

## Análisis de criticidad personalizados

A.M. del Castillo-Serpa, M.L. Brito-Ballina, E. Fraga-Guerra

Recibido el 10 de enero de 2009; aceptado el 25 de abril de 2009

### Resumen

En la actualidad existen diferentes enfoques del mantenimiento con los cuales se ha logrado muy buenos resultados a nivel mundial, ejemplo de esto es el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), el cual constituye un sistema avanzado de gestión, que con una correcta implementación garantiza la eficiencia y eficacia del mantenimiento. Basado en un análisis de sistemas previo, resulta conveniente definir los niveles de criticidad de los diferentes equipos, de que consta cada sistema. Se impone la necesidad de desarrollar una metodología para el análisis de la criticidad, para ser aplicada en diferentes instalaciones, que incluye la obtención de una expresión matemática, que basada en ciertos criterios de evaluación analice la criticidad particular en cada caso sometido a este proceso.

En este trabajo se verifica la factibilidad de la metodología propuesta, con el objetivo de realizar el análisis de sistemas y el análisis de criticidad de forma personalizada.

Se muestran los resultados de la expresión matemática obtenida en cada caso, y su validación. La aplicación de esta metodología ha permitido direccionar los recursos de mantenimiento hacia los subsistemas de mayor criticidad, mejorando significativamente la relación costo beneficio en esta actividad, así como la obtención de un software que automatiza este análisis.

**Palabras claves:** confiabilidad, diagnóstico, mantenimiento, criticidad.

### Analysis of Criticity Personalized.

#### Abstract

At the present time different focuses of the maintenance exist with which has been achieved very good results at world level, example of this it is the Centered Maintenance in the Dependability (RCM), which constitutes an advanced system of administration that guarantees the efficiency and effectiveness of the maintenance with a correct implementation. Based on a previous analysis of systems, it is convenient to define the levels of criticity of the different teams, that it consists each system. The necessity is imposed of developing a methodology for the analysis of the criticity, to be applied in different facilities that it includes the obtaining of a mathematical expression that based on certain evaluation approaches it analyzes the particular criticity in each **subjected case to this process.**

In this work the feasibility of the proposed methodology is verified, with the objective of carrying out the analysis of systems and the analysis of criticity in a personalized way.

The results of the mathematical expression are shown obtained in each case, and their validation. The application of this methodology has allowed addressing the maintenance resources toward the subsystems of more criticity, improving the relationship cost benefit significantly in this activity, as well as the obtaining of software that automates this analysis.

**Key words:** reliability, diagnose, maintenance, criticity

## 1. Introducción.

El mantenimiento se puede definir como el conjunto de técnicas o tecnologías que aseguran la correcta utilización de las instalaciones y el continuo funcionamiento de la maquinaria para conseguir a un costo competitivo la disponibilidad de los activos productivos.

Históricamente, el mantenimiento ha evolucionado a través del tiempo debido a la necesidad de elevar los volúmenes de producción y la calidad de los productos y los servicios, la constante aparición de nuevas tecnologías, la mecanización y automatización de los procesos, es decir, debido al creciente desarrollo de la industria en general. En nuestros días el mantenimiento industrial, y de forma general todo tipo de mantenimiento en una empresa moderna, necesita ser analizado como un grupo de técnicas novedosas y sistemas de gestión que tienen consecuencias directas en la eficiencia de los procesos productivos, en la reducción de los costos, en la rentabilidad y competitividad de la empresa, en la calidad del producto final o servicio que se brinda, y finalmente en la satisfacción del cliente. En la actualidad existen diferentes enfoques del mantenimiento con los cuales se ha logrado muy buenos resultados a nivel mundial, ejemplo de esto son: el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), el Mantenimiento Productivo Total (TPM), etc. Se impone la necesidad de desarrollar una metodología para el análisis de la criticidad, para ser aplicada en diferentes instalaciones, que incluye la obtención de una expresión matemática, que basada en ciertos criterios de evaluación analice la criticidad particular en cada caso sometido a este proceso.

En este trabajo se propone un procedimiento para verificar la factibilidad de la metodología propuesta.

Se muestran los resultados de la expresión matemática obtenida en cada caso, y su validación al ser aplicada en: el análisis de los equipos especiales del Aeropuerto Internacional "José Martí", en Instalaciones hoteleras en la Ciudad de La Habana, y en el extranjero en La Transportadora de Electricidad S.A. en Bolivia

## 2. Desarrollo.

Es conocido el análisis de CRITICIDAD como una metodología que permite jerarquizar sistemas, instalaciones y equipos, en función de su impacto global, con el fin de facilitar la toma de decisiones de manera acertada y efectiva, enfocando el esfuerzo y los recursos hacia áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional. Permite generar una lista ponderada desde el elemento más crítico hasta el menos crítico del total del universo analizado diferenciando tres zonas de clasificación: alta criticidad, media criticidad y baja criticidad.

