



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**AUTOMOTRIZ**

**Modelo de jerarquización de equipos en función de su  
criticidad aplicado a un sistema tranviario**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO MECÁNICO AUTOMOTRIZ**

**Autores:**

**RODRIGO JARAMILLO ASTUDILLO**

**MARCO VINICIO MATAILO QUITUISACA**

**Director:**

**ROBERT ESTEBAN ROCKWOOD IGLESIAS**

**CUENCA, ECUADOR**

**2016**

## **DEDICATORIA**

### **Rodrigo**

A Dios por permitirme terminar con éxito mi carrera universitaria e iluminarme en cada paso de mi vida. A mi madre, abuelos Sarita y Rodrigo por apoyarme siempre y creer en mí para culminar con éxito esta etapa de preparación; a mi bisabuela “Chanita” que siempre me dijo que estudie, a mi hermana por su aliento y estar en los momentos difíciles, a mis tíos Andrea, Vladimir y a Fan por su apoyo constante; a mi primos y finalmente a mi familia.

### **Marco**

Dedico es trabaja a mi familia, la cual me apoyado en todo momento, y especialmente a mi madre quien me alentó en todo momento en mi vida universitaria.

## **AGRADECIMIENTOS**

### **Rodrigo**

Agradezco a la Universidad del Azuay, a la Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz por los conocimientos compartidos hacia mi persona, a sus docentes, en especial al Ing. Robert Rockwood Iglesias por el apoyo en mi formación académica y en el desarrollo de este trabajo, de manera especial a mi madre por el apoyo moral y económico brindado.

### **Marco**

Agradezco a Dios sobre todas las cosas, ya que él me ha brindado la salud e inteligencia para cumplir esta meta. A la Virgen quien me ha protegido en todo momento. De igual manera agradezco a mis padres, familia y amigos quienes me apoyaron en todo momento.

Agradezco a la Universidad del Azuay la cual me abrió las puertas en el camino académico, también a todos mis profesores quienes me instruyeron con su conocimiento. Especialmente al Ing. Robert Rockwood Iglesias el cual fue el director en el trabajo final.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>4</b>
1.1 Estado del arte .....	4
1.2 Marco Teórico.....	6
1.2.1 Que es la criticidad y la jerarquización .....	6
1.2.2 Metodologías de criticidad .....	8
1.2.2.1 Método del flujograma de análisis de criticidad (cualitativo).....	8
1.2.2.2 Criticidad total por riesgo (CTR).....	12
1.2.2.3 Modelo de criticidad semicuantitativo “MCR” (matriz de criticidad por riesgo) .....	14
1.2.2.4 Proceso analítico jerárquico AHP ( <i>Analityc Hierarchy Process</i> ).....	17
1.2.2.4.1 Análisis del modelo AHP de una manera sencilla .....	17
1.2.2.4.2 Algoritmo AHP .....	20
1.2.2.4.3 Características de AHP .....	24
1.3 Conclusiones .....	24

**CAPITULO II: SELECCIÓN DEL MODELO DE JERARQUIZACIÓN ADECUADO..... 26**

2.1 Características generales del sistema tranviario cuatro ríos..... 26

2.2 Organigrama del tranvía de los cuatro ríos ..... 28

2.3 Sistemas principales del tranvía cuatro ríos ..... 29

2.4 Subsistemas del sistema de material rodante ..... 30

2.4.1 División de los subsistemas del material rodante ..... 31

2.5 Ciclo básico de operación del material rodante ..... 32

2.6 Ciclo operativo del subsistema material rodante ..... 33

2.7 Diagrama de flujo del mantenimiento de una unidad del material rodante ..... 34

2.8 Análisis comparativo de los métodos de jerarquización ..... 35

2.9 Análisis por medio de matrices para seleccionar el método más adecuado de jerarquización para un sistema tranviario ..... 37

2.9.1 Matriz de relaciones ..... 37

2.9.1.1 Aplicación de matriz de relación para la selección de la metodología de jerarquización para el sistema tranviario..... 38

2.10 Conclusiones ..... 41

**CAPÍTULO III: APLICACIÓN DEL MODELO AHP HIBRIDO ..... 42**

3.1 Aplicación del método AHP “Proceso analítico Jerárquico” combinado con los modelos MCR y CTR; adaptado para un sistema tranviario ..... 42

3.1.1 Jerarquización con análisis de factores cuantitativos..... 42

3.1.1.2 Determinar los niveles de jerarquización cuantitativos ..... 43

3.1.1.3 Análisis de los factores de fallas y costos ..... 43

3.1.1.3.1 Comparación apareada de los factores de fallas y costos ..... 44

3.1.1.4 Pesos de cada factor cuantitativo según los diferentes criterios ..... 45

3.1.1.4.1 Frecuencia de Fallos (FF) ..... 46

3.1.1.4.2 Predicción de Fallos (DF) ..... 46

3.1.1.4.3 Severidad de Fallos (SF) ..... 47

3.1.1.4.4 Costes de fallos (CF) ..... 48

3.1.1.5 Evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios cuantitativos seleccionados ..... 49

3.1.1.6 Jerarquización por nivel de importancia y por cada criterio .....	51
3.1.1.7 Congruencia de los juicios. Radio de inconsistencia (ir) y jerarquización por cada uno de estos criterios .....	54
3.1.1.8 Jerarquización final de los sistemas con factores cuantitativos .....	57
3.1.1.9 Ranking de jerarquización final .....	59
3.1.2 Jerarquización con análisis de factores cualitativos.....	59
3.1.2.1 Determinar los niveles de jerarquización cuantitativos .....	60
3.1.2.2 Análisis de los factores cualitativos .....	60
3.1.2.3 Comparación apareada de los factores cualitativos .....	61
3.1.2.4 Pesos de cada factor cualitativo según los diferentes criterios .....	62
3.1.2.4.1 Medio ambiente (E).....	63
3.1.2.4.2 Seguridad (S).....	63
3.1.2.4.3 Calidad (Q).....	64
3.1.2.4.4 Disponibilidad (W) .....	65
3.1.2.4.5 Servicio prestado (SP).....	65
3.1.2.4.6 Mantenibilidad (M) .....	66
3.1.2.5 Evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios cualitativos seleccionados.....	67
3.1.2.6 Jerarquización por nivel de importancia y por cada criterio .....	70
3.1.2.7 Congruencia de los juicios. Radio de inconsistencia (ir) y jerarquización cada uno de estos criterios .....	73
3.1.2.8 Jerarquización final de los sistemas con factores cualitativos .....	76
3.1.3 Comparación de jerarquización con factores cuantitativos y cualitativo.....	80
3.2 Conclusiones .....	81

**CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DEL MODELO AHP HÍBRIDO ..... 82**

4.1 Descripción del software.....	82
4.1.1Características principales.....	82
4.2 Plan para la implementación de la metodología AHP para la jerarquización de equipos en la unidad de mantenimiento del tranvía .....	83
4.2.1 Introducción de los sistemas o equipos a ser jerarquizados.....	83
4.3 Análisis cualitativo.....	85

4.3.1 Ingresar valores cualitativos de los equipos.....	85
4.4 Análisis cuantitativo.....	88
4.4.1 Ingresar valores cuantitativos de los equipos.....	88
4.5 Jerarquización final.....	92
4.5.1 Jerarquización de equipos cualitativo y cuantitativo .....	92
4.6 Resultados del proceso de jerarquización de los sistemas principales.....	93
4.6.1 Análisis cuantitativo.....	94
4.7 Conclusiones .....	96
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>97</b>
<b>TRABAJOS A FUTURO.....</b>	<b>101</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>104</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Modelo de proceso de gestión de mantenimiento.....	8
Figura 1.2 Flujograma de análisis de criticidad .....	9
Figura 1.3 Factores de criticidad.....	11
Figura 1.4 Matriz de criticidad.....	14
Figura 1.5 Matriz de Criticidad propuesta por el modelo MCR .....	17
Figura 2.1 Ruta del tranvía de los cuatro ríos .....	27
Figura 2.2 Organigrama de funcionamiento del “tranvía de los cuatro ríos” .....	28
Figura 2.3 Sistemas principales del tranvía de los cuatro ríos .....	29
Figura 2.4 Subsistemas del sistema material rodante.....	30
Figura 2.5 División de los subsistemas del material rodante.....	31
Figura 2.6 Ciclo básico de operación del tranvía.....	32
Figura 2.7 Ciclo operativo del subsistema material rodante .....	33
Figura 2.8 Diagrama de flujo del mantenimiento de una unidad del tranvía.....	34
Figura 2.9 Relación de los diferentes métodos de jerarquización.....	40
Figura 3.1 Esquema general AHP para la jerarquización por criterios de fallas y costos.....	44
Figura 3.2 Esquema general AHP para la jerarquización por criterios cualitativos ..	61
Figura 4.1 Ventana Ingresar datos .....	84
Figura 4.2 Insertar equipo .....	84
Figura 4.3 Lista de equipos .....	85
Figura 4.4 Ventana cualitativo .....	85
Figura 4.5 Verificación de tabla apareada cualitativa.....	86
Figura 4.6 Valores cualitativos de los equipos.....	87
Figura 4.7 Escala de valores cualitativos de las variables .....	88
Figura 4.8 Ventana cuantitativo .....	89
Figura 4.9 Verificación de tabla apareada cuantitativa.....	90
Figura 4.10 Valores cuantitativos de los equipos.....	91
Figura 4.11 Escala de valores cuantitativos de las variables .....	91
Figura 4.12 Ventana jerarquizar.....	92
Figura 4.13 Comprobación de la jerarquización .....	92
Figura 4.14 Jerarquización Cualitativa y Cuantitativa.....	93



Figura 4.15 Análisis cuantitativo software .....	94
Figura 4.16 Análisis cualitativo software.....	95

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla1.1 Valoración de juicios .....	18
Tabla1.2 Valor del RI según el número de elementos que se va a comparar .....	19
Tabla1.3 Escala verbal .....	21
Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de los modelos de jerarquización.....	35
Tabla 2.2 Ventajas y desventajas de los modelos de jerarquización.....	36
Tabla 2.3 Metodologías de jerarquización .....	37
Tabla 2.4 Matriz de relación de las metodologías de jerarquización.....	39
Tabla 3.1 Comparación apareada de los factores de fallas y costos .....	45
Tabla3.2 Escala que permite definir el criterio de frecuencia de fallos .....	46
Tabla 3.3 Escala que permite definir el criterio de predicción de fallos.....	47
Tabla3.4 Escala que permite definir el criterio de severidad de fallos .....	48
Tabla 3.5 Escala que permite definir el criterio de costes de fallos.....	49
Tabla 3.6 Evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios seleccionados..	51
Tabla 3.7 Jerarquización por factor frecuencia de Ocurrencia de fallos.....	52
Tabla 3.8 Jerarquización por factor predicción de fallos .....	52
Tabla 3.9 Jerarquización por factor Severidad de fallos .....	53
Tabla 3.10 Jerarquización por factor Costes de fallos .....	53
Tabla 3.11 Estimación del IR y jerarquización de los criterios evaluados .....	56
Tabla 3.12 Tabla de apoyo para resolución de la (Tabla3.10).....	56
Tabla 3.13 Tabla para obtener el valor $\lambda_{max}$ de la matriz.....	57
Tabla 3.14 Jerarquización Final .....	58
Tabla3.15 Ranking con factores cuantitativos .....	59
Tabla 3.16 Comparación apareada de los factores de fallas y costos .....	62
Tabla 3.17 Escala que permite definir el criterio de medio ambiente.....	63
Tabla 3.18 Escala que permite definir el criterio de seguridad.....	64
Tabla 3.19 Escala que permite definir el criterio de calidad.....	64
Tabla 3.20 Escala que permite definir el criterio de disponibilidad .....	65
Tabla 3.21 Escala que permite definir el criterio de servicio prestado .....	65
Tabla 3.22 Escala que permite definir el criterio de mantenibilidad .....	66
Tabla 3.23 Evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios seleccionados	69
Tabla 3.24 Jerarquización por factor medio ambiente. ....	70

