientos función-fallo. Cuando los componentes que más fallan son añadidos a la base de conocimientos, la distribución de ocurrencias de modo de fallos, puede ser usado para determinar qué modos de fallo puede aparecer, más a menudo, que otros para cada función. Una base de conocimientos apropiada para el DFF debe contener la información de fallos para muchas sub-funciones con el propósito de que pueda ser usado para nuevos diseños que abarcan el mismo rango de funcionalidad [14, 15].

1.4.5. Método de Diseño Función –Fallo/Criticidad (MDFF/C)

En este método al igual que en el MDFF, se debe obtener una matriz elemental entre Función - Componente (EC) y otra Componente - Fallo (CF). Luego se obtiene una base de conocimiento de función- fallo, también conocida como matriz

elemental de Función - Fallo (EF), que es el resultado computado de estas primeras dos matrices.

Cuando los componentes que más fallan son añadidos a la base de conocimientos, la distribución de ocurrencias de modo de fallos, enfrente a las funciones, pueden ser usados para determinar qué modos de fallo pueden aparecer más a menudo, para cada función. Una base de conocimientos apropiada para el MDFF debe contener la información de fallo para numerosas sub-funciones con el propósito de que pueda ser usado para nuevos diseños que abarquen el mismo rango de funcionalidad [14].

La matriz Función- Fallo es utilizada por los diseñadores como mecanismo para generar conceptos en la etapa conceptual de diseño obteniendo mejores variantes en los diseños finales. Este método puede manejar el criterio de posibilidad de ocurrencia de un fallo y no directamente la ocurrencia del mismo.

Para integrar la criticidad a este método, se parte de la matriz Función - Fallo obtenida con la metodología de Stone y a partir de ésta, se unen las funciones con los fallos, para que formen parte de las filas de la nueva matriz Función\Fallo – Criterios (EF-K). Estos criterios son los que se tendrán en cuenta para evaluar la criticidad y así poder dar un orden jerárquico a las soluciones de la matriz Función – Fallo original.[9].

1.4.5.1 Etapas generales para el desarrollo del Método Diseño Función – Fallo/Criticidad

El Método de Diseño Función – Fallo / Criticidad como se explicó anteriormente parte de la base de funcionamiento del MDFF.

El objetivo del MDFF es superar las herramientas de análisis de fallos previas, con el propósito de que pueda ser extensamente aplicable, incluso en el diseño conceptual. El MDFF está conformado por un procedimiento sencillo, no usa ninguna clasificación subjetiva y utiliza vocabularios usuales. Estos rasgos permiten que el MDFF sea fácil de usar, obviando la ambigüedad de herramientas

de análisis de fallos previas.

El MDFF también brinda beneficios ya que no requiere de especialistas en un tema en específico y está basado en la información de ocurrencia de fallos [14].

1.4.5.2 Proceso de generación de las matrices por el MDFF

En particular para este método (Figura 1.3), el diseñador necesita una matriz elemental entre Función- Componente (EC) y otra Componente - Fallo (CF). La base de conocimiento de la matriz función- fallo, también conocida como matriz elemental de Función- Fallo (EF), existe como un resultado computado de estas primeras dos matrices [9].

Para llegar a estas matrices es necesario inicialmente partir de un conjunto de definiciones y valores tabulados que han sido llevados a un lenguaje universal para ser usado en cualquier caso de diseño de máquinas.

En el Anexo 2 se muestra la propuesta de Collins para caracterizar los modos de fallos en tres grupos generales [19, 20].

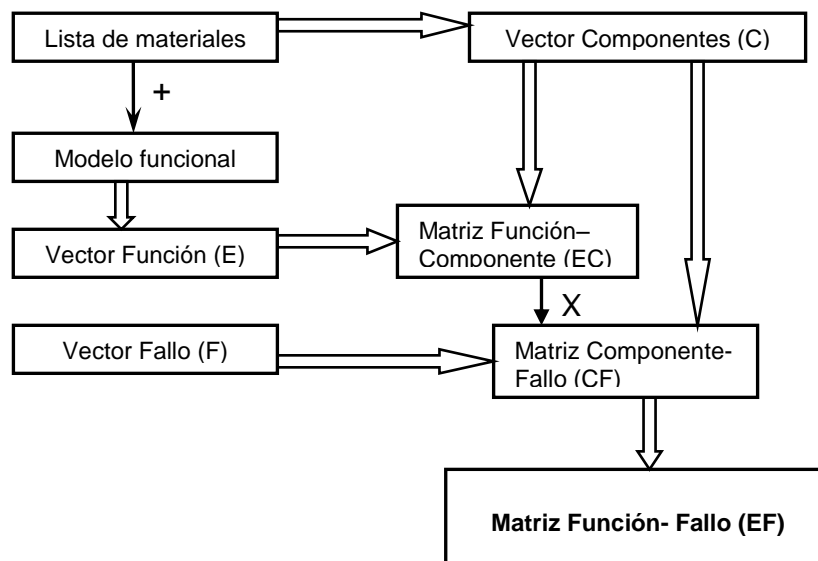


Figura 1.3. Diagrama de flujo del proceso de creación de las matrices [9].

Después de consultar las tablas normalizadas mencionadas anteriormente se procede a construir los vectores que intervienen en la metodología (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Ejemplo de vector Modo de Fallos (F) según Morales [9].

| Modo de Fallo | |
|---------------|---------------------|
| F1 | Corrosión |
| F2 | Fatiga |
| F3 | Humano |
| F4 | Desgaste |
| F5 | Fracturas |
| F6 | Tensiones de rotura |
| F7 | Tensiones térmicas |
| F8 | Debilitamiento |

En este vector se relacionan todos los diferentes modos de fallos que se pueden mostrar en un sistema o máquina, que pueden provenir de un archivo histórico o base de datos en el caso que exista una máquina similar o se rediseñen partes defectuosas. De lo contrario se toman las bases de conocimiento existentes que puedan ser usadas como objeto de estudio. De igual manera, se relacionan los componentes que forman parte del sistema o máquina estudiada (Tabla 1.3).

Tabla 1.3. Ejemplo de Vector Componente (C) según Morales [9].

| Componentes | |
|-------------|-----------|
| C1 | Chumacera |
| C2 | Rotor |
| C3 | Tapa |
| C4 | Eje |
| C5 | Pasador |
| C6 | Compresor |
| C7 | Discos |
| C8 | Cuchillas |
| C9 | Motor |
| C10 | Mangueras |

Por último, se relaciona el vector Función (E) el cual es el más complejo, ya que debe salir de las bases de conocimiento de funciones, donde se muestran las funciones particulares para cada componente. Estas se ven como separadas pero pertenecen directamente a los componentes. Es decir, este vector función es más cómodo verlo directamente en la matriz Función – Componente, que las relaciona en las filas y los componentes de las columnas (Tabla 1.4)[9].

Tabla 1.4. Matriz Función – Componente (EC)según Morales [9].

| Nombre del producto | | | | | | | | | | |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Función \ Componente | Componente 1 | Componente 2 | Componente 3 | Componente 4 | Componente 5 | Componente 6 | Componente 7 | Componente 8 | Componente 9 | Componente 10 |
| Función 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| Función 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Función 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Función 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Función 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Función 6 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Función 7 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Función 8 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |

Como se puede apreciar, el interior de la matriz se completa con la función Booleana “True and False” es decir solamente se relaciona con “0” si no tienen relación y con “1” si tienen relación las funciones con los componentes, esto puede ser tomado de la experiencia de los diseñadores. Seguidamente a esta, y con los vectores anteriormente relacionados, se procede a crear la matriz Componente-Fallo (CF) la cual tendrá en las columnas los fallos y en las filas los componentes y que de igual manera su interior es completado con “0” en el caso que no sucede el fallo al componente y con “1” cuando sucede el fallo al componente (Tabla 1.5) [9].