Una vez identificadas estas zonas es mucho más fácil diseñar una estrategia para realizar estudios o proyectos que mejoren la confiabilidad operacional, iniciando las aplicaciones en el conjunto de procesos o elementos que forman parte de la zona de alta criticidad, que es donde se ubica la mejor oportunidad de agregar valor y aumentar la rentabilidad del negocio.

El objetivo de este tipo análisis es establecer un método que sirva de instrumento de ayuda en la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de una planta compleja, permitiendo subdividir los elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable.

### Definiciones de criticidad:

- "Medición relativa de las consecuencias de un modo de fallo y su frecuencia de ocurrencia"
- "Característica (cálculo numérico determinístico) de un sistema, que representa el impacto de la falla en cuanto a seguridad, ambiente o producción del proceso al cual pertenece; evalúa la flexibilidad operacional, costos de reparación-mantenimiento y confiabilidad. Esta característica puede ubicarse en bandas alta, media y baja."

Se puede observar que la posición de los genes en cada sección está estrictamente relacionada con cada una de las demás. En otras palabras, en cada sección el *k-ésimo* gen representa: el código del componente ( $g_{k,1}$ ), la dirección de ensamble ( $g_{k,2}$ ), la herramienta usada para ensamblar y/o

manipular el componente ( $g_{k,3}$ ) y por último el puesto de trabajo que se utiliza para ensamblar

**Ecuaciones matemáticas de la criticidad más conocidas en la literatura:**

<p>Criticidad = Consecuencia * Probabilidad de Ocurrencia * Detectabilidad.</p> <p>ó</p> <p>Criticidad = Consecuencia * Probabilidad de ocurrencia.</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

¿Cómo se realiza el análisis de la criticidad?

- Definiendo un alcance y propósito para el análisis.
- Estableciendo criterios de importancia.
- Seleccionando un método de evaluación para jerarquizar la selección de sistemas objeto del análisis.

Algunos de estos criterios pueden ser:

- Seguridad, ambiente, producción, costos (operaciones y mantenimiento), frecuencia de falla, tiempo promedio para reparar.

**Cálculo de criticidad operacional.**

Para calcular la criticidad de un subsistema/equipo dentro de una planta o sistema, se debe aplicar un criterio determinístico que transforme las características cualitativas de ese subsistema/equipo (flexibilidad, impacto en producción, costos de reparación, impacto ambiental, confiabilidad operacional, etc.) en un valor numérico que permita clasificarlo objetivamente, en relación al resto de los subsistemas/equipos de la planta o sistema.

¿Cuándo emprender un análisis de criticidad?

El Análisis de Criticidad, se debe aplicar cuando estén presentes las siguientes necesidades:

Fijar prioridades en sistemas complejos, administrar recursos escasos, crear valor, determinar impacto en el negocio, aplicar metodologías de Confiabilidad Operacional.

¿Dónde se aplica el análisis de criticidad?

El Análisis de Criticidad aplica en cualquier conjunto de procesos, plantas, sistemas, equipos y/o componentes que requieran ser jerarquizados

en función de su impacto en el proceso. Sus áreas comunes de aplicación son:

- Mantenimiento, inspección, materiales y repuestos, disponibilidad de instalaciones y equipos, personal (H-H, entrenamiento).

**Análisis personalizado:**

**PRIMER CASO.**

**Análisis de criticidad**

**Componentes sistema de transmisión TDE (Transportadora de Electricidad S.A. Bolivia.**

**Factores considerados:**

- Costo por incumplimiento de Calidad (CC)
- Costo por Infracciones y Sanciones (CIS)
- Costo por Reparación (CR)
- Factor por Costos Intangibles (FI)
- Factor por impacto a la Seguridad (FS)
- Factor por impacto al Medio Ambiente (FMA)

**Ecuación matemática propuesta:**

<p><b>CRITICIDAD = (CC + CIS + CR) * FI * FS * FMA</b></p>
------------------------------------------------------------

**SEGUNDO CASO.**

**Análisis de criticidad. Instalaciones hoteleras.**

En este caso el objetivo es verificar la factibilidad de la metodología para el análisis sistémico y de criticidad para los subsistemas objeto de mantenimiento en el Hotel NH Parque Central y además someter a prueba las características más esenciales para el desarrollo de esta metodología en instalaciones hoteleras de modo general.

**Análisis de sistemas, propuesta metodológica para su obtención en instalaciones hoteleras.**

La obtención del análisis de sistemas se puede realizar de varias maneras: a través de fuentes documentales, evaluación de expertos y referencia de instalaciones similares. En el trabajo se propone su obtención por evaluación de expertos, creando una metodología a tales efectos. Posteriormente se realiza una propuesta metodológica para el análisis de criticidad para instalaciones hoteleras:

1. Definición de la instalación.
2. Selección de expertos para la realización de una tormenta de ideas.
3. Preparación de tormentas de ideas con expertos (administradores, gerentes y mantenedores) de la instalación.