Tabla 3.25 Jerarquización por factor predicción de fallos .....	71
Tabla 3.26 Jerarquización por factor calidad .....	71
Tabla 3.27 Jerarquización por factor disponibilidad.....	72
Tabla 3.28 Jerarquización por factor servicio prestado .....	72
Tabla 3.29 Jerarquización por factor mantenibilidad.....	73
Tabla 3.30 Estimación del IR y jerarquización de los criterios evaluados .....	75
Tabla 3.31 Tabla de apoyo para la para la resolución de la tabla (Tabla3.30).....	75
Tabla 3.32 Tabla para obtener el valor $\lambda_{max}$ de la matriz.....	76
Tabla 3.33 Jerarquización final .....	78
Tabla 3.34 Ranking con factores cualitativos .....	79
Tabla 3.35 Ranking con factores cuantitativos .....	80
Tabla 3.36 Ranking con factores cualitativos .....	80
Tabla 4.1 Ranking con factores cuantitativos .....	94
Tabla 4.2 Ranking con factores cualitativos .....	95

## MODELO DE JERARQUIZACIÓN DE EQUIPOS EN FUNCIÓN DE SU CRITICIDAD APLICADO A UN SISTEMA TRANVIARIO

### RESUMEN

Este trabajo propone un modelo de jerarquización de sistemas y equipos que podría utilizarse en la unidad de mantenimiento del tranvía “cuatro ríos de la ciudad de Cuenca”, luego de revisar el estado del arte, se optó por desarrollar una metodología que fusiona aspectos cuantitativos y cualitativos, (AHP híbrido); para facilitar y agilizar la implementación de esta metodología, se desarrolló además una aplicación computacional; finalmente se jerarquizaron los sistemas del material rodante, y se determinó que el sistema de frenos es el más crítico en el análisis cuantitativo y el de alimentación en el análisis cualitativo.

**Palabras claves:** Criticidad, jerarquización, gestión de mantenimiento, proceso analítico jerárquico.



Robert Esteban Rockwood Iglesias

**Director del Trabajo de Titulación**



Diego Francisco Torres Moscoso

**Director de la Escuela**



Rodrigo Humberto Jaramillo Astudillo



Marco Vinicio Matailo Quituisaca

**Autores**

**EQUIPMENT HIERARCHY MODEL BASED ON ITS CRITICALITY, APPLIED  
TO A TRAMWAY SYSTEM**

**ABSTRACT**

This paper proposes a hierarchy model of systems and equipment that could be used in the “*Tranvia Cuatro Rios*” of the city of Cuenca maintenance unit. After reviewing the state of the art, it was decided to develop a methodology (AHP hybrid) that combines quantitative and qualitative aspects. In order to facilitate and expedite the implementation of this methodology, a computer application was also developed. Finally, the rolling stock systems were prioritized, and it was determined that the brake system is the most critical in the quantitative analysis, and the power system in the qualitative analysis.

**Keywords:** Criticality, Hierarchy, Maintenance Management, Analytic Hierarchy Process



Robert Esteban Rockwood Iglesias  
**Thesis Director**



Diego Francisco Torres Moscoso  
**School Director**

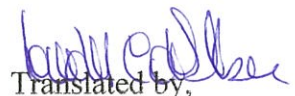


Rodrigo Humberto Jaramillo Astudillo



Marco Vinicio Matailo Quituisaca

**Authors**



Translated by,  
Lic. Lourdes Crespo

Rodrigo Jaramillo Astudillo

Marco Vinicio Matailo Quituisaca

Trabajo de Titulación

Ing. Robert Esteban Rockwood Iglesias, Msc

Julio, 2016

## **MODELO DE JERARQUIZACIÓN DE EQUIPOS EN FUNCIÓN DE SU CRITICIDAD APLICADO A UN SISTEMA TRANVIARIO**

### **INTRODUCCIÓN**

Hoy en día la globalización de los mercados ha obligado a las empresas a mejorar sus niveles de productividad y competitividad a través de la implementación de planes, técnicas y procesos que permitan gestionar de forma adecuada todos sus recursos. Una área estratégica para toda empresa productiva es la del mantenimiento, debido principalmente a la relación directa que existe entre productividad y disponibilidad de equipos e instalaciones. En el caso de los sistemas de transporte, el mantenimiento también se relaciona con la seguridad y el confort de los usuarios, y de la colectividad en general.

Además es muy relevante actualmente para una empresa el análisis de la criticidad; el objetivo de un análisis de criticidad es establecer un método que sirva para la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de un sistema de producción, como son las etapas de mantenimiento. Permitiendo subdividir los sistemas en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable. Los motivos de la priorización pueden variar según las oportunidades y las necesidades de la organización.

Por ende en miras de satisfacer la demanda del servicio de transporte de pasajeros, y dentro del proyecto de movilidad que viene desarrollando el GAD de la ciudad de Cuenca, se ha emprendido la ejecución de un sistema de transporte tranviario denominado “Tranvía de los cuatro ríos de Cuenca”, el presente trabajo aportará al

modelo de gestión organizacional de su unidad de mantenimiento. Sin lugar a dudas este proyecto es muy ambicioso, y representa un área de oportunidad si se considera la envergadura y las tecnologías asociadas.

**OBJETIVO GENERAL:**

- Determinar un modelo de jerarquización de equipos en función de su criticidad, que pueda ser aplicable a un sistema tranviario.

**OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Levantar información que permita delimitar el estado del arte referente a las diferentes metodologías existentes para efectuar el proceso de jerarquización de activos, y de experiencias relacionadas.
- Seleccionar el modelo de jerarquización de equipos más idóneo para la organización de activos de un sistema tranviario, y realizar el levantamiento de los equipos.
- Aplicar el modelo de jerarquización seleccionado.
- Diseñar las estrategias que permitan implementar el modelo establecido.



## CAPITULO I

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 1.1. Marco Teórico

En la actualidad todas las empresas buscan mejorar sus sistemas de gestión de activos (Arata, 2009); estas aplican distintos criterios. Uno de ellos es la jerarquización de activos (CESGIR, 2015), esto ha llevado a diferentes estudios como los que se describen a continuación:

En Cuba un estudio realizado en el “Sistema de Generación Electro Energético Nacional”, tuvo como objetivo la elaboración de un modelo matemático para un análisis de criticidad; que permita la jerarquización de los sistemas del proceso de generación de electricidad. Para cumplir con el objetivo, fue necesario el estudio de diferentes modelos de criticidad y la posible factibilidad de su uso en el campo de investigación, la identificación de los sistemas y subsistemas que componen los grupos electrógenos, la realización de un análisis documentado de las fallas más frecuentes en que incurren los sistemas y equipos de los grupos electrógenos, la validación del modelo y finalmente, la clasificación de los activos de acuerdo al índice de criticidad respecto al de complejidad. Se desarrolló un instrumento a partir de un criterio de expertos para determinar las variables a considerar en el modelo de criticidad y complejidad, realizándose para los modelos un estudio de su confiabilidad (Hourné, Brito, Castillo, Frag, & Díaz, 2012).

Como conclusión se determinó que se deben analizar las siguientes variables, para el análisis de la criticidad: Frecuencia de fallo, tiempo promedio para reparar, impacto sobre la producción, incumplimiento con el objeto social, redundancia, costos de reparación, impacto al medio ambiente, impacto a la salud, impacto a la seguridad personal y la detectabilidad. Mientras que las variables para el análisis de la complejidad son: Complejidad productiva, complejidad mecánica y la complejidad de localización. También se evaluó el instrumento de medición por medio del coeficiente de correlación; resultando de 0,899 para la criticidad y de 0,0856 en el caso de la complejidad; los valores obtenidos garantizan la fiabilidad del instrumento aplicado.

Finalmente se concluye que el modelo es aplicable en varias plantas de grupos electrógenos (Hourné, et al, 2012).

Otra publicación de un estudio, que se llevó a cabo en Portugal en el año 2015, describe el proceso de implementación de una metodología que tiene como prioridad evidenciar la contribución de los sistemas de gestión para el éxito empresarial. Se seleccionó una empresa que basa su trabajo en “Tecnologías de la información” debido a que en los últimos 5 años (de 2008 a 2013) ha incrementado el volumen de negocio de 10 millones a 60 millones de euros, por lo que hoy es una de los 20 mayores grupos portugueses de ese sector y un caso de éxito mundial. Los resultados de la investigación mostraron que el sistema de control de gestión, permitió a la empresa supervisar la evolución del negocio, involucrar los centros de responsabilidad en el logro de los objetivos estratégicos y actuar oportunamente sobre los desvíos en la actividad. (Delicado, 2015)

También se concluye que la información por departamentos permite la obtención de los datos económicos y financieros de cada unidad; el gran éxito también se debe a la difusión de los objetivos y de la estrategia, la alineación de las actividades de los distintos niveles jerárquicos y funcionales, el acceso a una información más detallada sobre el desarrollo de las áreas de negocio lo que permite comprobar el valor de cada actividad (Delicado, 2015).

Por otro lado se analizó un estudio en el que se implementó una metodología que permite asignar los recursos a las diferentes secciones del departamento de mantenimiento, a partir de la auditoria del proceso de asignación de recursos, en función de las actividades críticas de mantenimiento, el autor propone una metodología de auditoría diseñada para generar ahorros en la asignación de recurso para el mantenimiento. En forma de: actividades, tiempo, mano de obra, repuestos y costos directos de las acciones correctivas y preventivas. Por medio de gráficos, ésta metodología analiza los recursos asignados a los procesos de mantenimiento, su consistencia en términos de indisponibilidad y de riesgo para los modos de fallo críticos. La descripción de la metodología se realiza mediante un diagrama BPMN (Normativa de modelo de procesos de negocios). Se concluye que esta metodología puede ser aplicada de forma independiente, para colaborar en el desempeño de los

objetivos organizacionales o como parte de un sistema de gestión de activos, como sería la norma PAS 55. (López, Viveros, Crespo, Kristjanpoller, & Raul, 2014)

Finalmente concluimos con un estudio realizado en Serbia, sobre la infraestructura ferroviaria en el sector público para establecer las rutas de vías que necesiten atención y criterios más influyentes. El estudio al ser de servicio público implicó una investigación en base a los problemas de inversión, presupuesto limitado e influencias políticas y del gobierno. Considerando la naturaleza del problema, el método adecuado para resolver el problema es el Proceso Analítico por multi-criterio o ANP (*Analytic Network Process*). Se determinó cinco variables: criterios de costo/beneficio, restricciones de velocidad, capacidad de la infraestructura ferroviaria, compatibilidad con los acuerdos internacionales y volumen del tráfico. Con los factores expuestos se efectuó una comparación con valores de ponderación determinados en las matrices. Como conclusión del trabajo se obtuvo un modelo que permite determinar el criterio más relevante para priorizar la ruta, esto se logró a través del uso de un software. (Macura, Bošković, Bojović, & Milenković, 2011)

En base a estas investigaciones se puede concluir que la gestión de activos es muy importante para todas las empresas que desean alcanzar niveles óptimos de prestaciones de servicios y con ello lograr: una organización adecuada de los diferentes sistemas, evitar que sus equipos e instalaciones colapsen o su vida útil no sea aprovechada al máximo a un bajo costo de mantenimiento.