Tabla 1.5. Matriz Componente- Fallo (CF)según Morales [9]

| Nombre del producto | | | | | | | | | |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Componente \ Fallo | Fallo 1 | Fallo 2 | Fallo 3 | Fallo 4 | Fallo 5 | Fallo 6 | Fallo 7 | Fallo 8 | Fallo 8 |
| Componente 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Componente 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Componente 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Componente 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Componente 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Componente 6 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Componente 7 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Componente 8 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Componente 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Componente 10 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |

Al obtener ya las dos matrices se procede a la multiplicación de las mismas para

obtener la matriz Función – Fallo (EF) (Ecuación 1.1 y Tabla 1.6) [9].

$$\begin{matrix}
 \text{EC} & \times & \text{CF} & = & \text{EF} & (2.1)
 \end{matrix}$$

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1
 \end{bmatrix}
 \times
 \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 1 & 2 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 2 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 4 & 0 & 0 & 0 \\
 4 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 1 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6
 \end{bmatrix}$$

Fuente: Morales, 2012

Tabla 1.6. Matriz Función- Fallo (EF)según Morales [9].

| Nombre del producto | | | | | | | | |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Función \ Fallo | Fallo 1 | Fallo 2 | Fallo 3 | Fallo 4 | Fallo 5 | Fallo 6 | Fallo 7 | Fallo 8 |
| Función 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Función 2 | 1 | 2 | 5 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 |
| Función 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Función 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| Función 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Función 6 | 0 | 0 | 1 | 4 | 1 | 4 | 0 | 0 |
| Función 7 | 4 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| Función 8 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 6 |

En (EF), las filas representan la función y los flujos, por otra parte las columnas representan los modos de fallo. Las anotaciones en la matriz, ef_{ij} , muestran el número de componentes distintos que solucionan la función i que ha fallado por el modo de fallo j . El proceso de poblar la base de conocimientos de una función-fallo, comienza obteniendo la información del fallo verdadero de un producto. La información del fallo es investigada para condicionar el componente fallido y el modo de fallo. Las sub-funciones del modelo funcional detallado son entradas en la matriz de (EC), entonces y a través del cálculo son correlacionadas a su respectivo modo de fallo y añadidas a la base de conocimientos función-fallo [9].

Cuando los componentes que más fallan son añadidos a la base de conocimientos, la distribución de ocurrencias de modo de fallos, enfrente las

funciones, puede ser usado para determinar qué modos de fallo puede aparecer más a menudo, para cada función. Una base de conocimientos apropiada para el MDFF debe contener la información de fallo para numerosas sub-funciones con el propósito de que pueda ser usado para nuevos diseños que abarquen el mismo rango de funcionalidad [8].

La matriz Función- Fallo es utilizada por los diseñadores como mecanismo para generar conceptos en la etapa conceptual de diseño obteniendo mejores variantes en los diseños finales. Este método puede manejar el criterio de posibilidad de ocurrencia de un fallo y no directamente la ocurrencia del mismo.

En el caso que se esté estudiando solamente una parte de la máquina, este análisis se puede hacer por separado para cada subsistema seleccionado y al final se multiplica.

1.4.5.3 Método para determinar la criticidad de los sistemas

Partiendo del estudio realizado por Stone [16], se procede al planteamiento de las nuevas matrices que modificarán el resultado de la matriz Función- Fallo, la cual presentará como dato intrínseco la criticidad de los sistemas que intervienen en el análisis (Figura 1.6).

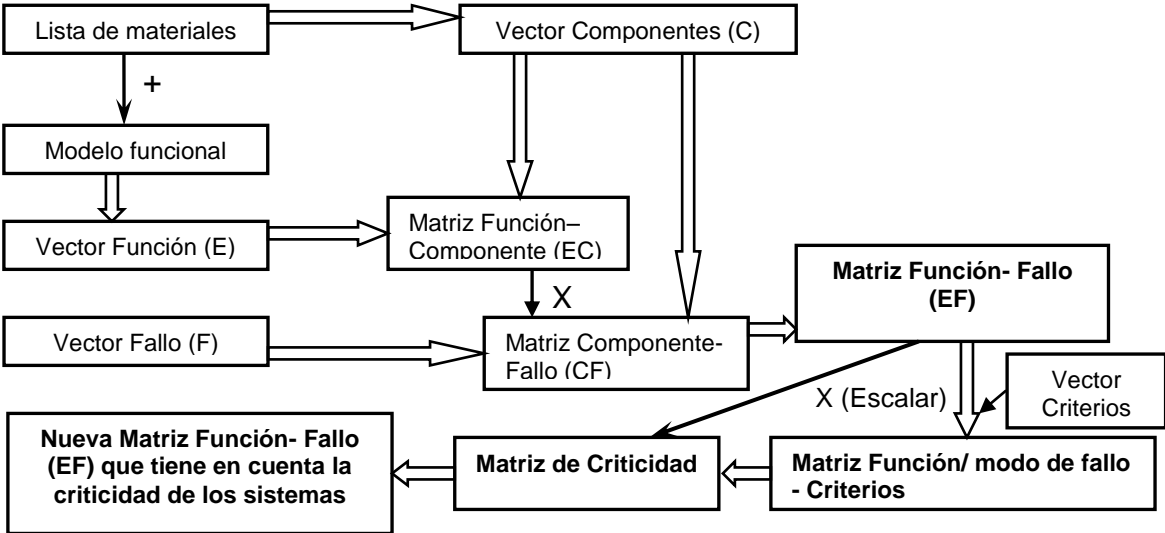


Figura 1.6. Diagrama de flujo del procedimiento. Morales.

Se parte con la matriz función- fallo obtenida con la metodología de Stone y a partir de esta se unen las funciones con los fallos, para que formen parte de las filas de la nueva matriz función\fallo – criterios (EF-K). Estos criterios son los que se tendrán en cuenta para evaluar la criticidad y así poder dar un orden jerárquico a las soluciones de la matriz Función – Fallo original. De esta forma se genera el vector de criterios (K) para la criticidad del sistema (Tabla 1.7), criterios dados por el diseñador. [9]

Tabla 1.7. Vector de criterio (K)según Morales [9].

| Criterios | |
|-----------|-------------------------------|
| K1 | Sistema de seguridad |
| K2 | Afectación Humana |
| K3 | Afectación al Medio Ambiente |
| K4 | Costo |
| K5 | Autodestrucción |
| K6 | Destrucción de otros sistemas |
| K7 | Posibilidad de ser reparado |

1.4.5.4 Generador de la matriz en función de los criterios para la criticidad

Al aplicarle un análisis de criticidad al método anterior se está generando un nuevo método que tiene en cuenta el análisis de la criticidad de los modos de fallos, que se le denominó **Método de Diseño Función- Fallo/ Criticidad (MDFF/C)**. Este se aplica en igual medida en el diseño conceptual [9]. Por ejemplo, en la Tabla 1.8 se muestra un fragmento de la matriz (EF) que representa ocho funciones y ocho modos de fallos, por lo que, al generar la matriz (EF- K) tiene 64 filas.

Tabla 1.8. Matriz de Función – Fallo/ Criterios (EF/K) (Fragmento) según Morales [9]

| Nombre del producto | | | | | | | | |
|--|----------------------|-------------------|------------------------------|-------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Función-modo de fallo \ Criterios (FM) \ (K) | Sistema de seguridad | Afectación Humana | Afectación al Medio Ambiente | Costo | Autodestrucción | Destrucción de otros sistemas | Posibilidad de ser reparado | Promedio de los criterios (PC) |
| E1- modo de fallo1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0,50 |
| E1- modo de fallo2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0,50 |
| E1- modo de fallo3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0,25 |
| E1- modo de fallo4 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0,50 |
| E1- modo de fallo5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0,38 |
| E1- modo de fallo6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,25 |
| E1- modo de fallo7 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0,50 |
| E2- modo de fallo1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0,50 |
| E2- modo de fallo2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0,63 |
| E2- modo de fallo3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,25 |

La última columna no es más que el promedio de los valores existentes en cada una de las filas, y será utilizado como magnitud escalar para ser multiplicado por las filas y columnas que le pertenecen en la matriz original (EF), definido por (1.2).

$$A_{ij} = F_i M_j * P_{ij} \dots\dots\dots(1.2) [9]$$

La ecuación anterior solamente se aplica para cada una de las celdas de la matriz (EF) original, es decir, se multiplica el valor de (PC) por la celda que le corresponde al separar las funciones de los fallos (Tablas 1.9 y 1.10).