Este paso se hace con el objetivo de identificar los aspectos de mayor importancia dentro del cumplimiento de la misión de la instalación y qué factores o variables afectan directamente y con mayor significación la misma.

4. Análisis de mesa para la identificación y definición de las variables más significativas de impacto en la sociedad.
5. Preparar una encuesta para aplicar el método de expertos en particular el **Método Delphi**.

#### **Ecuación matemática propuesta:**

$$C = F * (c) * D$$

Donde:

**F** - frecuencia de fallos

**c**- consecuencia de los fallos

**D**- detectabilidad

#### **Obtención del análisis de criticidad en el hotel "Parque Central".**

Para el análisis de criticidad primeramente se aplicó la encuesta referida anteriormente, donde los expertos relacionaron todas las preguntas en cada subsistemas y se obtuvo los resultados. Los cuales se tabularon para cada sistema.

Una vez recogidas las respuestas de todos los expertos es determinado el nivel de concordancia a través de la expresión:

$$C_c = (V_n / V_t) * 100$$

Donde:

**Cc:** es el coeficiente de concordancia expresado en porcentaje.

**Vn:** es la cantidad de expertos a favor del criterio predominante.

**Vt:** es la cantidad total de expertos.

#### **TERCER CASO.**

#### **Análisis de criticidad. Evaluación de la criticidad del parque de equipos especiales de aeropuertos.**

Los equipos especiales de un aeropuerto son los encargados de prestar servicio con rapidez, calidad y seguridad a las aeronaves, y a los pasajeros y sus equipajes. Además garantizan el mantenimiento del aeródromo y la seguridad de las personas en casos de emergencia.

#### **El análisis de sistemas y su aplicación al parque de equipos especiales de aeropuertos.**

El análisis de sistemas trata básicamente de determinar los objetivos y límites del sistema objeto de análisis, caracterizar su estructura y funcionamiento, marcar las directrices que permitan alcanzar los objetivos propuestos y evaluar sus consecuencias. Dependiendo de los objetivos del análisis se identifican dos problemáticas distintas:

- Realización del análisis de un sistema ya existente para comprender, mejorar, ajustar y/o predecir su comportamiento.
- Realización del análisis como paso previo al diseño de un nuevo sistema-producto.

En cualquier caso, se puede agrupar de una forma más formal las tareas que constituyen el análisis de sistemas en una serie de etapas que se suceden de forma iterativa hasta validar el proceso completo:

- **Conceptualización:** Consiste en obtener una visión de muy alto nivel del sistema, identificando sus elementos básicos y las relaciones de éstos entre sí y con el entorno.
- **Análisis funcional:** Describe las acciones o transformaciones que tienen lugar en el sistema. Dichas acciones o transformaciones se especifican en forma de procesos que reciben entradas y producen salidas.
- **Análisis de condiciones (o constricciones)**

Debe reflejar todas aquellas limitaciones impuestas al sistema, que restringen el límite de las soluciones posibles. Estas se derivan a veces de los propios objetivos del sistema, como pueden ser: Operativas, como son las restricciones físicas,

ambientales, de mantenimiento, de personal, de seguridad, y otras. De calidad, como confiabilidad, mantenibilidad, seguridad convivencialidad, generalidad, y otras.

Sin embargo, en otras ocasiones las constricciones vienen impuestas por limitaciones en los diferentes recursos utilizables, por ejemplo: económicos (reflejados en un presupuesto), temporales (que suponen unos plazos a cumplir), humanos, metodológicos (que conllevan la utilización de técnicas determinadas), materiales, como espacio, herramientas disponibles, etc.

▪ **Construcción de modelos**

Una de las formas más habituales y convenientes de analizar un sistema consiste en construir un prototipo (un modelo en definitiva) del mismo.

▪ **Validación del análisis**

A fin de comprobar que análisis efectuado es correcto y evitar en su caso la posible propagación de errores a la fase de diseño, es imprescindible proceder a la validación del mismo. Para ello hay que comprobar los extremos siguientes:

-El análisis debe ser consistente y completo

-Si el análisis se plantea como un paso previo para realizar un diseño, habrá que comprobar además que los objetivos propuestos son correctos y realizables.

Según todos los documentos consultados referentes al tema, se pudo apreciar claramente que el conjunto de equipos que lo conforman, constituyen un sistema en sí, y se encuentran muy bien diferenciados en cuanto al tipo de servicio que prestan dentro de la actividad que los involucra. Los diferentes servicios que estos desempeñan son:

Servicio de pasajeros, servicio de cargas y equipajes, servicio de aeronaves, servicio de combustibles, servicio de aeródromos, servicio de extinción de incendios.

Para los diferentes aeropuertos a nivel internacional estos parques difieren sólo respecto a:

- Ciertos tipos de equipos en específico, por ejemplo, la barredora de nieve en los países donde sea imprescindible.