## **1.2. Marco teórico**

### **1.2.1. Que es la criticidad y jerarquización**

El término “crítico” y la propia definición de criticidad pueden tener diferentes interpretaciones dependiendo del objetivo que se está tratando de jerarquizar; el objetivo de un análisis de criticidad es establecer un método que sirva para la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de un sistema de producción, como son las etapas de mantenimiento. Permitiendo subdividir los sistemas en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable.

Los motivos de la priorización pueden variar según las oportunidades y las necesidades de la organización. A continuación se presentan algunos criterios comunes a utilizar dentro de los procesos de jerarquización (Parra & Crespo, 2012):

- Flexibilidad operacional (disponibilidad de función alterna o de respaldo)
- Efecto en la continuidad operacional / capacidad de producción
- Efecto en la calidad del producto
- Efecto en la seguridad, ambiente e higiene
- Costos de paradas y del mantenimiento
- Frecuencia de fallas / confiabilidad
- Condiciones de operación (temperatura, presión, fluido, caudal, velocidad)
- Flexibilidad / accesibilidad para inspección & mantenimiento
- Requerimientos / disponibilidad de recursos para inspección y mantenimiento
- Disponibilidad de repuestos

Las técnicas de análisis de la criticidad son herramientas que permiten identificar y jerarquizar por su importancia los activos de una empresa sobre los cuales se dirige recursos (humanos, económicos y tecnológicos). Este proceso de criticidad ayuda a determinar la importancia y las consecuencias de fallas en los sistemas de producción dentro del contexto operacional en el cual se desempeñan. (Parra & Crespo, 2012)

Se puede resumir que un Modelo de Gestión de Mantenimiento (MGM) consta de 8 fases (Figura 1.1) donde se define que las técnicas de jerarquización y criticidad se relacionan con la fase 2 del MGM

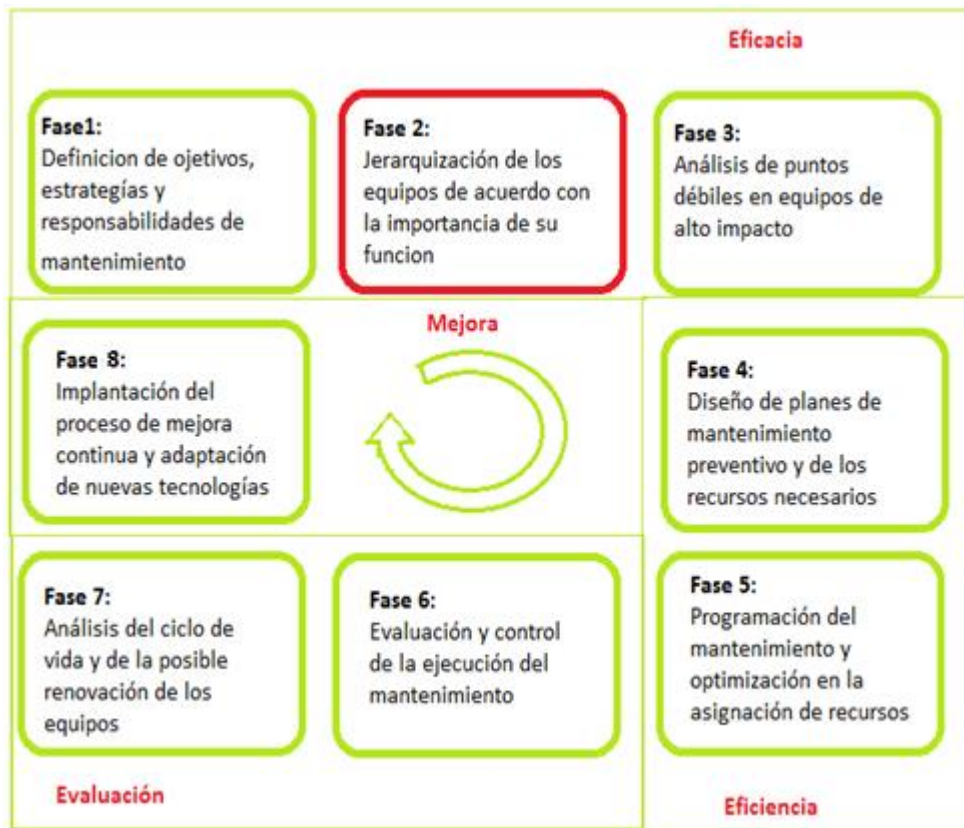


Figura 1.1: Modelo de proceso de gestión de mantenimiento

Fuente: (Parra & Crespo, 2012).

En el capítulo V de libro “Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada a la Gestión de Activos” de Parra 2012, se mencionan los siguientes modelos de análisis de la criticidad de equipos para establecer su jerarquización.

## 1.2.2. Metodologías de criticidad

### 1.2.2.1. Método del flujograma de análisis de criticidad (cualitativo)

En este primer método se presenta una técnica que hace referencia a un análisis únicamente cualitativo sobre la jerarquía de equipos de producción. Como se puede observar en la (Figura 1.2), el resultado del proceso es una clasificación de nuestros equipos en tres categorías: A, B C, siendo los equipos tipo A los de mayor prioridad.

Para llegar a esa clasificación final se procede de forma secuencial a realizar una serie de preguntas al equipo natural de trabajo conformado en la empresa para tal fin. La secuencia marca la importancia que da el equipo de trabajo a cada atributo que se analiza a la hora de establecer la prioridad del mismo. De alguna forma, el orden en la secuencia marca el peso que se da durante la gestión, a cada uno de los atributos.

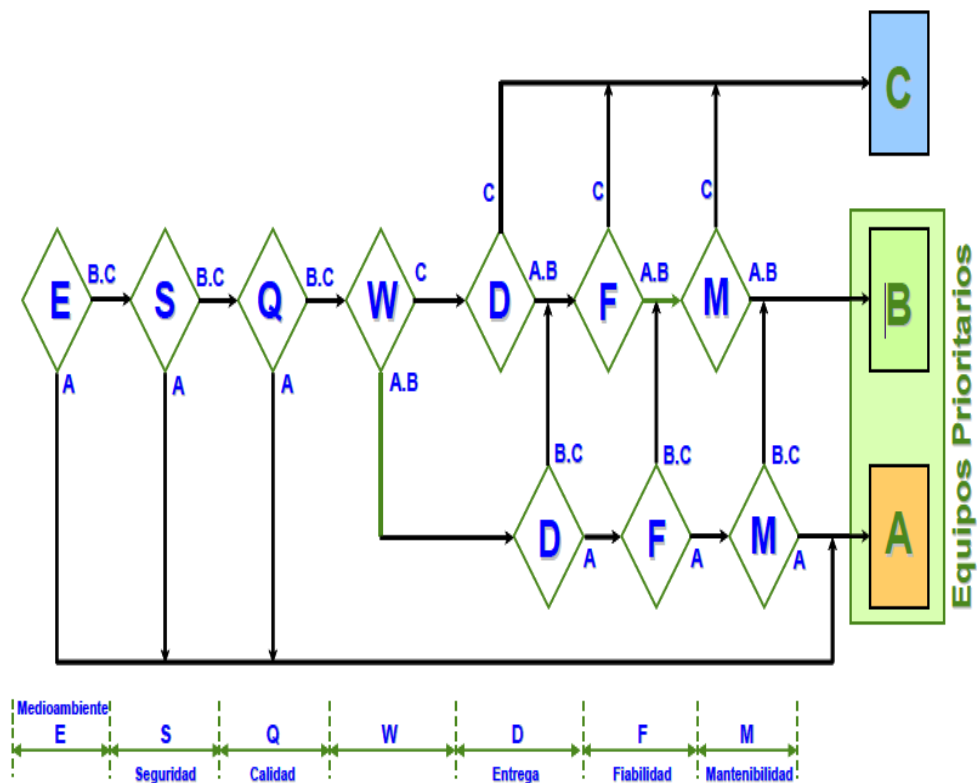


Figura 1.2: Flujograma de análisis de criticidad

Fuente: (Parra & Crespo, 2012).

De cada pregunta existen tres respuestas posibles A, B ó C que sirven para caracterizar al equipo. Por ejemplo (Figura 1.3):

- La primera pregunta hace referencia al **medio ambiente (E)**, un equipo se podría considerar como de categoría A, si un fallo del mismo puede provocar que la empresa tenga que recurrir a dar aviso a las autoridades públicas por problemas que pudiesen afectar a la salud de las personas y del medio ambiente (por ejemplo: Una fuga de amoniaco). El equipo sería de categoría B si un fallo del mismo provocase una contaminación o afección que pudiera gestionarse en el interior de la empresa (por ejemplo, una fuga de sosa que se controla con la red de aguas de la empresa). Finalmente un equipo se podría considerar de categoría C si un fallo del mismo no produjese ningún tipo de contaminación medioambiental.

- Las cuestiones de **seguridad (S)** se consideran a continuación. Los activos de categoría "A" serán aquellos cuyos fallos pueden producir accidentes que provocan absentismo laboral temporal o permanente en el lugar de trabajo. Los fallos en activos de la categoría "B" podría causar daños menores a la gente en el trabajo, no producen la ausencia de trabajo. Una vez más, los activos de la categoría "C" son activos cuyos fallos no pueden crear consecuencias relacionadas con la seguridad de las personas.
- La **calidad (Q)** es la siguiente cuestión que debe evaluarse utilizando el flujograma. El procedimiento para esta evaluación es muy similar al empleado para la valoración medio ambiental de los equipos. Los fallos de calidad también pueden producir un importante impacto externo, o una imagen muy negativa de la compañía en el mercado, al detectarse un fallo después de llegar el producto al cliente final (los consumidores en nuestro caso de estudio). Categoría A se dedica ahora a los activos que pudieran sufrir este tipo de fallo. Categoría "B" y "C" sería que los activos que, cuando no se mantienen adecuadamente, podría sufrir fallos que producen sólo una consecuencia interna o que no ocasionan ningún impacto, respectivamente.
- El tiempo de **trabajo de un activo (W)** también puede condicionar su criticidad. En este caso de estudio, los activos que trabajan a tres turnos serán de categoría "A". Los activos con dos turnos de trabajo estarán bajo categoría "B". Finalmente, cuando los activos de producción tienen en programación un solo turno de trabajo al día, los incluiremos en la categoría "C". En algunas ocasiones el trabajo extra que se requiere para el mantenimiento correctivo de activos, como media, también se puede considerar dentro de este criterio. Los activos que requieren una gran cantidad de horas extras para ser reparados entrarían en categoría "A", y así sucesivamente.
- La **entrega (D) o servicio** es un criterio relacionado con el impacto operacional de un fallo del activo. Los activos de categoría "A" son ahora los que producen un paro en toda la fábrica cuando fallan. Los activos de categoría "B" pueden dejar sólo una

línea de producción parada al fallar. Por último, los activos que no generan una interrupción significativa de la producción serían de la categoría "C".