Tabla 1.9. Método de cálculo escalar para las matrices

| Nombre del producto | | | | | | | | |
|---|----------------------|-------------------|------------------------------|-------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Función-Modo de Fallo / Criterios (EF /K) | Sistema de seguridad | Afectación Humana | Afectación al Medio Ambiente | Costo | Autodestrucción | Destrucción de otros sistemas | Posibilidad de ser reparado | Promedio de los criterios (PC) |
| | | | | | | | | |
| Función1-modo de fallo2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.50 |
| Función1-modo de fallo3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0.25 |
| Función1-modo de fallo4 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0.50 |
| Función1-modo de fallo5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0.38 |
| Función1-modo de fallo6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.25 |
| Función1-modo de fallo7 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0.50 |
| Función2-modo de fallo1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0.50 |
| Función2-modo de fallo2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0.63 |
| Función2-modo de fallo3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.25 |

| Nombre del producto | | | | | | | | |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Función \ Fallo | Fallo 1 | Fallo 2 | Fallo 3 | Fallo 4 | Fallo 5 | Fallo 6 | Fallo 7 | Fallo 8 |
| Función 1 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Función 2 | 1 | 2 | 5 | 0 | 0 | 0 | 3 | 2 |
| Función 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Función 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| Función 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Función 6 | 0 | 0 | 1 | 4 | 1 | 4 | 0 | 0 |
| Función 7 | 4 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1 |
| Función 8 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 6 |

Fuente: Morales, 2012

Tabla 1.10. Nueva Matriz (EF) en función de la criticidad del sistema. según Morales [9]

| Nombre del producto | | | | | | | | | |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
| Función \ Fallo | Fallo 1 | Fallo 2 | Fallo 3 | Fallo 4 | Fallo 5 | Fallo 6 | Fallo 7 | Fallo 8 | |
| | | | | | | | | | |
| Función 2 | 0.25 | 1 | 0.75 | 0 | 0 | 0 | 1.50 | 0.50 | |
| Función 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.25 | 0.25 | 0.50 | |
| Función 4 | 0 | 0 | 0 | 0.63 | 1 | 0.5 | 0 | 0.52 | |
| Función 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| Función 6 | 0 | 0 | 1 | 2.50 | 1 | 2 | 0 | 0 | |
| Función 7 | 2 | 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.50 | 1 | |
| Función 8 | 0 | 0.25 | 0 | 0.50 | 0 | 0 | 0 | 3 | |

Análisis de los resultados

En la Figura 1.5, se muestra, para el caso que se analizó previamente, la comparación entre la función – fallo y la función – fallo / criticidad.

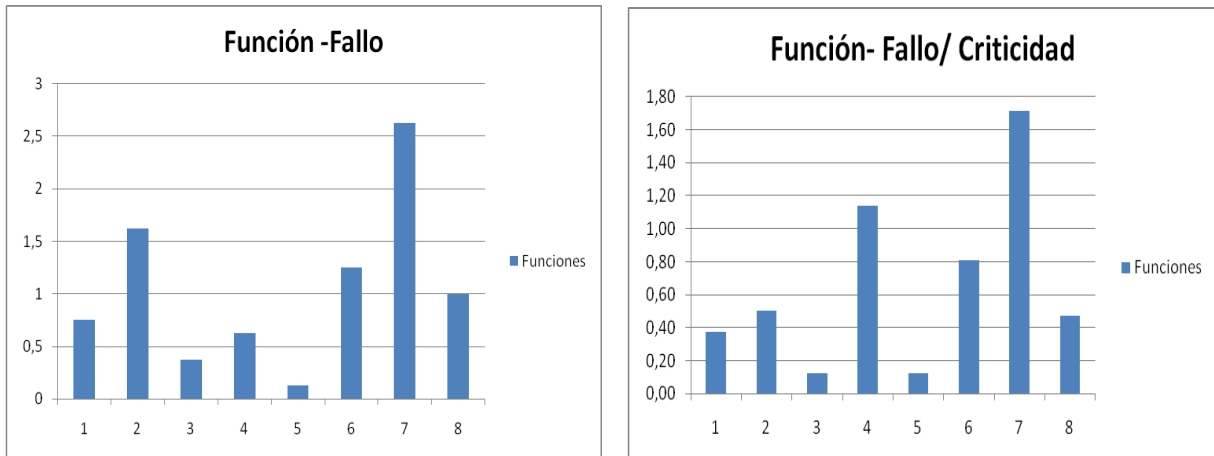


Figura 1.5. Comparación de los resultados [9].

Como se puede apreciar, los resultados cambian pero mantienen la función más peligrosa, en cuanto a los fallos, en la función siete. Pero es notable el movimiento del resto de las funciones, cambiando estas en función de la gravedad de los posibles fallos y se puede actuar sobre ellos agrupándolos en niveles de criticidad que pueden ser: de baja criticidad, de media criticidad o de alta criticidad. [9]

2. APLICACIÓN DEL MÉTODO FUNCIÓN-FALLO/CRITICIDAD AL CONJUNTO QUIJADA ESTÁTICA DE LA TRITURADORA DE QUIJADA TP1-00.00.00.

2.1 Caracterización Técnica de la Trituradora de Quijada TP1-00.00.00

Se determina que la aplicación del método de diseño Función – Fallo / Criticidad es la mejor opción para insertar en la etapa de diseño conceptual de máquinas, criterios relacionados con el mantenimiento, principalmente la criticidad de los sistemas que intervienen en un diseño mecánico. Este capítulo se aplica el MDFF/C en el diseño conceptual del conjunto quijada estática de la trituradora de quijada TP1-00.00.00.

Para aplicar el Método de Diseño Función – Fallo / Criticidad al caso del conjunto de la quijada estática (Figura 2.1), es indispensable contar con una base de conocimiento dada por los principales diseñadores que trabajaron con el método anteriormente expuesto (Anexo 1), ya que Cuba no se posee una base de conocimiento de la ocurrencia de fallos, modos de fallo y consecuencia de los mismos de forma normalizada en forma de documentos o tablas.

Se toma como variante de diseño la trituradora de quijada TP1-00.00.00 que se encuentra en explotación.

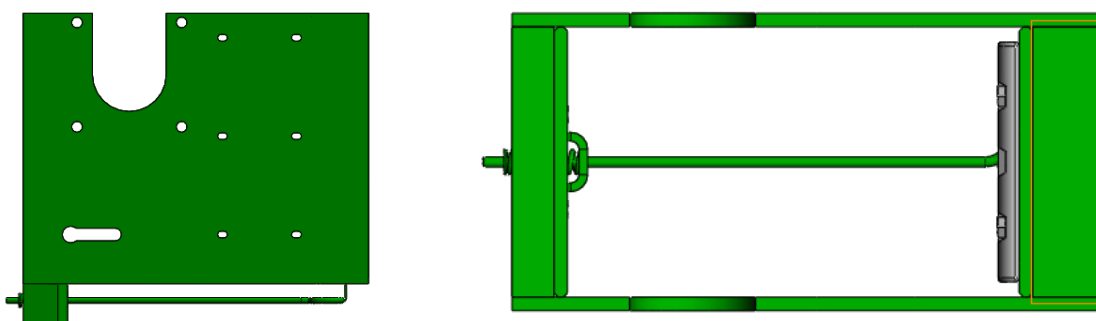


Figura 2.1. Conjunto quijada estática de la trituradora de quijada TP1-00.00.00.

Este equipo (Figura 2.2) se emplea en la trituración de minerales en general y particularmente en la trituración de piedras para grava, con la particularidad de que la piedra que se obtiene va de cero al tamaño máximo según se regule. Luego

todas las piedras más pequeñas para el tamaño mínimo que se establezca se desechan y pasan al molino de martillo para la producción de arena.

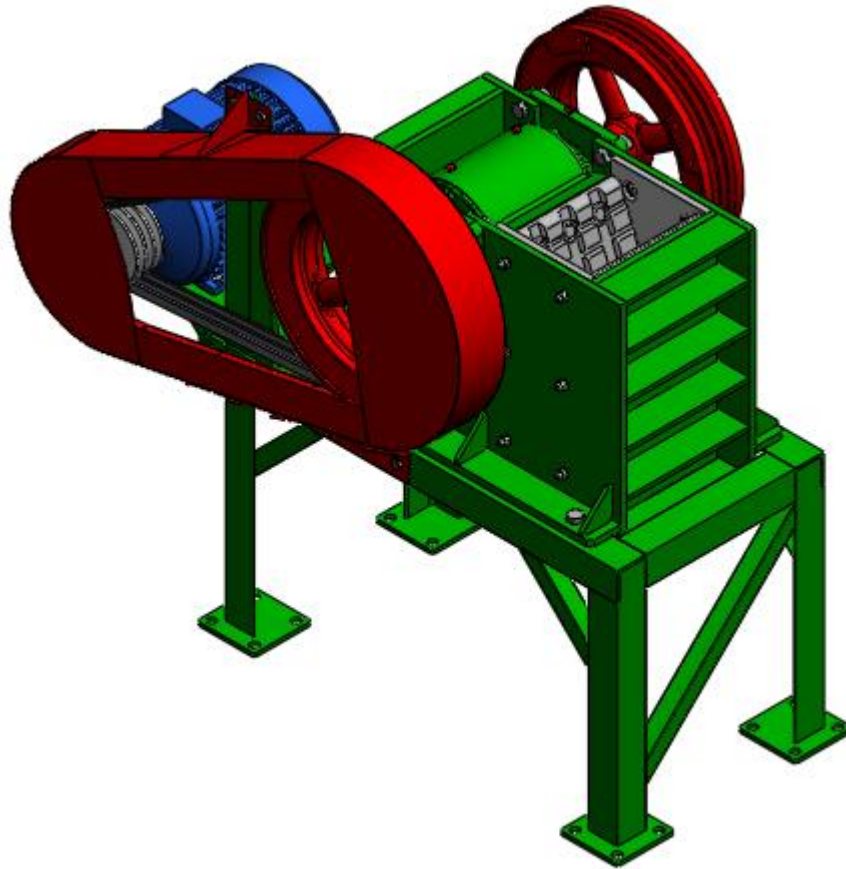


Figura 2.2. Trituradora de quijada TP1-00.00.00.