- La cantidad de equipos que lo componen, dependiendo de los niveles de tráfico de pasajeros, cargas y aeronaves de ese aeropuerto.

- Los tipos de aeronaves que se operen.

No obstante cualquiera que sea el aeropuerto, para llevar a cabo la realización de cada uno de los servicios anteriormente mencionados, del total de equipos que conforman este sistema, estos se van a agrupar en conjuntos más pequeños constituidos por diferentes tipos de equipos que van a responder a las características de cada actividad en particular.

Por lo tanto después de realizar algunas valoraciones se puede inducir que el parque de equipos especiales que opera en un aeropuerto constituye un sistema integrado por varios subsistemas que son los distintos conjuntos de equipos prestadores de cada tipo de servicio, que comprenden a su vez, una relación de equipos diferentes, los cuales por individual son un grupo de equipos homogéneos.

El análisis de criticidad de este sistema queda conformado con la mayor cantidad de equipos diferentes recopilados según la bibliografía consultada (Sistema de Pasajeros, Servicio de Extinción de Incendios, Servicio de Cargas y Equipajes, Servicio de Aeródromos, Servicio de Aeronaves y Servicio de Combustibles. Recordar que en dependencia del aeropuerto este sistema estará integrado por una mayor o menor cantidad de equipos diferentes y homogéneos.

**Ecuación matemática propuesta:**

$$C = \text{Frec. fallo} * \left[ \left( \text{Niveles de tráfico} * Ir * TPPR * \frac{\text{Impacto itinerario}}{n} \right) + \left[ \text{Costo rep.} + \text{Impacto seguridad} + \text{Impacto M. A.} \right] \right]$$

Esta fórmula es aplicable a los últimos elementos del análisis sistémico que son los conjuntos de equipos homogéneos de cada tipo de equipo. A continuación se muestra la identificación de cada

variable, así como las características propias de cada una:

-Frecuencia de fallo: Representa las veces que falla el equipo considerando cualquier tipo de fallo en un periodo de tiempo de un año.

-Niveles de tráfico: Considera el nivel de tráfico anual de tres elementos importantes que caracterizan a los aeropuertos a nivel internacional.

- a) Tráfico anual de pasajeros.
- b) Tráfico anual de movimientos. (Aeronaves).
- c) Tráfico anual de carga.

Como esta variable considera tres elementos, a la hora de evaluar, se va a considerar el tráfico anual de pasajeros como prioridad en caso de que un equipo especial este vinculado con este elemento y con otro más.

Los equipos que se encuentren vinculados solamente con el equipaje se consideran como que están relacionados con el volumen de pasajeros puesto que el volumen de equipajes depende de los mismos.

**-Índice de incidencia (Ir):** Representa el vínculo de un equipo especial con uno o más, de los tres elementos mencionados anteriormente.

Ir = 1 Para los equipos que se relacionen con un solo elemento.

Ir = 1.1 Para los equipos que se relacionen con dos elementos. Se considera un incremento de un 10% por tener en cuenta la incidencia sobre dos elementos.

Ir = 1.2 Para los equipos que se relacionen con tres elementos. Se considera un incremento de un 20% por tener en cuenta la incidencia sobre tres elementos.

En el caso de los equipos especiales relacionados con el servicio de extinción de incendios y el servicio de aeródromos se va a considerar un Ir = 1.2, ya que estos equipos en sí, guardan un vínculo general con los pasajeros, aeronaves y cargas.

**-Tiempo promedio para reparar (TPPR):** Representa el tiempo promedio que toma reparar la falla o el tiempo que el equipo esta fuera de servicio.

**-n:** Cantidad de equipos homogéneos o cantidad de equipos iguales de un tipo de equipo en específico.

**-Impacto en itinerario:** Considera la magnitud de la penalización impuesta a la empresa prestadora de servicio Handling producto de una afectación de itinerario de aeronave, pasajero o carga, debido a un fallo de algún equipo especial que provoque el no cumplimiento del tiempo de permanencia en tierra de aeronaves.

El valor de dicha penalización puede estar vinculado con el transcurso del tiempo una vez cumplido el espacio establecido para la asistencia en tierra de aeronaves, o lo que pueda traer como consecuencia esta sobrestadía; por ejemplo:

-La pérdida de conexión en otro aeropuerto de un pasajero en tránsito.

-Problemas con la entrega en tiempo de mercancías especiales como son: la prensa, medicinas, correo, alimentos, flores, etc.

Según las fuentes documentales revisadas y los especialistas consultados, no existe ningún documento internacional que normalice como se debe aplicar este tipo de penalización en todos los aeropuertos a nivel mundial. La forma de aplicar dicha penalización internacionalmente está basada en un acuerdo entre la empresa prestadora de servicio Handling del aeropuerto en cuestión y las diferentes aerolíneas transportistas. Debido a esto, esta variable es adaptable a cada aeropuerto en el cual se vaya a aplicar la expresión, dependiendo de la forma y los valores acordados de penalización.