- La **fiabilidad (F)** se introduce como criterio igualmente en el flujograma y se relaciona con la frecuencia de fallo que pueda existir en un activo que no se mantiene correctamente. En nuestro caso de estudio, consideramos como categoría "A" los activos con frecuencia de fallo menor de 5 h. Los activos con frecuencias de fallo mayor de 5 h y menor de 10 h se incluirán en la categoría "B". Finalmente, para activos con frecuencias de fallo superiores a 10 h, utilizaríamos la categoría "C". Es normal tener en cuenta un criterio de frecuencia que produce el 20% de los activos dentro de la categoría "A", sobre un 30% de la "B", mientras que el 50% entraría en categoría "C".
- La **mantenibilidad (M)**, es el último criterio que se debe tener en cuenta. Este criterio se relaciona con el tiempo medio necesario para reparar un fallo. Los activos que requieren un tiempo medio de reparación de más de 90 minutos se catalogan como "A". Entre 45 y 90 minutos estaría en categoría "B". Por último aquellos cuyo tiempo medio de reparación es inferior a 45 minutos estarían dentro de categoría "C".



Figura 1.3: Factores de criticidad



### 1.2.2.2 Criticidad total por riesgo (CTR)

El modelo de Criticidad Total por Riesgo (CTR) presentado a continuación, es un proceso de análisis semicuantitativo, soportado en el concepto del riesgo, entendido como la consecuencia de multiplicar la frecuencia de un fallo por la severidad del mismo.

A continuación se presentan de forma detallada, las expresiones utilizadas para jerarquizar los sistemas a partir del modelo CTR:

$$CTR = FF \times C \quad \text{Ecuación 1}$$

**Dónde:**

**CTR:** Criticidad total por Riesgo

**FF:** Frecuencia de fallos (rango de fallos en un tiempo determinado (fallos/año)

**C:** Consecuencias de los eventos de fallos

Se supone además que el valor de las consecuencias (C), se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$C = (IO \times FO) + CM + SHA \quad \text{Ecuación 2}$$

**Siendo:**

**IO** = Factor de impacto en la producción

**FO** = Factor de flexibilidad operacional

**CM** = Factor de costes de mantenimiento

**SHA** = Factor de impacto en seguridad, higiene y ambiente

La expresión final del modelo de priorización de CTR será la siguiente:

$$CTR = FF \times ((IO \times FO) + CM + SHA) \quad \text{Ecuación 3}$$

Los factores ponderados de cada uno de los criterios a ser evaluados por la expresión de riesgo se presentan a continuación:

- **Factor de Frecuencia de Fallos (FF)** (escala 1 - 4)

- 1: Excelente: menos de 0,5 eventos al año
- 2: Bueno: entre 0,5 y un 1 evento al año
- 3: Promedio: 1 y 2 eventos al año
- 4: Frecuente: mayor a 2 eventos al año.

- **Factores de Consecuencias**

**Impacto Operacional (IO)** (escala 1 - 10)

- 1: Pérdidas de producción menor al 10%
- 3: Pérdidas de producción entre el 10% y el 24%
- 5: Pérdidas de producción entre el 25% y el 49%
- 7: Pérdidas de producción entre el 50% y el 74%
- 10: Pérdidas de producción superiores al 75%

**Impacto por Flexibilidad Operacional (FO)** (escala 1 - 4)

- 1: Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños.
- 2: Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios.
- 4: No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes.

**Impacto en Costes de Mantenimiento (CM)** (escala 1 - 2)

- 1: Costes de reparación, materiales y mano de obra inferiores a 20.000 dólares
- 2: Costes de reparación, materiales y mano de obra superiores a 20.000 dólares

**Impacto en Seguridad, Higiene y Ambiente (SHA)** (escala 1 - 8)

- 1: No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales.
- 3: Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) y/o incidente ambiental menor (controlable), derrames fáciles de contener y fugas repetitivas.
- 6: Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración.
- 8: Riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente (catastrófico) que exceden los límites permitidos.

La selección de los factores ponderados se realiza en reuniones de trabajo con la participación de las distintas personas involucradas en el contexto operacional del activo en estudio (operaciones, mantenimiento, procesos, seguridad y ambiente). Posteriormente, se seleccionan los sistemas a priorizar y se genera una lluvia de ideas en la que se le asignan a cada equipo los valores correspondientes a cada uno de los factores que integran la expresión de Criticidad Total por Riesgo (ecuación 3). Para obtener el nivel de criticidad de cada equipo/sistema, se toman los valores totales de cada uno de los factores principales: frecuencia y consecuencias de los fallos y se ubican en la matriz de criticidad 4x4 (imagen 1.4). El valor de frecuencia de fallos se ubica en el eje vertical y el valor de consecuencias se ubica en el eje horizontal (se toma el resultado final de la ecuación (2):  $(IO \times FO) + CM + SHA$ ). La matriz de criticidad mostrada a continuación permite jerarquizar los sistemas en tres áreas

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

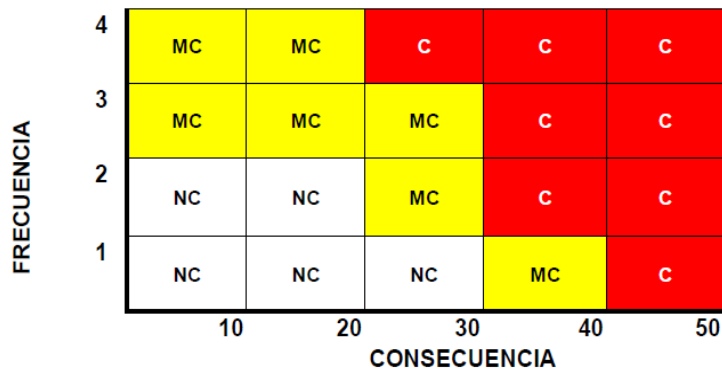


Figura 1.4: Matriz de criticidad  
Fuente: (Parra & Crespo, 2012).

### 1.2.2.3 Modelo de criticidad semicuantitativo “MCR” (matriz de criticidad por riesgo)

El siguiente modelo de criticidad toma como referencia el método MCR diseñado para los activos de producción (Off-Shore del área de Magallanes, elaborada por ENAP SIPETROL). El modelo propuesto está basado en la estimación del factor de riesgo a través de las siguientes expresiones: (Parra & Crespo, 2012)

$$\mathbf{Riesgo = FF \times C}$$

#### **Ecuación 4**

**Dónde:**

**FF** = Frecuencia de fallos (número de fallas en un tiempo determinado)

**C** = Consecuencias de los fallos a la seguridad, ambiente, calidad, producción, etc. (calculado ahora conforme a Ecuación 4.1)

$$C = (\text{Impacto en Seguridad y Medio Ambiente (SHA)} \times 0,2) + (\text{Impacto en Calidad (IC)} \times 0,2) + (\text{Impacto Producción (IP)} \times 0,2) + (\text{Impacto por Baja Mantenibilidad (BM)} \times 0,2) + (\text{Costos de Mantenimiento (CM)} \times 0,2)$$

#### **Ecuación 4.1**

A continuación se presentan los factores ponderados diseñados para el proceso de jerarquización de los factores de frecuencia y consecuencias de fallos:

- **Factor de frecuencia de fallos (FF)** (escala 1 - 5)
  - 1: Sumamente improbable: menos de 1 evento en 5 años
  - 2: Improbable: 1 evento en 5 años
  - 3: Posible: 1 evento en 3 años
  - 4: Probable: entre 1 y 3 eventos al año
  - 5: Frecuente: más de 3 eventos por año
  
- **Factores de Consecuencias** (escala 1 - 5) o **Impacto Seguridad y Medio Ambiente (SHA)**
  - 1: No existe ningún riesgo de salud ni de daños ambientales.
  - 3: Riesgo de vida del personal o daños menores a la salud del personal y/o incidente ambiental menor, derrames fáciles de contener y fugas repetitivas.
  - 5: Alto riesgo de vida del personal, daños graves a la salud del personal y/o incidente ambiental mayor (catastrófico), derrames y fugas que exceden los límites permitidos.

- **Impacto en Producción (IP)**

- 1: Pérdidas de producción menor al 10%.
- 2: Pérdidas de producción entre el 10% y el 24%.
- 3: Pérdidas de producción entre el 25% y el 49%.
- 4: Pérdidas de producción entre el 50% y el 74% (unidades de reserva Métodos de parcial).
- 5: Pérdidas de producción superiores al 75% (no hay unidades de reserva).

- **Impacto por Baja Mantenibilidad (BM)**

1. Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños.
3. Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios.
5. No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes.

- **Impacto en Costos de Mantenimiento (CM)**

- 1: Costos de reparación incluyendo materiales y HH, se ubican por debajo del 10% del valor del equipo.
- 2: Costos de reparación incluyendo materiales y HH, se ubican entre un 10% y el 24% del valor del equipo.
- 3: Costos de reparación incluyendo materiales y HH, se ubican entre un 25% y el 49% del valor del equipo.
- 4: Costos de reposición incluyendo materiales y HH se ubican entre un 50% y el 74% del valor del equipo.
- 5: Daños irreversibles al sistema, costos de reparación incluyendo materiales y HH supera en un 75% el valor del equipo.

Los resultados de la evaluación de los factores anteriores, se presentan en una matriz de criticidad 5 x 5, donde el eje vertical está formado por cinco niveles de frecuencia de fallos, mientras que el eje horizontal está formado por cinco niveles de consecuencias de fallos. La matriz está dividida en cuatro zonas que representan cuatro niveles de criticidad: (Parra & Crespo, 2012)

**Zonas de criticidad:**

**B = Baja criticidad**

**M = Media criticidad**

**A = Alta criticidad**

**MA = Muy Alta criticidad**

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

Figura 1.5: Matriz de Criticidad propuesta por el modelo MCR

Fuente: (Parra & Crespo, 2012).

**1.2.2.4. Proceso analítico jerárquico AHP (*Analityc Hierarchy Process*)**

Es un método de estimación de ayuda en la toma de decisiones basándose en múltiples criterios de decisión, AHP fue propuesto por **Thomas L. Saaty** (Saaty T. L., 1980) en la década de los 80 y con el transcurso de los años ha tenido mejoras por quienes han aplicado este modelo en diferentes proyectos. Se ha convertido en una de las técnicas multicriterio más utilizadas.

AHP se basa en juicios subjetivos realizados por expertos en el tema al cual queremos jerarquizar; los expertos aportan con conocimiento subjetivo, consistente en comparaciones entre las principales tareas que constituyen un proyecto. Ellos estiman una medida relativa evaluando la proporción entre cada par de tareas previamente definidas para el proceso del proyecto. (Joseba Esteban López, 2006)

**1.2.2.4.1 Análisis del modelo AHP de una manera sencilla**

1. Se deberá definir los criterios de decisión en función de objetivos jerárquicos, estructura de los diferentes niveles: indicando el máximo con la definición del objetivo principal del proceso jerárquico, después definir los niveles

intermedios (criterios y sub-criterios a evaluar) y finalmente, en el nivel más bajo se describe las alternativas a ser comparadas.