Esencialmente se trata de fracturar la piedra entre dos superficies que se aproximan y alejan cíclicamente. Estas superficies se denominan quijadas o muelas, una es estática, la otra es movida a través de un árbol excéntrico que le imprime un movimiento oscilatorio en uno de sus extremos. En el otro extremo se articula con una placa que es pivote, a la cual se mantiene unida por la tensión de un resorte. La placa pivote es además un fusible que en caso de exceso de sobre carga se arquea y libera las tensiones en la quijadas, protegiendo las demás partes del equipo.

El punto donde la placa es pivote se puede desplazar aproximando o alejando el extremo de la quijada móvil a la fija, lo que permite regular a voluntad el tamaño

máximo de la piedra a la salida. Para suavizar los picos en el esfuerzo torsional del motor eléctrico se acoplan volantes en los extremos del árbol excéntrico, uno de los cuales se toma como polea para transmisión de potencia.

Entre los conjuntos que componen la Trituradora de Quijada se destacan 9, estos son: guarderas, quijada móvil, quijada estática, carcasa, base, plataforma, fijador, soporte, palanca. El conjunto que mayor cantidad de fallos diagnosticados fue la quijada estática. Por lo que en este sistema fue centrado el estudio.

Para aplicar el método MDFF/C se comienza haciendo un inventario de las piezas que son parte del conjunto quijada estática (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Descripción de las piezas que conforman el conjunto quijada estática.

| CONJUNTO QUIJADA ESTÁTICA | | | |
|----------------------------------|--------------|-------------------------------------|----------|
| No. de pieza | Código | Nombre | Cantidad |
| 1 | TP1-00.02.01 | Placa lateral | 2 |
| 2 | TP1-00.02.02 | Fondo | 1 |
| 3 | TP1-00.02.03 | Refuerzo | 8 |
| 4 | TP1-00.02.06 | Fondo izquierdo | 1 |
| 5 | TP1-00.02.08 | Soporte | 1 |
| 6 | TP1-00.00.02 | Suplemento | 1 |
| 7 | TP1-00.00.03 | Argolla | 1 |
| 8 | TP1-00.00.09 | Tirante | 1 |
| 9 | TP1-00.00.05 | Muelle | 1 |
| 10 | TP1-00.00.06 | Tornillo de cabeza hexagonal M12x25 | 4 |

2.2 Determinación de los vectores: función, componente y modo de fallo

Para la determinación de los vectores, como se explicó anteriormente, se extraen sus valores de las bases de conocimientos con un lenguaje normalizado y universal (Anexo 1), organizados a partir de modelos funcionales homólogos.

Determinación del vector Función

Las funciones son determinadas por las bases de conocimientos citadas anteriormente que pueden ser aplicadas al sistema en estudio (Tabla 2.2).

Tabla 2.2. Vector de las funciones (E) elementales del conjunto quijada estática.

| Función | |
|---------|---------------------------|
| E1 | Absorber energía mecánica |
| E2 | Unir sólidos |
| E3 | Par sólido |
| E4 | Conducir sólidos |
| E5 | Asegurar sólidos |
| E6 | Soportar cargas |

Determinación del Vector Componente

La determinación del vector componente (C) se efectúa del inventario previo realizado al puente delantero (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Vector Componente (C).

| Componentes | |
|-------------|-------------------------------------|
| C1 | Placa lateral |
| C2 | Fondo |
| C3 | Refuerzo |
| C4 | Fondo izquierdo |
| C5 | Soporte |
| C6 | Suplemento |
| C7 | Argolla |
| C8 | Tirante |
| C9 | Muelle |
| C10 | Tornillo de cabeza hexagonal M12x25 |

En el método MDFF/C no se deben incluir componentes de ferretería pero en este caso las uniones roscadas analizadas son las que sujetan la quijada estática por lo que consideramos necesario su análisis.

Determinación del Vector Fallo (F)

Para la determinación del Vector Fallo (F), se toman los fallos fundamentales según las funciones seleccionadas para el mecanismo que forma parte del caso de estudio (Tabla 2.4), que se encuentran reflejadas en la base de conocimientos (Anexo 1).

Tabla 2.4. Vector normalizado de los posibles modos de fallos a ocurrir.

| Modos de fallos | |
|-----------------|--|
| F1 | Fractura progresiva por fatiga en uniones soldadas |
| F2 | Deformación por flexión |
| F3 | Fatiga a flexión |
| F4 | Desgastes |
| F5 | Fractura súbita dúctil |

2.3 Generación de las matrices Función– Componente y Componente–Fallo

Antes de generar la información de forma matricial, se hace necesario procesarla en una tabla que relaciona todas las funciones con los componentes de forma explícita para un mejor entendimiento de la matriz (Tabla 2.5).

Tabla 2.5. Matriz Función – Componente (EC).

| Función- Componente | Placa lateral | Fondo | Refuerzo | Fondo izquierdo | Soporte | Suplemento | Argolla | Tirante | Muelle | Tornillo |
|------------------------|---------------|-------|----------|--------------------|---------|------------|---------|---------|--------|----------|
| E1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| E2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| E3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| E5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| E6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

En la Tabla 2.6 se muestra la matriz de Componente – Fallo (CF) del caso objeto de estudio. En la Figura 2.3 se representa matemáticamente a través de matrices, lo expuesto hasta la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Matriz de Componente – Fallo (CF).

| Componente-Fallo | Fractura progresiva por fatiga | Deformación por flexión | Fatiga a flexión | Desgaste | Fractura súbita dúctil |
|------------------|--------------------------------|-------------------------|------------------|----------|------------------------|
| Placa lateral | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Fondo | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Refuerzo | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fondo izquierdo | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Soporte | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Suplemento | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Argolla | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Tirante | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Muelle | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Unión roscada | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |

Obtención de la matriz función- fallo de forma matemática

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 3 & 2 & 2 & 3 \\ 1 & 5 & 5 & 2 & 2 \\ 1 & 3 & 3 & 1 & 3 \\ 2 & 4 & 4 & 2 & 2 \\ 2 & 5 & 5 & 2 & 2 \end{pmatrix}$$

Figura 2.3. Obtención de la Matriz Función – Fallo de forma matemática.

En la Tabla 2.7 se muestra la matriz Función – Fallo.

Tabla 2.7. Matriz Función – Fallo.

| Función / Fallo | Fractura progresiva por fatiga | Deformación por flexión | Fatiga a flexión | Desgaste | Fractura súbita dúctil |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------|------------------|----------|------------------------|
| E1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| E2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 |
| E3 | 1 | 5 | 5 | 2 | 2 |
| E4 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| E5 | 2 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| E6 | 2 | 5 | 5 | 2 | 2 |

2.4 Determinación del vector Criterio (K)

La determinación de los criterios (Tabla 2.8) se realiza de acuerdo con la experiencia del diseñador o con el criterio de expertos, reflejando siempre las posibles afectaciones que pueden provocar a la máquina o al sistema en estudio.

Tabla 2.8. Vector de Criterio (K).

| Criterios | |
|-----------|-------------------------------|
| K1 | Sistemas de seguridad |
| K2 | Afectación humana |
| K3 | Costos |
| K4 | Destrucción de otros sistemas |
| K5 | Posibilidad de ser reparado |

2.5 Generador de la nueva matriz en función de los criterios para la criticidad

En la Tabla 2.9 se muestra un fragmento de la matriz Función \ Modo de Fallo- Criterios (EF-K) (C1: Sistema de seguridad; C2: Afectación humana; C3: Costos; C4: Destrucción de otros sistemas; C5: Posibilidad de ser reparado.

Tabla 2.9. Matriz de Función \ Modo de Fallo- Criterios (EF-K) (Fragmento).

| Función/modo de fallos/ criterios | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | Promedio de los criterios (PC) |
|--------------------------------------|----|----|----|----|----|---|
| E1-modo de fallo 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,2 |
| E1-modo de fallo 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0,8 |
| E1-modo de fallo 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,2 |
| E1-modo de fallo 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,2 |
| E1-modo de fallo 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,2 |
| E2-modo de fallo 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E2-modo de fallo 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E2-modo de fallo 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,2 |
| E2-modo de fallo 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E2-modo de fallo 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

La última columna no es más que el promedio de los valores existentes en cada una de las filas. Posteriormente, las celdas de la matriz (EF) original se multiplican por el valor de (PC) (Tabla 2.10).