**-Costo de reparación:** Evalúa el costo de la falla.

**-Impacto en la seguridad personal:** Considera la posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños a personas producto de la ocurrencia de un fallo.

**-Impacto al medio ambiente:** Considera la posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños al ambiente producto de la ocurrencia de un fallo.

Después de definir cada variable de la expresión obtenida para el análisis de criticidad del parque de equipos especiales, es necesario conocer cuales de ellas son criterios a evaluar y como se desarrolla su evaluación para poder obtener los

valores de criticidad de cada equipo. En la tabla puntuaciones asignadas a cada criterio. No 1 se pueden apreciar los niveles y las

**Tabla No. 1.** Criterios de evaluación para el análisis de criticidad.

<b>Guía de criticidad</b>	
<b>1. Frecuencia de fallo.(todo tipo de fallo)</b>	<u>Puntos</u>
No más de 9 fallos por año.	1
Entre 9 y 18 fallos por año.	3
Entre 18 y 29 fallos por año.	4
Más de 29 fallos por año.	6
<b>2. Niveles de tráfico anual. ( del aeropuerto)</b>	
<b>a) Tráfico anual de pasajeros.</b>	<u>Puntos</u>
No más de 100 000.	1
Entre 100 000 y 400 000.	2
Entre 400 000 y 1 millón.	4
Entre 1 millón y 5 millones.	6
Entre 5 millones y 20 millones.	9
Más de 20 millones.	12
<b>b) Tráfico anual de movimientos.</b>	<u>Puntos</u>
No más de 10 000 operaciones.	1
Entre 10 000 y 20 000 operaciones.	2
Entre 20 000 y 50 000 operaciones.	4
Entre 50 000 y 100 000 operaciones.	6
Entre 100 000 y 200 000 operaciones.	9
Más de 200 000 operaciones.	12
<b>c) Tráfico anual de carga.</b>	<u>Puntos</u>
No más de 1000 toneladas.	1
Entre 1000 y 5000 toneladas.	2
Entre 5000 y 10 000 toneladas.	4
Entre 10 000 y 50 000 toneladas.	6
Entre 50 000 y 100 000 toneladas.	9
Más de 100 000 toneladas.	12
<b>3) Tiempo promedio para reparar. (TPPR)</b>	<u>Puntos</u>
No más de 4 horas.	1
Entre 4 y 22 horas.	2
Entre 22 y 50 horas	4
Más de 50 horas.	6
<b>4) Costo de reparación. (Unidades Monetarias)</b>	<u>Puntos</u>
No más de 20 UM.	3
Entre 20 y 90 UM.	5
Entre 90 y 180 UM.	10
Más de 180 UM.	25
<b>5) Impacto en itinerario de aeronaves. (Por fallo)</b>	<u>Puntos</u>
No afecta. (No más de un 5% de la penalización máxima)	0.05
Bajo. (Entre un 5% y un 25% de la penalización máxima)	0.30
Medio. (Entre un 25% y un 75% de la penalización máxima)	0.50
Alto. (Entre un 75% y un 95% de la penalización máxima)	0.80
Muy alto.(Más de un 95% de la penalización máxima)	1
<b>6) Impacto en la seguridad personal</b>	<u>Puntos</u>
Sí	35
No	0
<b>7) Impacto al Medio Ambiente.</b>	<u>Puntos</u>
Sí	30
No	0

\*Entre: Incluye el límite superior y excluye el límite inferior.

Tanto el número de niveles otorgado a cada criterio como el peso de la puntuación para cada uno, fueron referenciados del artículo de PDVSA [1]. Además se siguió una proporción similar a la referente a la hora de confeccionar los diferentes niveles. A continuación se muestra como se obtuvieron los valores asignados a los diferentes niveles para cada criterio.

-Frecuencia de fallo: En toda la búsqueda bibliográfica realizada no se pudo encontrar valores de frecuencia de fallo de estos equipos a nivel internacional. Debido a esto los rangos de los valores fueron confeccionados con registros nacionales facilitados por la empresa E.C.A.S.A.

-Niveles de tráfico: Los valores empleados en la confección de los diferentes niveles de los tres elementos que componen este criterio, están basados en una categorización de aeropuertos respecto a volúmenes de pasajeros, cargas y aeronaves [1]. Además se contó con la consulta de varios valores de tráfico de aeropuertos a nivel nacional e internacional [1].

-Tiempo promedio para reparar: Referente a la bibliografía consultada no se encontró valores del tiempo promedio para reparar a nivel internacional de estos equipos. Debido a esto los rangos de los valores fueron confeccionados con registros nacionales facilitados por la empresa E.C.A.S.A.