2. Evaluar los diferentes criterios, sub-criterios y alternativas en función de su importancia según cada nivel; tanto criterios cualitativos y cuantitativos serán comparados mediante juicios entre el equipo de mantenimiento para obtener los pesos y prioridades. AHP utiliza comparaciones simples “apareadas” para determinar los pesos y evaluarlos; de esta forma el analizador se concentra en solo dos criterios al mismo tiempo, los juicios verbales son trasladados a una escala de puntuación (**Tabla1.1**).
  
3. Luego, en una matriz de juicios, un vector de prioridad se calcula y es usado posteriormente para “comparar” los elementos de la matriz. Ya que (Saaty (1980-1990) demostró matemáticamente que el autovector normalizado calculado a partir de la matriz es la mejor aproximación de evaluación de criterios analizados y para criterios cuantitativos es necesario diseñar un método de priorización que permita cuantificar de forma consistente el peso de cada criterio a ser analizado (Parra & Crespo, 2012).

Tabla1.1: Valoración de juicios

Juicios	Puntuación
Igual	<b>1</b>
	<b>2</b>
Moderado	<b>3</b>
	<b>4</b>
Fuerte	<b>5</b>
	<b>6</b>
Muy	<b>7</b>
	<b>8</b>
Extremo	<b>9</b>

4. AHP permite evaluar la congruencia de los juicios con el radio de inconsistencia (IR); antes de determinar una inconsistencia, se debe estimar el índice de consistencia (CI) de una matriz de juicios nxn. (Parra & Crespo, 2012)

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Ecuación 5}$$

$\lambda_{max}$  : es el máximo autovalor de la matriz.

La siguiente formula permite obtener  $\lambda_{max}$  (Saaty T. L., 1990)

$$W * \tilde{\omega} = \lambda_{max} * \tilde{\omega} \quad \text{Ecuación 6}$$

**W**: es la matriz de juicios

$\tilde{\omega}$ : es el valor del auto vector de la matriz de juicios

Entonces el radio de inconsistencia (IR)

$$IR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Ecuación 7}$$

**RI**: es el valor aleatorio promedio de CI para una matriz n x n; los valores de RI son los siguientes Tabla1.2.

**N** el número de elementos que se van a comparar.

Tabla1.2: Valor del RI según el número de elementos que se va a comparar

<b>N</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>RI</b>	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40

Algunos autores aconsejas calcular RI con la siguiente fórmula:

$$RI = \frac{1.98(n-2)}{n} \quad \text{Ecuación 8}$$

Los juicios pueden ser considerados aceptables si  $IR \leq 0,1$ . En casos de inconsistencia, el proceso de evaluación para la matriz evaluada es inmediatamente repetido.



Inconsistencias superiores a 0,1 o más justifican una mayor investigación de los criterios evaluados.

- $IR \leq 0.10$  Consistencia razonable
- $IR > 0.10$  Inconsistencia

5. Jerarquizar las alternativas y tomar las decisiones correspondientes. Para cada alternativa (opciones a jerarquizar), se calcula el nivel de preferencia (jerarquización) sobre una escala entre 0.0000 – 1.000, obteniéndose como resultado alternativas jerarquizadas en función de los criterios de decisión evaluados, ver detalles en (Saaty T. L., 1980). (Parra & Crespo, 2012)

#### 1.2.2.4.2 Algoritmo AHP

El algoritmo del método del proceso jerárquico analítico consta de cinco pasos que se describen a continuación.

1. Se define el problema o el estudio que vamos a realizar; para ello se debe dividir en tres partes: objetivos, criterios y alternativas.

El objetivo es la decisión que se va a tomar, los criterios representan los factores que afectan a la preferencia o necesidad de una alternativa y pueden estar compuestos por otros criterios o subcriterios, las alternativas son las posibles acciones de las que se dispone y se intente tomar una de ellas. Una alternativa puede ser cualquier entidad relevante en un grupo de interés como casos de usos: software, módulos, objetos, etc. Es decir cualquier entidad de la que se pueda conocer magnitudes que se necesitan a la hora de tomar decisiones. (Joseba Esteban López, 2006)

2. Se debe construir una jerarquía de la que AHP toma el nombre, se toma una serie de decisiones identificando los factores importantes y como se relacionan con el resto de factores. Establecer una escala verbal (*verbal scale*) agiliza el proceso de estimación, esta escala ayuda a entender como de menor es el término “menor que” o como de mayor es el término “mayor que” se compone de cuatro atributos: definición, explicación, valor relativo y valor recíproco. Thomas L. Satty propone

una escala compuesta por 9 valores y sus recíprocos como se puede ver en el (Tabla 1.1). (Joseba Esteban López, 2006)

Tabla 1.3: Escala verbal

<b>Definición</b>	<b>Explicación</b>	<b>Valor Relativo</b>	<b>Valor Recíproco</b>
Mismo tamaño	Las dos entidades tienen extremadamente el mismo tamaño	1	1.00
Ligeramente mayor (menor)	La experiencia reconoce una entidad como algo más grande (más pequeño)	3	0.33
Mayor(menor)	La experiencia reconoce una entidad como definitivamente más grande (menor)	5	0.20
Mucho mayor (menor)	El dominio de una entidad sobre otra es evidente; una diferencia muy fuerte de tamaño	7	0.14
Extremadamente mayor (menor)	La diferencia entre las identidades comparadas es de orden de magnitud	9	0.11
Valores intermedios entre puntos adyacentes de la escala	Cuando el compromiso es necesario	2,4,6,8	0.5, 0.25, 0.16, 0.12

3. Luego, se obtiene la matriz de juicios (*Judgement matriz*) en esta etapa entra el juicio de los expertos, el experto basándose en la escala verbal debe hacer comparaciones por parejas en cada nivel de la jerarquía y anotar los valores en la matriz; la matriz de juicios es de tamaño  $n \times n$ , donde  $n$  es el número de alternativas de las que se dispone.

Cada celda de la matriz de juicios contiene un valor  $a_{ij}$ , que representa el tamaño relativo de la entidad  $i$  respecto de la entidad  $j$ ; los elementos de la matriz definen como se muestra en la ecuación 9, si la entidad  $i$  es  $a_{ij}$  veces mayor (o menor) que la entidad  $j$ , entonces la entidad  $j$  es  $1/a_{ij}$  veces menor (o mayor) que la entidad  $i$ .

Teniendo en cuenta esta premisa y que la diagonal de la matriz solo tiene como valor la unidad no haría falta calcular todos los valores de la matriz; solo es necesario calcular la mitad de la matriz ya sea la parte superior o inferior. (Joseba Esteban López, 2006)

$$A^{n \times n} = \{a_{ij} = \frac{S_i}{S_j}$$

$$A^{n \times n} = \{a_{ij} = 1 \quad \text{Ecuación 9}$$

$$A^{n \times n} = a_{ij} = \frac{1}{a_{ij}}$$

4. Al hacer comparaciones por parejas, es necesaria la colaboración del experto y al menos una entidad de referencia de la que conozca su magnitud real de proyectos anteriores. Las proporciones de la entidad de referencia son las primeras que se han de situar en la matriz; es importante recalcar que la proporción de esta entidad no ocupe los valores extremos de la escala verbal, sino que se situé más o menos hacia la mitad de ella. De esta manera se minimizan los posibles prejuicios introducidos en la matriz de juicios, otra posibilidad con el mismo objetivo radica en introducir más de una entidad de referencias repartidas uniformemente en la escala verbal. (Joseba Esteban López, 2006)
5. Con una matriz de juicios por cada criterio a tener en cuenta en la toma de decisiones, se calcula la escala de proporción (*ratio scale*); la escala de proporción es un vector  $r$  en el que cada posición del vector contiene un valor proporcional a la entidad  $i$  en relación al criterio elegido. También se calcula el índice de inconsistencia (*inconsistency index*), este índice nos proporciona una medida de cómo de lejos está nuestra estimación de la consistencia perfecta; una matriz de

juicios perfectamente consistente es aquella en la que todos los elementos satisfacen  $a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik} \forall i, j, k$ .

Como procedimiento para calcular la escala de proporción y el índice de inconsistencia, se puede utilizar el modelo propuesto por Edmundo Miranda ecuación 9 por sencillez y buenos resultados. También hay que calcular la media geométrica  $u_i$  de cada fila de la matriz de juicios definida para determinar criterio, usamos la ecuación 10. (Joseba Esteban López, 2006)

$$u_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad \text{Ecuación 10}$$

La escala de proporción, denominada vector de valores propios (eigenvalue)  $r$ , consiste en un vector en que cada valor se calcula aplicando la ecuación 11.

$$r = [r_1, r_2, \dots, r_n] \text{ con } r_i = \frac{u_i}{\sum_{j=1}^n u_j} \quad \text{Ecuación 11}$$

El índice de inconsistencia se puede calcular de la siguiente forma con la ecuación 12.

$$CI = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n (\ln a_{ij} - \ln \frac{u_i}{u_j})}{(n-1) \times (n-2)}}}{2} \quad \text{Ecuación 12}$$

A partir del vector de valores propios (eigenvalue) y el valor real de la entidad de referencia, se puede calcular el valor absoluto de cada entidad. Para ello se debe aplicar la ecuación 13; aplicando estos cálculos con los demás criterios, previamente ordenados según el porcentaje de contribución sobre el proyecto en su totalidad, se puede calcular el valor de cada alternativa. (Joseba Esteban López, 2006)

$$\text{Valor}_i = \frac{r_i}{r_{\text{referencia}}} \times \text{Valor}_{\text{referencia}} \quad \text{Ecuación 13}$$

#### 1.2.2.4.3 Características de AHP

El proceso jerárquico analítico es uno de los métodos más sencillos, cuya dificultad principalmente se encuentra en identificar los atributos y su contribución relativa, además proporciona una visión del proyecto jerarquizado, estructurado y sistemático. (Joseba Esteban López, 2006)

AHP aporta una notable ventaja para expertos, ya que resulta fácil hacer comparaciones en parejas (entre los pares de tareas) que estimar cada tarea de una en una; por otro lado, el número de comparaciones que se debe realizar puede generar un problema. Esto se debe a que la relación de las comparaciones a realizar y el número de tareas es de orden cuadrático, si el proyecto se compusiera de  $n$  tareas y el número de comparaciones que se deberían realizar sería de  $n = (n - 1)/n$ . En el supuesto de manejar 50 tareas se deberán realizar 1225 comparaciones; para evitar esto, aun a riesgo de aumentar la homogeneidad de la matriz de juicios, se pueden agrupar las tareas similares en grupos más reducidos. (Joseba Esteban López, 2006)

En las fases iniciales del desarrollo de un proyecto suele darse una carencia de datos de referencia; el método de estimación AHP resulta muy útil en estas etapas iniciales, ya que como mínimo necesita un único dato de referencia (la tarea de referencia). Esta característica posibilita hacer estimaciones bastante precisas en fases tempranas del desarrollo de un proyecto. (Joseba Esteban López, 2006)

### 1.3 Conclusiones

- Existen innumerables publicaciones que confirman que diferentes empresas en el mundo aplican la jerarquización en distintas áreas o sistemas por ejemplo. En Cuba, en el sistema energético del país en base a la jerarquización se determinó los factores que se deben analizar: (Frecuencia de fallo, tiempo promedio para reparar, impacto sobre la producción, costos de reparación, impacto al medio ambiente, impacto a la salud, impacto a la seguridad personal, etc.). Finalmente se concluye que el modelo es aplicable en varias plantas de grupos electrógenos.