Tabla 2.10. Método de cálculo escalar para las matrices.

| Función/modo de fallos/ criterios | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | Promedio de los criterios (PC) | Función / Fallo | Fractura progresiva por fatiga | Deformación por flexión | Fatiga a flexión | Desgaste | Fractura súbita dúctil |
|--------------------------------------|----|----|----|----|----|---|--------------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------|----------|------------------------------|
| E1-modo de fallo 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,2 | E1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| E1-modo de fallo 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0,8 | E2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 |
| E1-modo de fallo 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,2 | E3 | 1 | 5 | 5 | 2 | 2 |
| E1-modo de fallo 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,2 | E4 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3 |
| E1-modo de fallo 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,2 | E5 | 2 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| E2-modo de fallo 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | E6 | 2 | 5 | 5 | 2 | 2 |
| E2-modo de fallo 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| E2-modo de fallo 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,2 | | | | | | |
| E2-modo de fallo 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | | | |
| E2-modo de fallo 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | |

En la Tabla 2.11 se muestra el resultado de la nueva matriz EF que tiene en cuenta la ponderación del promedio de los criterios.

Tabla 2.11. Resultado de la matriz (EF) teniendo en cuenta la criticidad del sistema.

| Función/Fallo | Fallo 1 | Fallo2 | Fallo3 | Fallo4 | Fallo5 |
|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| E1 | 0 | 1,6 | 0,4 | 0 | 0 |
| E2 | 2 | 0 | 0,4 | 0 | 3 |
| E3 | 0,2 | 4 | 5 | 1,6 | 0,4 |
| E4 | 0,2 | 1,8 | 1,8 | 0,4 | 0,6 |
| E5 | 1,2 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 1,6 |
| E6 | 1,6 | 5 | 5 | 0,8 | 2 |

2.6 Análisis de los resultados

Para poder analizar los resultados se hace necesario graficar la matriz función-fallo-criticidad en un gráfico de barras donde podamos analizar cuál es la función más crítica, obtener cual es el componente más crítico y el modo de fallo que a su vez debuta como más crítico. El grafico (Figura 2.4) se realiza teniendo en cuenta las seis funciones contra la suma de los fallos de cada una.

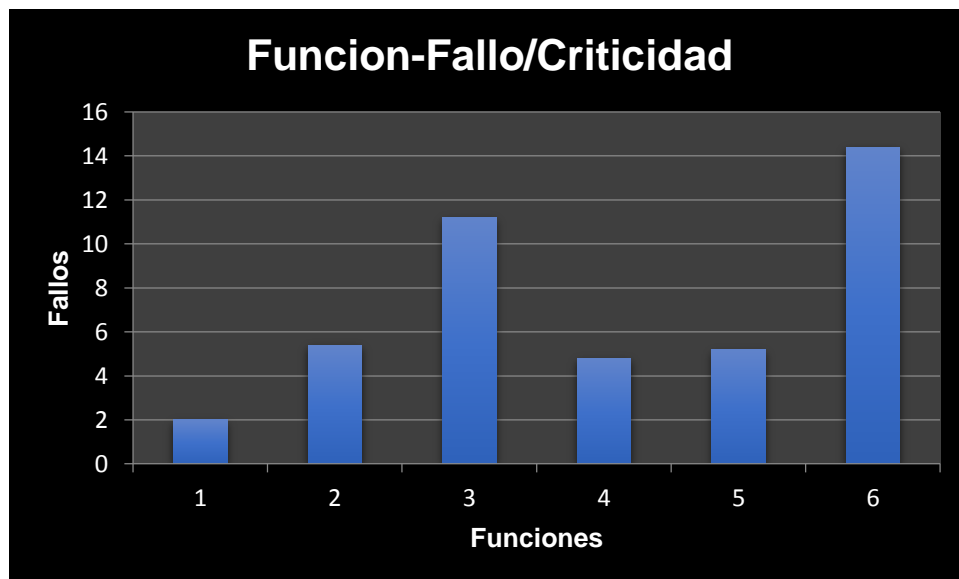


Figura 2.4. Suma de los fallos para cada función de la matriz función – fallo-criticidad.

Al analizar el gráfico se observa claramente que la función más crítica la número **seis “Soportar Cargas”** seguida de la tres par sólido, la dos unir sólidos, la cinco asegurar sólidos, la cuatro conducir sólidos y la uno absorber energía mecánica.

2.6.1 Determinación del fallo más crítico

El siguiente paso será determinar cuál es el fallo más crítico para ello en la matriz función-fallo-criticidad se suman todos los valores de fallo y arroja cual es el fallo más crítico. (Tabla 2.12)

Tabla 2.12. Resultado de la matriz (EF) teniendo en cuenta la criticidad del sistema y las sumas de los fallos.

| Función/Fallo | Fallo 1 | Fallo2 | Fallo3 | Fallo4 | Fallo5 |
|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| E1 | 0 | 1,6 | 0,4 | 0 | 0 |
| E2 | 2 | 0 | 0,4 | 0 | 3 |
| E3 | 0,2 | 4 | 5 | 1,6 | 0,4 |
| E4 | 0,2 | 1,8 | 1,8 | 0,4 | 0,6 |
| E5 | 1,2 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 1,6 |
| E6 | 1,6 | 5 | 5 | 0,8 | 2 |
| Suma de fallos | 5,2 | 13,2 | 13,4 | 3,6 | 7,6 |

Para una mejor visualización de los valores se graficarán los resultados.(Figura 2.5)

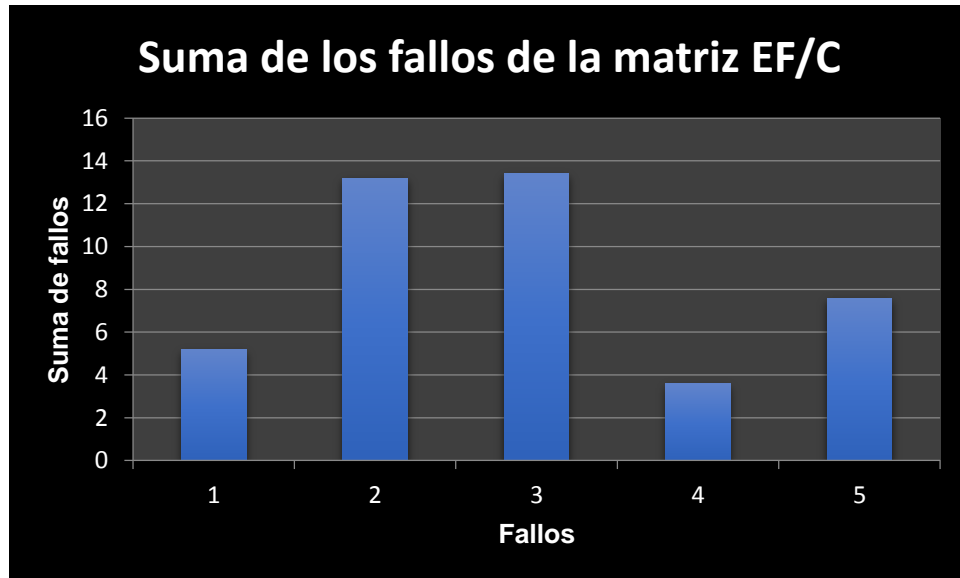


Figura 2.5. Suma de los fallos.

Luego de analizar el gráfico se determina como fallo más crítico el número tres “**Fatiga a flexión**” seguido por el dos Deformación por flexión, el cinco Fractura súbita dúctil, el uno Fractura progresiva por fatiga en uniones soldadas y el cuatro Desgastes.