-Impacto en itinerario de aeronaves: Producto de las características propias de este criterio de evaluación, se consideró definir los valores para cada nivel a partir de un rango en por ciento del valor de la penalización máxima, tomando como referencia el artículo de PDVSA [1]. Dicho valor depende de lo establecido entre la empresa prestadora de servicio Handling y las diferentes aerolíneas.

-Impacto en la seguridad personal: Debido a que este criterio es uno de los que persigue esta expresión respecto al RCM se le otorgó un gran peso, considerando dos niveles, si impacta o no, considerando un alto puntaje para el primer nivel.

-Impacto al medio ambiente: Debido a que este criterio es uno de los que persigue esta expresión respecto al RCM se le otorgó un gran peso,

considerando dos niveles, si impacta o no, concediendo un alto puntaje para el primer nivel.

La expresión obtenida permite sobre la base de los criterios de evaluación, definir un valor de criticidad para cada tipo de equipo, lo cual realizando un ordenamiento descendente, permitirá obtener una lista jerarquizada de los mismos.

Para llevar a cabo la identificación de los indicadores de más impacto relacionados con la labor que desempeñan los equipos especiales, se realizó una serie de consultas a expertos junto a una búsqueda documental de alcance nacional e internacional, ambas facilitadas por la Empresa Cubana de Aeropuertos y Servicio Aeronáuticos (E.C.A.S.A. La investigación reflejó como indicadores más significativos desde el punto de vista operacional los siguientes:

- Los niveles de tráfico de pasajeros y equipajes, cargas y aeronaves del aeropuerto.
- El tiempo que se encuentran fuera de servicio los equipos producto de un fallo.
- El costo de reparación de las fallas.
- Las afectaciones de itinerario de aeronaves imputables a la empresa prestadora de servicio Handling.

#### **Aplicación de la expresión obtenida para el análisis de criticidad en el caso particular del Aeropuerto Internacional "José Martí".**

Los resultados obtenidos de la evaluación de la criticidad de este parque especial se muestran en la tabla No. 2. Para una mejor comprensión de dicha tabla, se muestra a continuación, el vínculo de cada variable utilizada con los diferentes criterios de evaluación.

1. Frecuencia de fallo.(V1)
2. Niveles de tráfico.(V2)
3. Índice de incidencia.(V3)
4. Tiempo promedio para reparar.(V4)
5. Impacto en itinerario de aeronaves.(V5)
6. Cantidad de equipos homogéneos.(V6)
7. Costo de reparación.(V7)
8. Impacto en la seguridad personal.(V8)

Los valores de las variables V3, V8 y V5 fueron determinados a partir de los criterios establecidos

anteriormente pero con la ayuda de expertos en la actividad.

**Tabla No. 2.** Resultados de la evaluación de la criticidad del parque de equipos especiales del aeropuerto internacional " José Martí ".

Ref.	Subsistema I	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	Valor de Criticidad
1	Plantas de suministro eléctrico.	4	4	1	2	1	9	10	0	43.6
2	Arrancadores neumático.	3	4	1	2	1	1	25	0	99
3	Remolcadores de aeronaves	6	4	1	4	1	5	25	0	169.2
4	Vehículos de agua potable.	4	4	1	1	0.05	5	5	0	20.2
5	Vehículos sanitarios.	4	4	1	4	0.05	4	10	0	40.8
6	Vehículos de apoyo.	4	4	1	2	0.05	1	10	0	41.6
7	Vehículos de aire y/o nitrógeno	3	4	1	2	1	4	5	0	21
8	Vehículos de limpieza de cabinas.	3	4	1	6	0.05	1	5	0	18.6
	<b>Subsistema II</b>									
9	Autotransportadores de rodillos.	6	6	1.1	2	1	7	5	0	41.3
10	Autoelevadores de carga.	4	6	1.1	1	1	8	5	0	23.3
11	Camiones de equipajes.	4	6	1	1	1	4	5	0	26
12	Carretillas de cargas y equipajes.	1	6	1.1	6	0.05	49	3	0	3
13	Carretillas portacontenedores	1	6	1.1	6	0.05	90	3	0	3
14	Autotransportadores de cinta.	4	6	1	4	1	11	10	0	48.7
15	Remolcadores de Equipos.	6	6	1.2	2	1	14	10	0	66.2
	<b>Subsistema III</b>									
16	Escaleras Autopropulsadas de Pasajeros.	4	6	1.1	2	1	10	10	35	185.3
17	Escaleras Pequeñas.	1	6	1.1	4	1	8	3	0	6.3
18	Ómnibus de Plataforma.	4	6	1	4	1	10	25	35	249.6
	<b>Subsistema IV</b>									
19	Cisternas de combustible.	4	4	1	2	1	15	25	0	102.1
20	Dispensers (Metrocar)	4	4	1	4	1	7	10	0	49.1
	<b>Subsistema V</b>									
21	Vehículos principales	6	6	1.2	2	0.05	4	5	0	31.1
22	Vehículos de Intervención Rápida.	3	6	1.2	6	0.05	1	3	0	15.5
23	Vehículos Auxiliares.	3	6	1.2	1	0.05	2	5	0	15.5
	<b>Subsistema VI</b>									
24	Ambulancias	4	6	1.2	4	0.05	2	10	0	42.9
25	Barredoras	3	6	1.2	6	0.05	1	5	0	21.5
26	Cisternas de agua potable.	6	6	1.2	2	0.05	1	5	0	34.3
27	Vehículos Limpia Fosas.	4	6	1.2	4	0.05	1	5	0	25.8
28	Tractores Chapeadora.	1	6	1.2	1	0.05	12	5	0	5