- Otro ejemplo interesante muestra la aplicación del modelo AHP, sobre la infraestructura ferroviaria en el sector público (Serbia) para establecer las rutas de vías que necesiten atención y criterios más influyentes. Se determinó cinco variables: criterios de costo/beneficio, restricciones de velocidad, capacidad de la infraestructura ferroviaria, compatibilidad con los acuerdos internacionales y volumen del tráfico y se obtuvo un modelo que permite determinar el criterio más relevante para priorizar la ruta. (Macura, et al, 2011)
- Carlos Parra y Adolfo Crespo en su libro determinan que la jerarquización cuantitativa es totalmente diferente a la jerarquización cualitativa; en un estudio realizado para una empresa petrolera, se implementó el proceso analítico jerárquico (AHP) cuantitativo, los resultados mostraron diferencias importantes en comparación con los registros, los mismos que fueron esbozados utilizando un modelo de jerarquización cualitativo.
- En base al análisis realizado, se ha podido conocer las diferentes metodologías que existen para realizar los procesos de jerarquización, y a través del análisis del estado del arte se conoció la experiencia y los resultados que se han obtenido en diferentes estudios, a partir de esta información se realizará un análisis profundo de cual debería ser el método más conveniente para utilizarse en el proceso de jerarquización de los equipos del sistema tranvia de los cuatro rios.

## CAPITULO II

### SELECCIÓN DEL MODELO DE JERARQUIZACIÓN ADECUADO

#### 2.1 Características generales del sistema tranviario cuatro ríos

Como punto de partida es necesario conocer a detalle tanto las operaciones, como las principales características técnico – funcionales del sistema tranviario, a continuación se realizará un breve análisis que permita identificar estas características, aún cuando el sistema todavía no se encuentra operativo.

El tranvía es un servicio de transporte público, depende de varios factores para su funcionamiento (infraestructura, suministros, personal, planificación, mantenimiento, entre otros). Para entrar en funcionamiento necesita procesos secuenciales y lograr su explotación de manera constante.

Se necesita tener una infraestructura adecuada “Sistema de obra civil: vías, estaciones, edificios u oficinas, planta de mantenimiento, redes eléctricas subterráneas y aéreas, servicios básicos, boleterías, etc. Como se aprecia en la (**Figura 2.1**) la ruta de 14Km que tiene la vía del tranvía para prestación del servicio así como las 20 estaciones que debe poseer.



Figura 2.1: Ruta del tranvía de los cuatro ríos

Fuente: (Ochoa, 2015).

El sistema “material rodante” es importante para mantener funcionamiento del tranvía y este pueda prestar el servicio de trasportación a los usuarios.

También se requiere de un sistema de alimentación o generación, esto se logra mediante las subestaciones eléctricas y generadores. Distribuidos a lo largo de la ruta del tranvía.

Además debe existir un sistema de comunicación y señalización, es muy importante una correcta señalización en todo el sistema del tranvía (estaciones, vías, intercepciones, boletería, etc.) y un sistema de comunicación eficiente que controle todo el tranvía, debe existir una sincronización entre el sistema de comunicación y señalización para una correcta vinculación de: usuarios, empleados, población en general, sistemas, etc. (Figura 2.2).



## 2.2 Organigrama del tranvía de los cuatro ríos

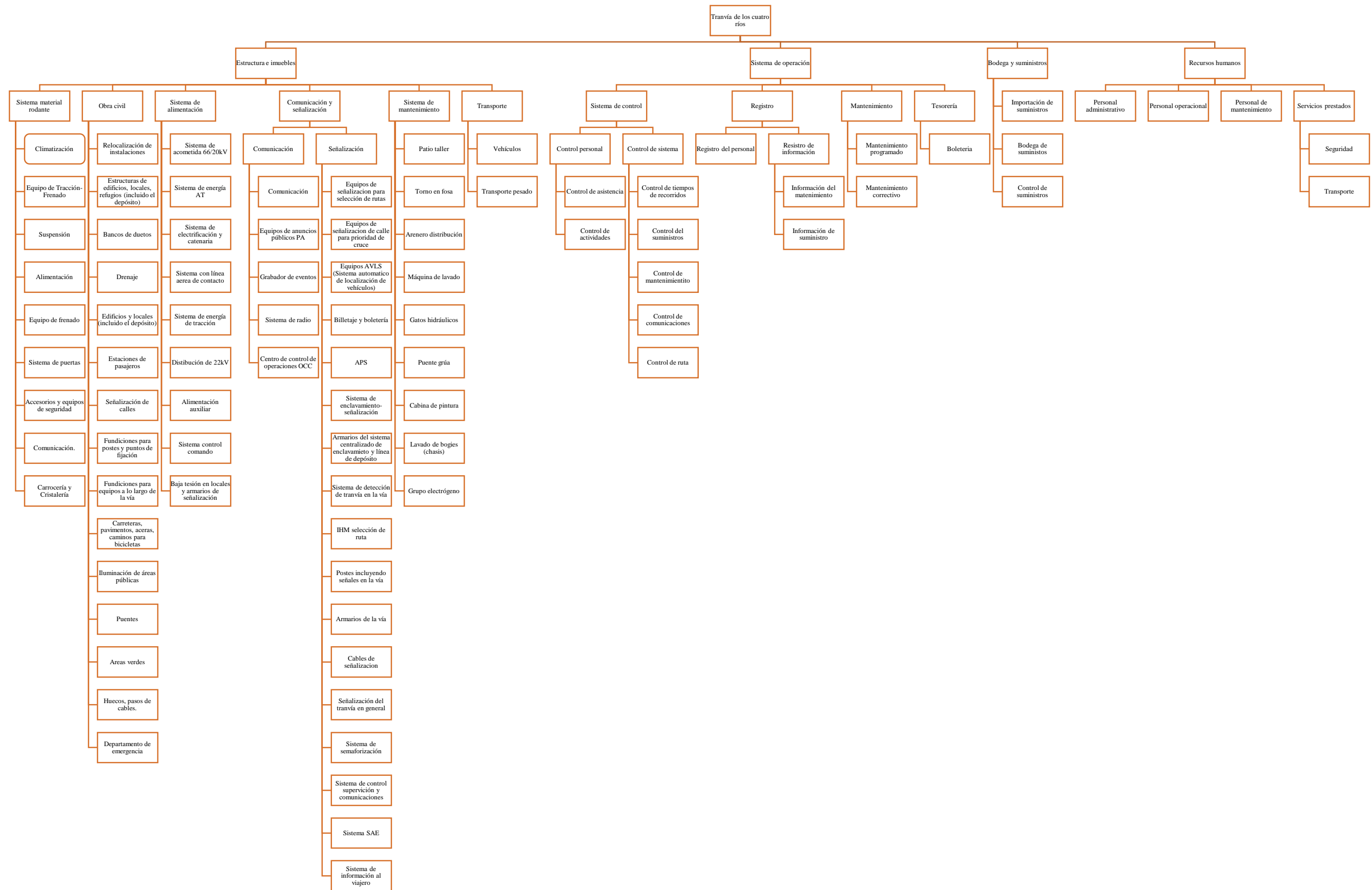


Figura 2.2: Organigrama de funcionamiento del "tranvía de los cuatro ríos"

### 2.3 Sistemas principales del tranvía cuatro ríos

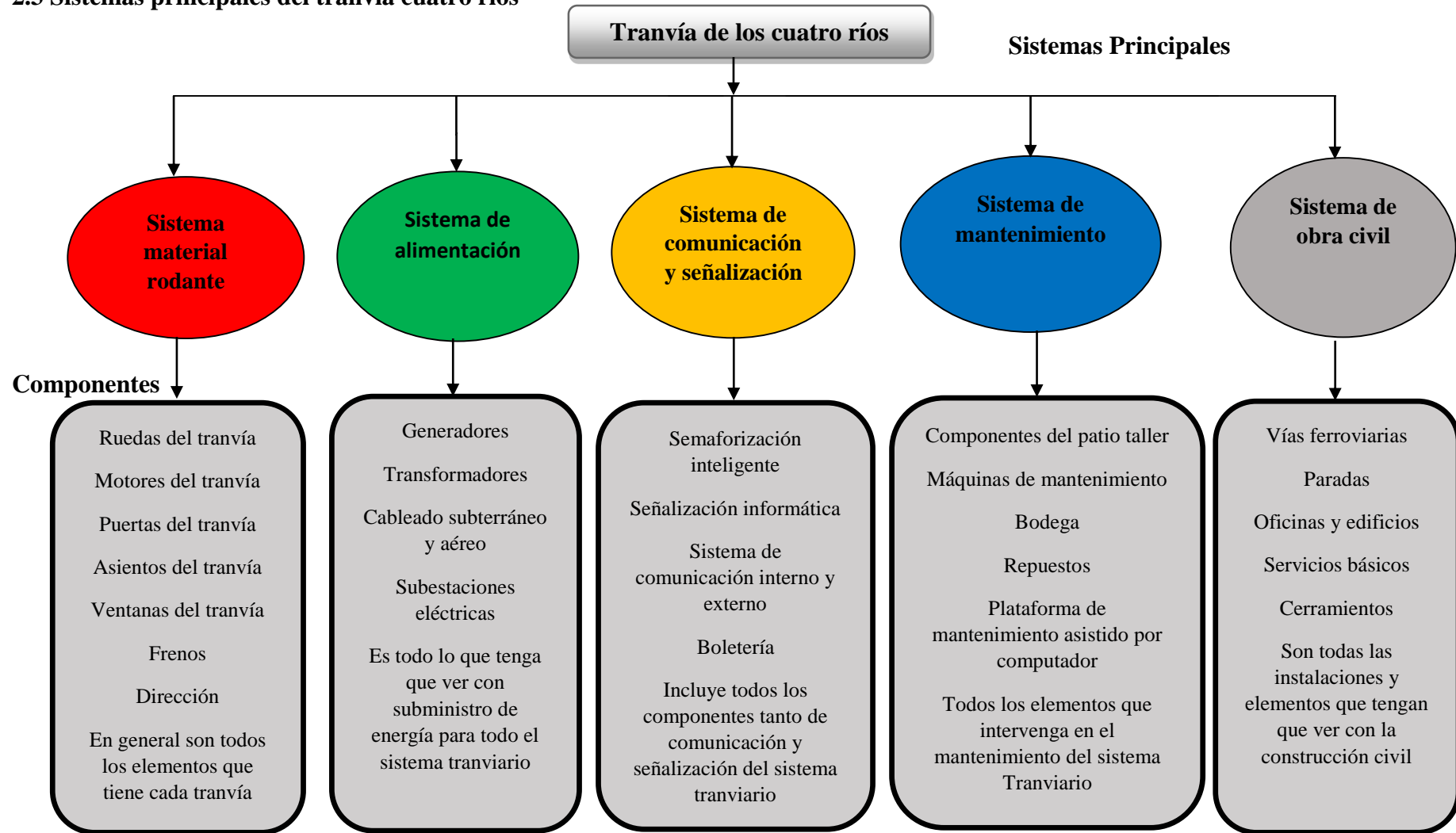


Figura 2.3: Sistemas principales del tranvía de los cuatro ríos

Al ser el material rodante el sistema que mayor mantenimiento requiere debido a que sus diferentes componentes deben estar en funcionamiento todo el tiempo que el sistema tranviario esté operando y es el principal sistema para que el tranvía cumpla su objetivo que es transportar a los usuarios; es necesario subdividirlo en diferentes subsistemas.