2.6.2 Determinación del componente más crítico

El próximo paso será determinar a qué componente es el más afectado. Para ello se le agregara una columna a la tabla Componente-Fallo donde se tenga en cuenta la suma de los fallos por cada componente. (Tabla2.13)

Tabla 2.13. Suma de fallos en la matriz Componente-Fallo.

| Componente-Fallo | Fractura progresiva por fatiga | Deformación por flexión | Fatiga a flexión | Desgaste | Fractura súbita dúctil | Suma de fallos |
|------------------|--------------------------------|-------------------------|------------------|----------|------------------------|----------------|
| Placa lateral | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Fondo | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| Refuerzo | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Fondo izquierdo | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| Soporte | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 |
| Suplemento | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 3 |
| Argolla | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| Tirante | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| Muelle | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| Unión roscada | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 3 |

Para una mejor visualización observaremos los resultados en un grafica de barras. (Figura 2.6)

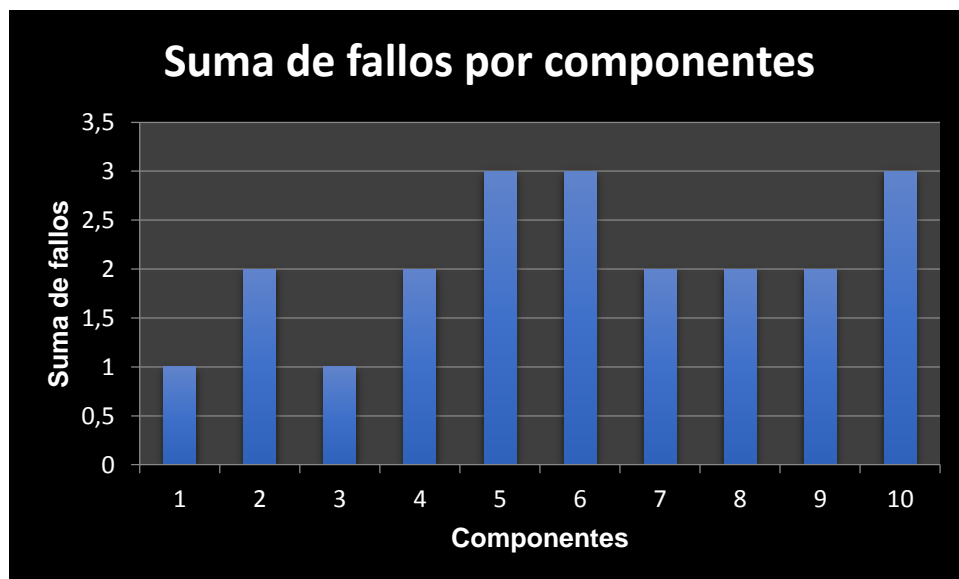
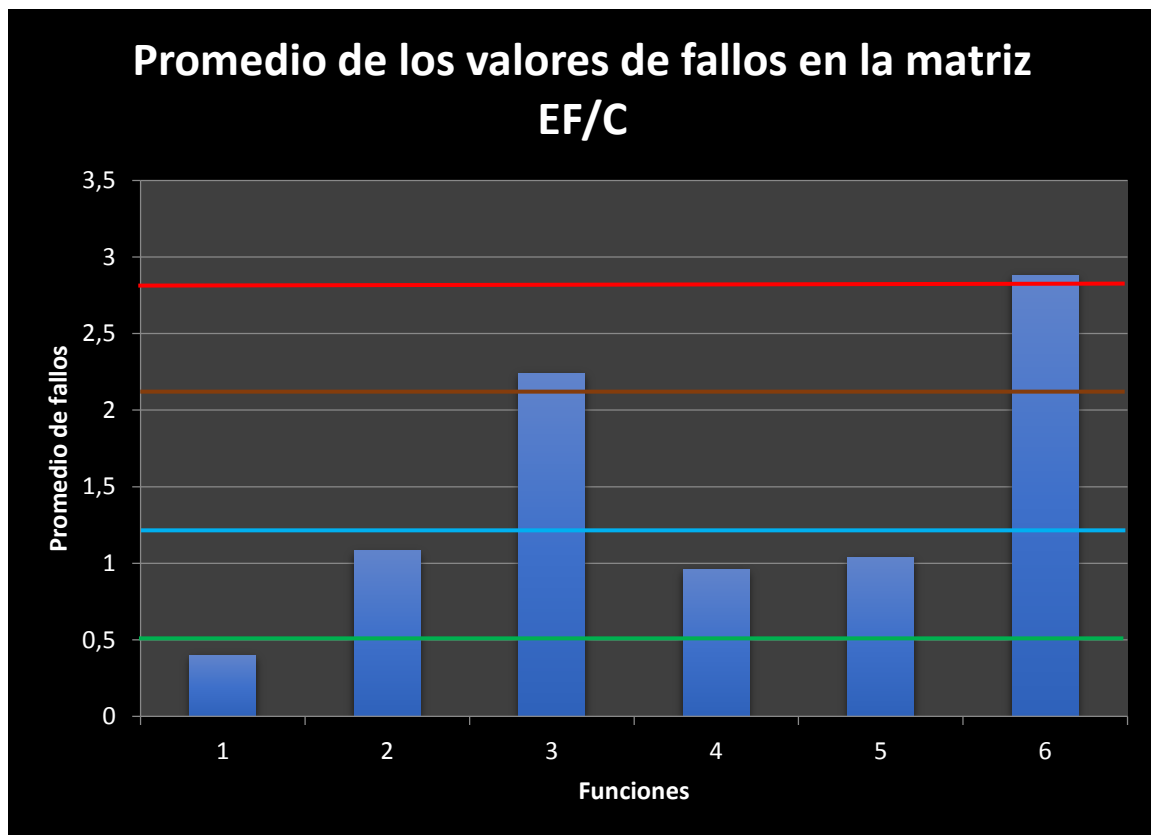


Figura 2.6. Suma de los fallos por componentes.

Luego de analizar el grafico se determina que los componentes más afectados por los fallos son el cinco Soporte, el seis Suplemento, el diez Unión roscada

2.6.3 Funciones organizadas según el nivel de criticidad

Para una mejor visualización de los valores en el gráfico Función-Fallo/Criticidad, y organizarlos por niveles de criticidad, se generó el siguiente gráfico de barras (Figura 2.7). Para este caso que tiene en cuenta la consecuencia y el peso de los criterios de criticidad, se obtiene que, siguiéndole a la función 6, que es la más crítica, están: 3, 2, 5, 4, 1.



Leyenda: Por encima de la línea roja: Alta criticidad, Entre la línea marrón y la roja: Mediana Criticidad, Entre la línea marrón y la azul: Baja Criticidad, Entre la línea azul y la verde: Muy baja Criticidad, Por debajo de la línea verde: Criticidad despreciable.

Figura 2.7. Funciones jerarquizadas en función de los grupos de criticidad.

CONCLUSIONES

1. Se aplicó un método que tiene en cuenta la criticidad de los posibles fallos potenciales, Método de Diseño Función – Fallo /Criticidad (MDFF/C), el cual cumple con el objetivo trazado en el trabajo.
2. Se tomó como caso de estudio para desarrollar el método, el conjunto quijada estática de la trituradora de quijada TP1-00.00.00, obteniéndose como posible modo de fallo más crítico la fatiga a flexión que afecta en mayor medida a la función de soportar cargas y al componente Unión roscada
3. El método aplicado proporciona al diseñador de la trituradora de quijada TP1-00.00.00 una herramienta muy útil para determinar las mejores variantes de conceptos partiendo de la criticidad de los posibles modos de fallos que pueden estar presentes en la explotación de la máquina o elemento diseñado.

RECOMENDACIONES

1. Crear las bases de conocimiento para el diseño de productos y máquinas agrícolas, que facilite en el CEDEMA y las empresas mecánicas del territorio la aplicación del método aplicado.
2. Aplicar el método MDFF/C a los diferentes proyectos de diseño de máquinas que se realizan en el CEDEMA y las empresas mecánicas del territorio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Ferrer, "Contribución metodológica en técnicas de diseñar para fabricación," Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial, Girona, Girona, España, 2007.
- [2] S. Michael, "Linking Component Function To Component Failure For Use In Conceptual Design Failure Analysis," Master of Science in Mechanical Engineering, Missouri-Rolla, Missouri, 2003.
- [3] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K.-H. Grote, *Engineering Design. A Systematic Approach*, third ed. Londres: Springer-Verlag, 2007.
- [4] D. G. Ullman, *The mechanical design process*, 3rd edition ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2003.
- [5] F. Mistree, W. F. Smith, B. A. Bras, J. K. Allen, and D. Muster, "Decision-Based Design: A Contemporary Paradigm for Ship Design," *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, vol. 98, 1990.
- [6] C. Riba, *Diseño Concurrente*. Barcelona: Edicions UPC, 2002.
- [7] A. Alvarez, "FORMALIZACIÓN DE UNA METODOLOGÍA SISTEMÁTICA DE DISEÑO PARA LA EVALUACIÓN DE CONCEPTOS A PARTIR DE LA TRAZABILIDAD DE LOS REQUERIMIENTOS FUNCIONALES," Doctor en Ciencias Técnicas Doctorado, Ingeniería Mecánica, Universidad de Holguín, Holguín, 2014.
- [8] J. C. Oliva, "EVALUACIÓN DE LA CRITICIDAD EN LA ETAPA CONCEPTUAL DE DISEÑO: CASO DE UNA TRACTOLVA ARROCERA," Máster en Ciencias Máster en Mantenimiento y Reacondicionamiento de Máquinas, Ingeniería Mecánica, Universidad de Holguín, Holguín, 2014.
- [9] Y. Morales, "MÉTODO PARA LA EVALUACIÓN DE LA CRITICIDAD EN LA ETAPA CONCEPTUAL DE DISEÑO: CASO DE LA COSECHADORA DE CAÑA KORTEP 3500," Máster en Ciencias en Maquinaria Agrícola, Holguín, Holguín, 2012.
- [10] D. A. Moreno Luis. (2005, 12 de noviembre). *Análisis del modo y efecto de falla*. Available: <http://www.monografias.com/trabajos27/modo-falla/modo-falla.shtml>
- [11] E. Gotera. (2006, 3 de septiembre). *¿Que es lo último que hemos aplicado en mantenimiento?* Available: <http://www.monografias.com/trabajos13/mante/mante.shtml>
- [12] S. Uder, R. B. Stone, and I. Y. Tumer, "FAILURE ANALYSIS IN SUBSYSTEM DESIGN FOR SPACE MISSIONS," in *Proceedings of DETC '04 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Salt Lake City, Utah, 2004, p. 17.
- [13] R. A. Roberts, R. B. Stone, and I. Y. Tumer, "DERIVING FUNCTION-FAILURE SIMILARITY INFORMATION FOR FAILURE-FREE ROTORCRAFT COMPONENT DESIGN," in *Proceedings of DETC 02: ASME 2002 Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference*, Montreal, Canada, 2002, p. 11.
- [14] M. E. Stock, "LINKING COMPONENT FUNCTION TO COMPONENT