A modo de facilitar la comprensión de los valores de criticidad obtenidos para cada tipo de equipo, se ejemplifica a continuación el cálculo a través de los remolcadores de equipos como ejemplo.

Para poder obtener los valores de las diferentes variables a sustituir en la expresión matemática obtenida, es necesario apoyarse en la Tabla No 1.

-La frecuencia de fallo de este equipo es de 29,14 fallos por año, con la evaluación de este valor en la Tabla No1 para el criterio de evaluación frecuencia de fallo (V1) se obtiene un puntaje de 6 puntos.

El tiempo promedio para reparar este equipo es 9,96 horas, con la evaluación de este valor en la Tabla No 1 para el criterio de evaluación tiempo promedio para reparar (V4) se obtiene un puntaje de 2 puntos.

El costo de reparación promedio de este equipo es de 107,73 unidades monetarias, con la evaluación de este valor en la tabla No. 1 para el criterio de evaluación costo de reparación (V7) se obtiene un puntaje de 10 puntos.

Para determinar el puntaje de este equipo respecto al criterio niveles de tráfico (V2) hay que tener en cuenta los valores de tráfico anual de pasajeros, aeronaves y cargas del Aeropuerto Internacional "José Martí", en este caso, los valores son 2 706 880, 40 462 y 25 655 respectivamente.

Como el volumen de trabajo del remolcador, esta vinculado según criterios de expertos con el volumen de tráfico de los tres elementos mencionados anteriormente, se pasa a evaluar el mismo en la Tabla No 1 a través del elemento pasajero, el cual se considera como prioridad, obteniendo un puntaje de 6 puntos.

La variable índice de incidencia (V3) en este caso es 1.2 ya que el equipo está vinculado con los tres elementos mencionados anteriormente. La

cantidad de remolcadores de equipos (V6) para el momento en que se realizó el estudio eran un total de 14.

Referente al impacto en itinerario de aeronaves (V5), según criterio de expertos, un fallo de este equipo provoca una afectación del mismo. Ahora teniendo en cuenta la particularidad de este aeropuerto en cuanto a la penalización pertinente, se va a considerar como que afecta, otorgándole el valor de 1 punto referente al último nivel de este criterio de evaluación en la Tabla No 1.

Para evaluar si un fallo de este equipo impacta en la seguridad de las personas (V8) se consultó con los especialistas, tras determinar que el mismo no afecta este criterio, se le otorgó 0 punto en la evaluación basado en la Tabla No 1.

Es válido recordar que no se va a considerar el criterio de evaluación impacto al medio ambiente (V9) en el cálculo de criticidad de ningún tipo de equipo debido al caso particular de este aeropuerto explicado anteriormente.

Una vez determinado todas las puntuaciones asignadas a cada variable, se pasa a calcular el valor de criticidad de los remolcadores de equipos mediante la expresión de criticidad 2.1.

Sustituyendo en la misma se obtiene:

$$C = V1 \cdot \left[ \left( V2 \cdot V3 \cdot V4 \cdot \frac{V5}{V6} \right) + V7 + V8 \right]$$

$$C = 6 \cdot \left[ \left( 6 \cdot 1.2 \cdot 2 \cdot \frac{1}{14} \right) + 10 + 0 \right]$$

$$C = 66.2$$

De esta forma se obtuvieron todos los valores de criticidad que aparecen en la tabla No. 2.

En tabla No. 3, se muestra ordenadamente, según el valor de criticidad de cada equipo, en que zona se encuentran.