Los cuales son descritos a continuación; de acuerdo al esquema que maneja la unidad de mantenimiento del sistema tranvía de los cuatro ríos (Figura 2.4). Además en el capítulo 3 se analizará de forma cualitativa cual es el subsistema más crítico que tiene el sistema del material rodante.

## 2.4 Subsistemas del sistema de material rodante



Figura 2.4: Subsistemas del sistema del material rodante

## 2.4.1 División de los subsistemas del material rodante

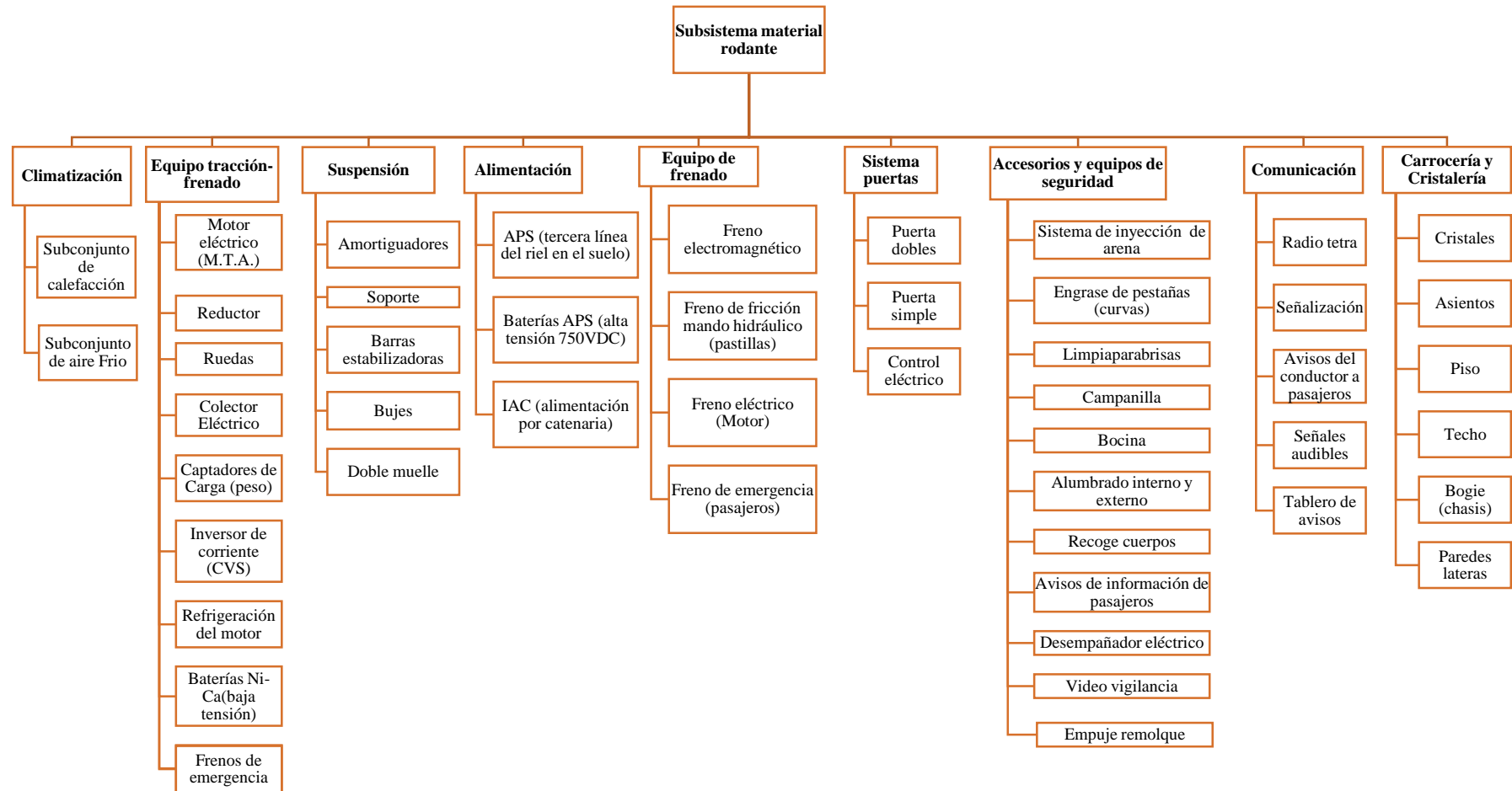


Figura 2.5: División de los subsistemas del material rodante

2.5 Ciclo básico de operación del material rodante

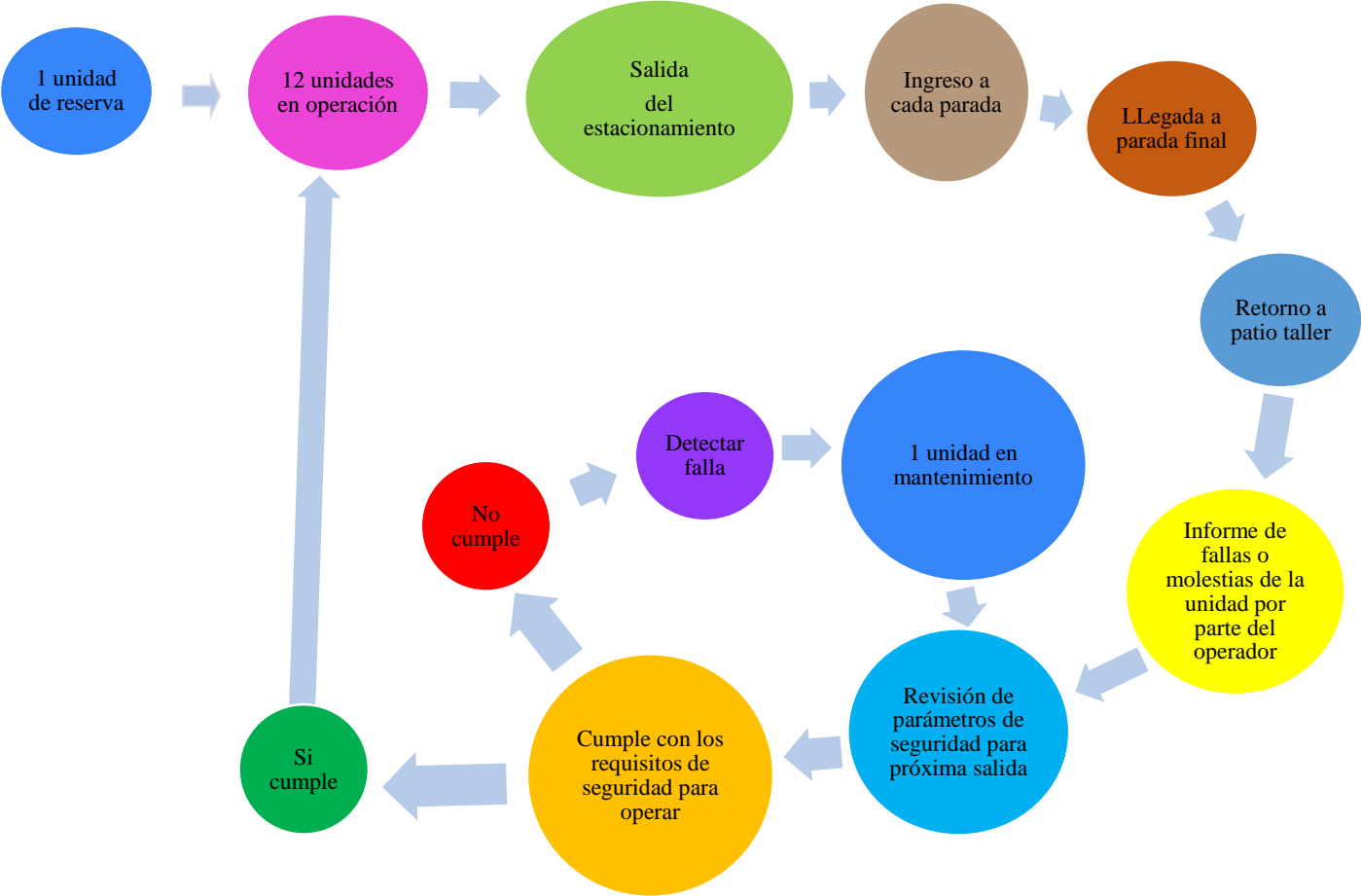


Figura 2.6: Ciclo de operación del tranvía

## 2.6. Ciclo operativo del subsistema material rodante

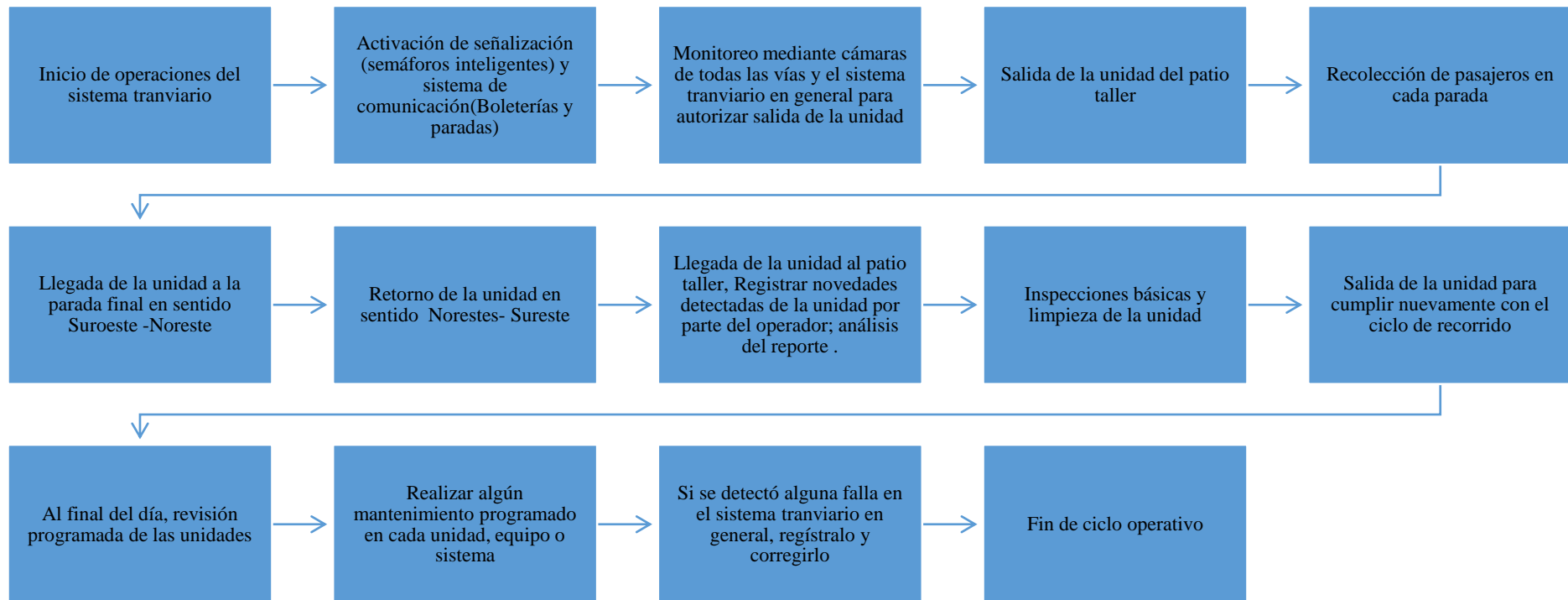


Figura 2.7: Ciclo operativo del subsistema material rodante

### 2.7 Diagrama de flujo del mantenimiento de una unidad del material rodante

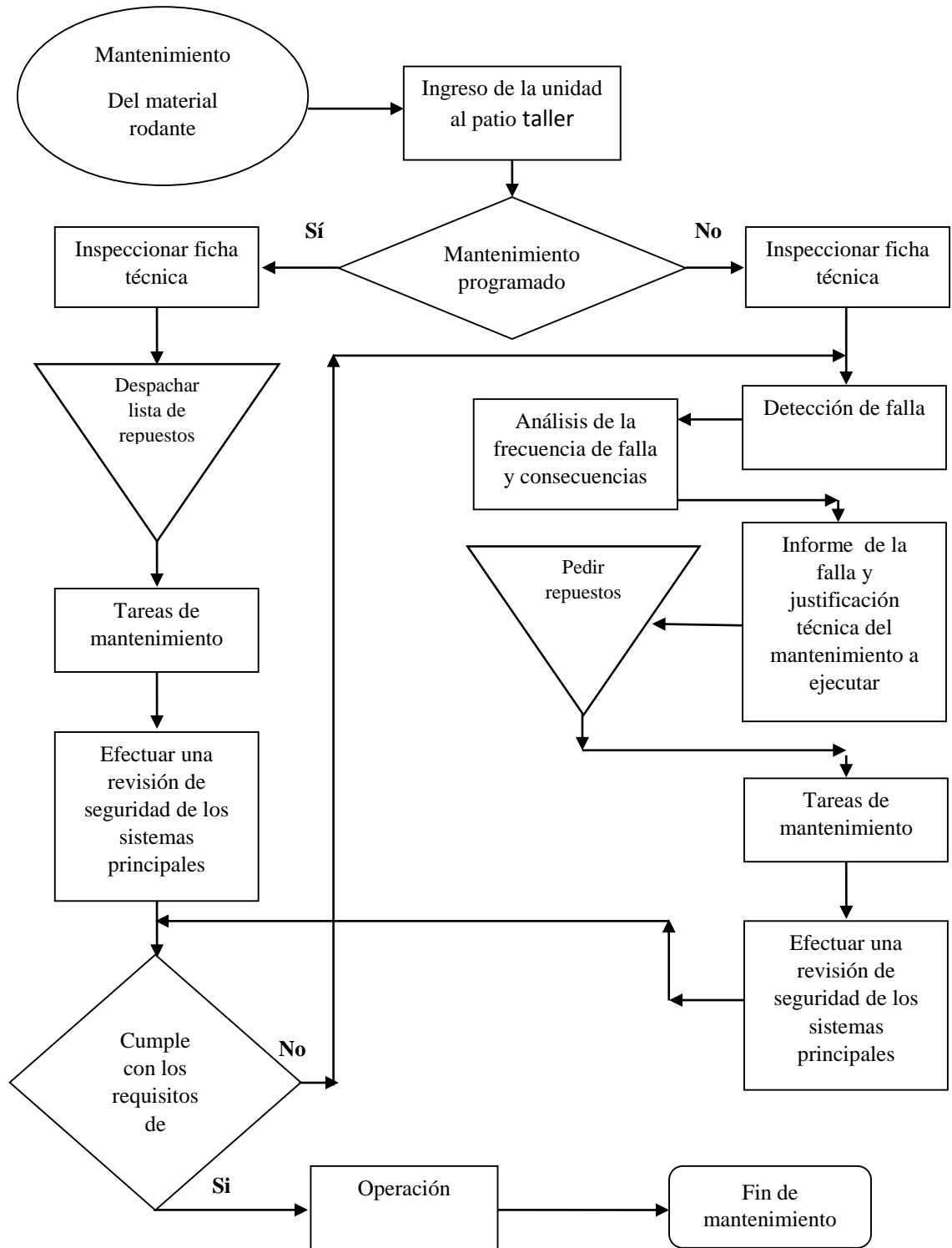


Figura 2.8: Diagrama de flujo del mantenimiento de una unidad del tranvía

## 2.8. Análisis comparativo de los métodos de jerarquización

Tabla 2.1: Ventajas y desventajas de los modelos de jerarquización

	Ventajas	Desventajas
<b>Método del flujograma de análisis de criticidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No se necesita llevar o tener un historial del equipo o sistema.</li> <li>El análisis es muy rápido.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es un método cualitativo.</li> <li>Debe existir al menos una persona que tenga experiencia sobre el tema.</li> <li>Cada persona puede tener un criterio diferente sobre el impacto de cada factor al realizar el análisis.</li> </ul>
<b>Modelo de criticidad semicuantitativo “CTR”(Criticidad Total Por Riesgo)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es un proceso de análisis semicuantitativo.</li> <li>Toma en cuenta el historial del equipo dando importancia a las condiciones de operación y al resultado de las tareas de mantenimiento.</li> <li>Relaciona la frecuencia de un fallo por la severidad del mismo.</li> <li>Incluye ciertos factores (Costos, impacto a la producción, contaminación, seguridad, operaciones etc.) para el análisis.</li> <li>Utiliza una matriz de frecuencia – consecuencia para determinar la criticidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se necesita tener o llevar un historial del equipo o sistema.</li> <li>Pueden variar los coeficientes de cada factor, dependiendo del criterio de quien los tome.</li> </ul>



Tabla 2.2: Ventajas y desventajas de los modelos de jerarquización

	Ventajas	Desventajas
<p><b>Modelo De Criticidad Semicuantitativo “MCR” ( Matriz de criticidad por riesgo)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analiza la criticidad relacionando la frecuencia de un fallo y la consecuencia que genera el mismo (seguridad, ambiente, calidad, etc.).</li> <li>• Utiliza una matriz de con mayor cantidad de variables y la realiza mediante una matriz frecuencia – consecuencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesita tener o llevar un historial del equipo o sistema.</li> <li>• Pueden variar los coeficientes de cada factor, dependiendo del criterio de quien los tome</li> </ul>
<p><b>Modelo De Criticidad Cuantitativo “AHP”(Proceso Analítico Jerárquico)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una herramienta de toma de decisiones multicriterio.</li> <li>• Se utiliza en problemas que necesitan análisis tanto cualitativos y cuantitativos.</li> <li>• Permite orientar fácilmente recursos humanos, financieros y tecnológicos, con el fin de lograr planes eficientes de mantenimiento.</li> <li>• Permite una distribución efectiva de los recursos de mantenimiento en función de la importancia de la criticidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesita tener o llevar un historial del equipo o sistema.</li> <li>• Pueden variar los coeficientes de cada factor, dependiendo del criterio de quien los tome.</li> </ul>