- FAILURE FOR USE IN CONCEPTUAL DESIGN FAILURE ANALYSIS," MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING, UNIVERSITY OF MISSOURI-ROLLA, 2003.
- [15] M. E. Stock, R. B. Stone, and I. Y. Tumer, "GOING BACK IN TIME TO IMPROVE DESIGN: THE ELEMENTAL FUNCTION-FAILURE DESIGN METHOD," in *Proceedings of DETC'03 - ASME 2003 Design Engineering Technical Conference*, Chicago, Illinois, 2003, p. 11.
- [16] R. B. Stone, I. Y. Tumer, and M. Van-Wie. (2003, 02.01.2012). *THE FUNCTION-FAILURE DESIGN METHOD*. Available: <http://www.designengineeringlab.net/delabsite/publications/journals/FFDM-JMD%20accepted-v2.pdf>
- [17] R. B. Stone, Z. Strawbridge, and D. A. McAdams. (2001, 03.04.2012). *MATHEMATIZING THE CONCEPTUAL DESIGN PHASE: A CONCEPT GENERATOR BASED ON AN EMPIRICAL STUDY*. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.124.8161>
- [18] R. B. Stone and K. L. Wood, "Development of a Functional Basis for Design," *Journal of Mechanical Design* vol. 122, pp. 359-370, December 2000.
- [19] S. G. Arunajadai, R. B. Stone, and I. Y. Tumer, "'A CLUSTERING-BASED APPROACH FOR FAILURE MODE IDENTIFICATION," in *ASME International Mechanical Engineering Congress*, New Orleans, 2002.
- [20] S. G. Arunajadai, R. B. Stone, and I. Y. Tumer, "A FRAMEWORK FOR CREATING A FUNCTION-BASED DESIGN TOOL FOR FAILURE MODE IDENTIFICATION," in *ASME International Mechanical Engineering Congress*, New Orleans, 2002.
- [21] S. G. Arunajadai, "A FUNCTION BASED DESIGN TOOL FOR FAILURE MODE IDENTIFICATION AND FAILURE-FREE DESIGN," MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING, UNIVERSITY OF MISSOURI-ROLLA, 2002.

ANEXOS

Anexo 1. Bases de conocimiento

Anexo 1.1. Base de conocimientos para 112 fallos de componentes registrados

| Function/Failure | Abrasive Wear | Biological Corrosion | Brittle Fracture | Cavitation Erosion | Corrosion Fatigue | Creep | Crevice Corrosion | Deformation | Deformation Wear | Direct Chemical Attack | Ductile Rupture | Electrostatic Discharge | Erosion Corrosion | Fretting Fatigue | Fretting Wear | Galvanic Corrosion | High Cycle Fatigue | Hydrogen Damage | Impact Fracture | Intergranular Corrosion | Low Cycle Fatigue | Pitting Corrosion | Selective Leaching | Stress Corrosion | Surface Fatigue | Temperature Induced Deformation | Thermal Fatigue | Thermal Shock |
|---|---------------|----------------------|------------------|--------------------|-------------------|-------|-------------------|-------------|------------------|------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|------------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|---------------|
| Change Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Change Hydraulic Energy | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Change Liquid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Change Rotational Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Collect Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Contain Liq | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Contain Solid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Electrical Energy to Electromagnetic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Electrical Energy to Optical Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Gas to Liquid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Hydraulic Energy to Pneumatic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Liquid to Gas | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Liquid to Solid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Mechanical Energy to Translational Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Pneumatic Energy to Hydraulic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Pneumatic Energy to Rotational Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Convert Rotational Energy to Hydraulic Energy | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Rotational Energy to Mechanical Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Rotational Energy to Pneumatic Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Convert Rotational Energy to Translational Energy | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 5 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Convert Solar Energy to Status Signal | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Convert Translational Energy to Mechanical Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Translational Energy to Rotational Energy | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Couple Solid | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Distribute Electromagnetic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Export Electrical Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Export Gas | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 2 | 2 | 0 | 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Export Gas-Gas Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Export Hydraulic Energy | 0 | 1 | 3 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Export Liquid | 0 | 2 | 6 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 8 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 | 8 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 |
| Export Liquid-Liquid Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Export Liquid-Solid Mixture | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Export Mechanical Energy | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 9 | 8 | 2 | 1 | 5 | 2 | 1 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| Export Optical Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Export Pneumatic Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| Export Rotational Energy | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Export Solid | 1 | 2 | 14 | 1 | 1 | 3 | 5 | 1 | 5 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 | 14 | 7 | 2 | 4 | 7 | 4 | 1 | 11 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| Export Status Signal | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Export Thermal Energy | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 4 | 2 | 1 | 4 | 2 | 2 | 1 | 8 | 0 | 0 | 3 | 1 |
| Export Translational Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Guide Electrical Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Guide Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Guide Gas-Gas Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Guide Gas-Solid Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Guide Hydraulic Energy | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

[19-21].

Anexo 1.1. (Continuación).

| Function/Failure | Abrasive Wear | Biological Corrosion | Brittle Fracture | Cavitation Erosion | Corrosion Fatigue | Creep | Crevice Corrosion | Deformation Wear | Direct Chemical Attack | Ductile Rupture | Electrostatic Discharge | Erosion Corrosion | Fretting Fatigue | Fretting Wear | Galvanic Corrosion | High Cycle Fatigue | Hydrogen Damage | Impact Fracture | Intergranular Corrosion | Low Cycle Fatigue | Pitting Corrosion | Selective Leaching | Stress Corrosion | Surface Fatigue | Temperature Induced Deformation | Thermal Fatigue | Thermal Shock |
|-------------------------------|---------------|----------------------|------------------|--------------------|-------------------|-------|-------------------|------------------|------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|------------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|---------------|
| Guide Liquid | 0 | 1 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 6 | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 7 | 0 | 1 | 2 | |
| Guide Liquid-Liquid Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| Guide Liquid-Solid Mixture | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Guide Mechanical Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 2 | |
| Guide Pneumatic Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 4 | 0 | 0 | 2 | |
| Guide Rotational Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | |
| Guide Solid | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Guide Thermal Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Guide Translational Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Import Electrical Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Import Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | 2 | 0 | 6 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Import Gas-Gas Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| Import Gas-Solid Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Import Hydraulic Energy | 0 | 1 | 4 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Import Liquid | 0 | 2 | 9 | 1 | 1 | 0 | 4 | 1 | 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 9 | 6 | 1 | 4 | 3 | 3 | 2 | 9 | 0 | 0 | 1 | 3 |
| Import Liquid-Solid Mixture | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Import Mechanical Energy | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Import Pneumatic Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| Import Rotational Energy | 0 | 0 | 6 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 8 | 6 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| Import Solar Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| Import Solid | 1 | 2 | 15 | 1 | 1 | 4 | 5 | 1 | 5 | 3 | 1 | 2 | 0 | 1 | 3 | 15 | 9 | 2 | 5 | 8 | 5 | 2 | 17 | 1 | 1 | 3 | 4 |
| Import Thermal Energy | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 3 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 2 | 1 | 4 | 1 | 2 | 1 | 7 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| Import Translational Energy | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Inhibit Liquid | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Inhibit Thermal Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Join Solid | 1 | 2 | 14 | 1 | 1 | 3 | 5 | 1 | 3 | 3 | 0 | 2 | 0 | 1 | 2 | 14 | 8 | 2 | 4 | 8 | 4 | 1 | 11 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| Link Solid | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Mix Liquid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| Position Liquid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Position Solid | 1 | 2 | 15 | 1 | 1 | 2 | 5 | 1 | 4 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 | 3 | 15 | 8 | 2 | 5 | 7 | 5 | 1 | 15 | 1 | 1 | 3 | 4 |
| Regulate Hydraulic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Regulate Liquid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Remove Solid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Secure Solid | 1 | 2 | 14 | 1 | 1 | 3 | 5 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 13 | 8 | 2 | 5 | 8 | 5 | 2 | 14 | 1 | 1 | 3 | 4 |
| Separate Gas-Gas Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Separate Gas-Solid Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Separate Liquid-Solid Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Shape Liquid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Shape Solid | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Stabilize Mechanical Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Stop Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Stop Hydraulic Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Stop Liquid | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Stop Pneumatic Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Stop Solid | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | |
| Store Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Store Hydraulic Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Store Liquid | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Store Mechanical Energy | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 5 | 0 | 3 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| Store Pneumatic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Store Solid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Supply Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Supply Hydraulic Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Supply Liquid | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Supply Mechanical Energy | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 5 | 0 | 3 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| Supply Pneumatic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| Supply Solid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Transfer Liquid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Transmit Electrical Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Transmit Hydraulic Energy | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| Transmit Mechanical Energy | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 6 | 3 | 2 | 0 | 2 | 1 | 1 | 4 | 0 | 0 | 0 | 2 | |
| Transmit Rotational Energy | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | |

Anexo 1.2. Base de conocimientos de transportación [19-21].

| Function/Failure | Biological Corrosion | Brittle Fracture | Crevice Corrosion | Ductile Rupture | Fretting Fatigue | Fretting Wear | Galvanic Corrosion | High Cycle Fatigue | Hydrogen Damage | Impact Fracture | Intergranular Corrosion | Low Cycle Fatigue | Stress Corrosion | Surface Fatigue | Thermal Shock |
|---|----------------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------|
| Change Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Change Liquid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Change Rotational Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Electrical Energy to Optical Energy | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Hydraulic Energy to Pneumatic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Liquid to Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Pneumatic Energy to Rotational Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Rotational Energy to Pneumatic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Rotational Energy to Translational Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Convert Translational Energy to Mechanical Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Convert Translational Energy to Rotational Energy | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Couple Solid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Distribute Liquid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Distribute Mechanical Energy | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Distribute Thermal Energy | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Export Electrical Energy | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Export Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Export Hydraulic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Export Liquid | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 5 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Export Liquid-Liquid Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Export Mechanical Energy | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 4 | 1 | 1 | 0 | 4 | 4 | 0 | 1 |
| Export Optical Energy | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Export Pneumatic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 |
| Export Rotational Energy | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Export Solid | 1 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 7 | 1 | 1 | 0 | 5 | 4 | 1 | 1 |
| Export Thermal Energy | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Guide Electrical Energy | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Guide Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Guide Hydraulic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Guide Liquid | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Guide Liquid-Liquid Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Guide Mechanical Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| Guide Pneumatic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |

Anexo 1.2. Continuación.

| Function/Failure | Biological Corrosion | Brittle Fracture | Crevice Corrosion | Ductile Rupture | Fretting Fatigue | Fretting Wear | Galvanic Corrosion | High Cycle Fatigue | Hydrogen Damage | Impact Fracture | Intergranular Corrosion | Low Cycle Fatigue | Stress Corrosion | Surface Fatigue | Thermal Shock |
|-------------------------------|----------------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|---------------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------|------------------|-----------------|---------------|
| Guide Rotational Energy | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| Guide Solid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Guide Thermal Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Import Electrical Energy | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Import Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Import Hydraulic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Import Liquid | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 5 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| Import Liquid-Solid Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Import Mechanical Energy | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 4 | 1 | 1 | 0 | 3 | 3 | 0 | 1 |
| Import Pneumatic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Import Rotational Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 |
| Import Solid | 1 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 7 | 1 | 1 | 0 | 6 | 4 | 1 | 1 |
| Import Thermal Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Import Translational Energy | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Inhibit Liquid | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Join Solid | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 6 | 0 | 1 | 0 | 6 | 3 | 1 | 1 |
| Link Solid | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Mix Liquid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Position Solid | 1 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 7 | 1 | 1 | 0 | 6 | 4 | 1 | 1 |
| Secure Solid | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 6 | 0 | 1 | 0 | 6 | 2 | 1 | 1 |
| Separate Liquid-Solid Mixture | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Stabilize Mechanical Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Stop Solid | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Store Gas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Store Liquid | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Store Mechanical Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| Store Pneumatic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Supply Liquid | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Supply Mechanical Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| Supply Pneumatic Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer Liquid | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Transmit Electrical Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Transmit Mechanical Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 4 | 1 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| Transmit Rotational Energy | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Transmit Thermal Energy | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |

Anexo 2. Normalización de los modos de fallo según Collins [21]

Anexo 2.1. Categorización de los fallos.

| CATEGORÍA | Sub- categorías |
|--|---|
| <p>Manifestación del Fallo Deformación Elástica Deformación Plástica Rotura o fractura Cambio en el material</p> <p>Fallo inducido por agentes externos Fuerza</p> <p>Tiempo</p> <p>Temperatura</p> <p>Reacciones Ambientales</p> <p>Humano</p> <p>Localización del Fallo Tipo Cuerpo Tipo Superficial</p> | <p>Metalúrgico Químico Nuclear</p> <p>Estática Transitoria Cíclica Aleatoria Muy Corto Corto Largo Baja Encerrada Elevada Estática/ Transitoria Cíclica Aleatoria Químico Nuclear</p> |

Anexo 2.2. Clasificación de los modos de fallos.

| CATEGORY | SUB-CATEGORY | CATEGORY | SUB-CATEGORY |
|--|-------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| Deformación inducida por fuerza o temperatura | | Impacto | Fractura por impacto |
| Yielding | | | Impact Deformation |
| Brinelling | | | Impact Deformation |
| Ductile Rupture | | | Impact Wear |
| Brittle Fracture | | | Impact Fretting |
| Fatigue | High-cycle Fatigue | | Impact Fatigue |
| | Low-cycle Fatigue | Fretting | Fretting Fatigue |
| | Thermal fatigue | | Fretting Wear |
| | Surface fatigue | | Fretting Corrosion |
| | Impact fatigue | Creep | |
| | Corrosion Fatigue | Thermal relaxation | |
| | Fretting Fatigue | Stress Rupture | |
| | Direct Chemical attack | Thermal Shock | |
| | Galvanic Corrosion | Galling and Seizure | |
| | Crevice Corrosion | Spalling | |
| | Pitting Corrosion | Radiation damage | |
| | Intergranular Corrosion | Buckling | |
| | Selective Leaching | Stress Corrosion | |
| | Erosion Corrosion | Corrosion Wear | |
| | Cavitation Corrosion | Corrosion Fatigue | |
| | Stress Corrosion | Combined Creep and Fatigue | |
| | Adhesive wear | | |
| | Abrasive wear | | |
| | Corrosion Wear | | |
| | Surface Fatigue Wear | | |
| | Deformation wear | | |
| | Impact Wear | | |
| | Fretting Wear | | |

Anexo 3. Matriz de Función \ Fallo- Criterios (EF-K).

| Función/modo de fallos/ criterios | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | Promedio de los criterios (PC) |
|-----------------------------------|----|----|----|----|----|--------------------------------|
| E1-modo de fallo 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,2 |
| E1-modo de fallo 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0,8 |
| E1-modo de fallo 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,2 |
| E1-modo de fallo 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,2 |
| E1-modo de fallo 5 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,2 |
| E2-modo de fallo 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E2-modo de fallo 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E2-modo de fallo 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,2 |
| E2-modo de fallo 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| E2-modo de fallo 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E3-modo de fallo 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,2 |
| E3-modo de fallo 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0,8 |
| E3-modo de fallo 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E3-modo de fallo 4 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0,8 |
| E3-modo de fallo 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,2 |
| E4-modo de fallo 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,2 |
| E4-modo de fallo 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0,6 |
| E4-modo de fallo 3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0,6 |
| E4-modo de fallo 4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0,4 |

| | | | | | | |
|--------------------|---|---|---|---|---|-----|
| E4-modo de fallo 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,2 |
| E5-modo de fallo 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0,6 |
| E5-modo de fallo 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,2 |
| E5-modo de fallo 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,2 |
| E5-modo de fallo 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,4 |
| E5-modo de fallo 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0,8 |
| E6-modo de fallo 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0,8 |
| E6-modo de fallo 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E6-modo de fallo 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| E6-modo de fallo 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0,4 |
| E6-modo de fallo 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Anexo 4. Conjunto Quijada estática de la trituradora de Quijada TP1-00.00.00.