**Tabla No. 3.** Zonas de criticidad de cada uno de los equipos analizados.

Ref.	Tipo de Equipo	Valor de Criticidad	Zona de Criticidad
18	Ómnibus de Plataforma.	249.6	<b>Alta Criticidad</b>
16	Escaleras Autopropulsadas de Pasajeros.	185.3	<b>Alta Criticidad</b>
3	Remolcadores de aeronaves	169.2	<b>Alta Criticidad</b>
19	Cisternas de combustible.	102.1	<b>Alta Criticidad</b>
2	Arrancadores neumático.	99	<b>Alta Criticidad</b>
15	Remolcadores de Equipos.	66.2	Mediana Criticidad
14	Autotransportadores de cinta.	48.7	Mediana Criticidad
24	Ambulancias	42.9	Mediana Criticidad
20	Dispensers (Metrocar)	49.1	Mediana Criticidad
1	Plantas de suministro eléctrico.	43.6	Mediana Criticidad
5	Vehículos sanitarios.	40.8	Mediana Criticidad
6	Vehículos de apoyo.	41.6	Mediana Criticidad
9	Autotransportadores de rodillos.	41.3	Mediana Criticidad
26	Cisternas de agua potable.	34.3	Mediana Criticidad
27	Vehículos Limpia Fosas.	25.8	Mediana Criticidad
21	Vehículos principales	31.1	Mediana Criticidad
10	Autoelevadores de carga.	23.3	Mediana Criticidad
11	Camiones de equipajes.	26	Mediana Criticidad
25	Barredoras	21.5	Mediana Criticidad
8	Vehículos de limpieza de cabinas.	18.6	Mediana Criticidad
4	Vehículos de agua potable.	20.2	Mediana Criticidad
7	Vehículos de aire y/o nitrógeno	21	Mediana Criticidad
22	Vehículos de Intervención Rápida.	15.5	Mediana Criticidad
23	Vehículos Auxiliares.	15.5	Mediana Criticidad
17	Escaleras Pequeñas.	6.3	Baja Criticidad
28	Tractores-Chapeadora.	5	Baja Criticidad
12	Carretillas de cargas y equipajes.	3	Baja Criticidad
13	Carretillas portacontenedores	3	Baja Criticidad

Finalmente los resultados obtenidos fueron sometidos al criterio de los expertos vinculados al parque de equipos especiales del Aeropuerto Internacional "José Martí", los cuales confirmaron la racionalidad de los resultados basados en su experiencia. De esta forma se evidencia que la expresión obtenida para análisis de criticidad es factible ya que se pudo aplicar a este aeropuerto con resultado satisfactorio.

### 3. Conclusiones.

- Se trabaja en el ajuste de una metodología bajo estudio para el análisis de criticidad de subsistemas objetos de mantenimiento.
- Se trabaja en la validación de instrumentos para la ponderación de los parámetros considerados en cada uno de los análisis de criticidad personalizados y que responden al modelo.

- Se muestran las expresiones matemáticas obtenidas en los tres procesos desarrollados, así como su validación con la obtención de resultados adecuados.
- Se analiza la importancia para estas instalaciones de la aplicación de los resultados a los que se arriba.

#### 4. Referencias.

1. **MENDOZA, R. H.** *El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional.* Petróleos de Venezuela. SA. PDVSA, 2005.
2. *Airport Handling Manual.* International Air Transport Association (IATA), 1998. vol. AHM 810-18th edition,
3. "Airport World". *Airports Traffic data.* 2005. vol. X, nº 2, p.
4. **BARRIOS GÁRCIGA, A.** *Análisis de criticidad de los subsistemas objeto de mantenimiento en una instalación hotelera.* Tutor: Del Castillo Serpa, A. Trabajo de Diploma, Centro de Estudio, Innovación y Mantenimiento - CEIM. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría"- ISPJAE, La Habana. Cuba. 2005.
5. *Catálogo de equipos especiales de aeropuertos.* Empresa Cubana de Aeropuertos y Servicios Aeronáuticos-E.C.A.S.A, 2004.
6. **CEIM.** *Software HbRCMan. Versión 1.2.* La Habana: 2005, Análisis de criticidad. Metodología para la mejora de la confiabilidad.
7. *Implementación del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en la Empresa*
8. *Informe de implantación (confidencial).* Cubana de Mantenimiento de Petróleos de Cuba. EMPET-CUPET. 2003
9. *Manual de operaciones. Empresa Cubana de Aeropuertos y Servicios Aeronáuticos. E.C.A.S.A.* 1998.
10. **TEJADA ANGUIANO, I.** *Descubrir los aeropuertos. Aeropuertos Españoles y Navegación.*
11. **TEJADA ANGUIANO, I.** *Descubrir los aeropuertos. Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea.* Centro de Documentación y Publicaciones de AENA, 1999.
12. **CABRERA, D.** *Análisis de Criticidad en la Transportadora de Electricidad S. A. Bolivia* Tutor: Del Castillo Serpa, A. Trabajo de Diploma, CEIM. Bolivia. 2005.

**A.M. del Castillo-Serpa, M.L. Brito-Ballina, E. Fraga-Guerra**

Departamento de Matemática. Facultad de Ingeniería Mecánica

E-mail: [acastillo@mecanica.cujae.edu.cu](mailto:acastillo@mecanica.cujae.edu.cu) , [lucy@mecanica.cujae.edu.cu](mailto:lucy@mecanica.cujae.edu.cu) , [efraga@mecanica.cujae.edu.cu](mailto:efraga@mecanica.cujae.edu.cu)

Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" – ISPJAE

Calle 114 #11901 e/119 y 127. Marianao. La Habana. CP 19390. Cuba.