## 2.9 Análisis por medio de matrices para seleccionar el método más adecuado de jerarquización para un sistema tranviario

Con este análisis se pretende establecer el modelo de jerarquización que será utilizado para el tranvía cuatro ríos, para ello se pretende vincular la prioridad de cada método entre sí e implantar las ventajas de uno con respecto al otro, para determinar el método que se acople al sistema del tranvía.

Para utilizar este método el primer paso es asignar un número a las metodologías de jerarquización (Tabla 2.3), para facilitar la identificación de los mismos en el procedimiento.

Tabla 2.3: Metodologías de jerarquización

Metodologías De Jerarquización
1 Método del flujograma de análisis de criticidad (cualitativo)
2 Modelo de criticidad semicuantitativo “CTR” (criticidad total por riesgo)
3 Modelo de criticidad semicuantitativo “MCR” (matriz de criticidad por riesgo)
4 Proceso analítico jerárquico AHP ( <i>Analityc Hierarchy Process</i> )

### 2.9.1 Matriz de Relaciones

Un diagrama de matriz es una herramienta gráfica que muestra la conexión o relación entre ideas, problemas, causas y procesos, métodos y objetivos y, en general, entre conjuntos de datos, en forma de una tabla (matriz). La relación se indica en cada intersección de filas y columnas.

El diagrama de matriz: (AITECO, 2013)

- Permite analizar y clasificar sistemáticamente la presencia e intensidad de las relaciones entre dos o más conjuntos de elementos.
- Ayuda en la priorización de los recursos y procesos.
- Facilita al equipo alcanzar consensos, mejorando el apoyo a una decisión final.
- Mejora el método de trabajo con la observación de un elevado número de factores de decisión.

El diagrama de matriz se puede realizar bajo distintas modalidades, para comparar más de dos listas de factores o elementos. Hay seis diferentes en forma de matrices posibles: L, T, Y, X, C y en forma de tejado, dependiendo de los grupos de factores a comparar. Las más habituales son la matriz en forma de **L** y en forma de **T**. (AITECO, 2013)

#### **2.9.1.1 Aplicación de matriz de relación para la selección de la metodología de jerarquización para el sistema tranviario**

- Realizar una matriz 4x4 porque se tiene 4 variables (Tabla 2.3)
- Comparar cada variable de la fila 1 respecto a cada variable de la columna 1 respectivamente.
- Si la variable de la fila es más importante que la columna se pone 1 en caso contrario se coloca 0, cuando se compara las mismas variables se coloca 1 es decir en cada espacio de la diagonal de la matriz va 1, esto se realiza en toda la matriz.

Para determinar que metodología era superior a la otra se tomaron en cuenta las ventajas y desventajas de cada una de ellas escritas en las tablas (Tabla 2.1 y Tabla 2.2). Una vez obtenidos los resultados (Tabla 2.4) se suma lo valores tanto de las filas de manera horizontal, y de manera vertical los valores de las columnas. Los valores de las columnas definen un punto x y las filas y.

Tabla 2.4: Matriz de relación de las metodologías de jerarquización

	1	2	3	4	Total	Y	0= no 1=si
1	1	0	0	0	1		
2	1	1	0	0	2		
3	1	1	1	0	3		
4	1	1	1	1	4		
x Total	4	3	2	1			

Después se obtienen los siguientes puntos que serán graficados:

- 1 (4,1)
- 2 (3,2)
- 3 (2,3)
- 4 (1,4)

Se calcula mediante la ecuación 14 las líneas que dividen en cuatro zonas el primer cuadrante (**Figura 2.9**), donde n es el número de variables en este caso las metodologías (Cuadro2.2).

$$X = \frac{n-1}{2} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$X = \frac{4-1}{2}$$

$$X = \frac{3}{2}$$

$$X = 1.5$$

Se representa los puntos y las líneas de corte de las cuatro zonas de impacto en el primer cuadrante del plano cartesiano, donde la zona 4 (**Figura 2.9**) es la que nos permite determinar cuál de las metodologías es la que se va escoger, el punto que caiga en la zona 4 es el más importante en este caso sería el punto (1,4) que significa que la 4ta variable es la mejor opción.

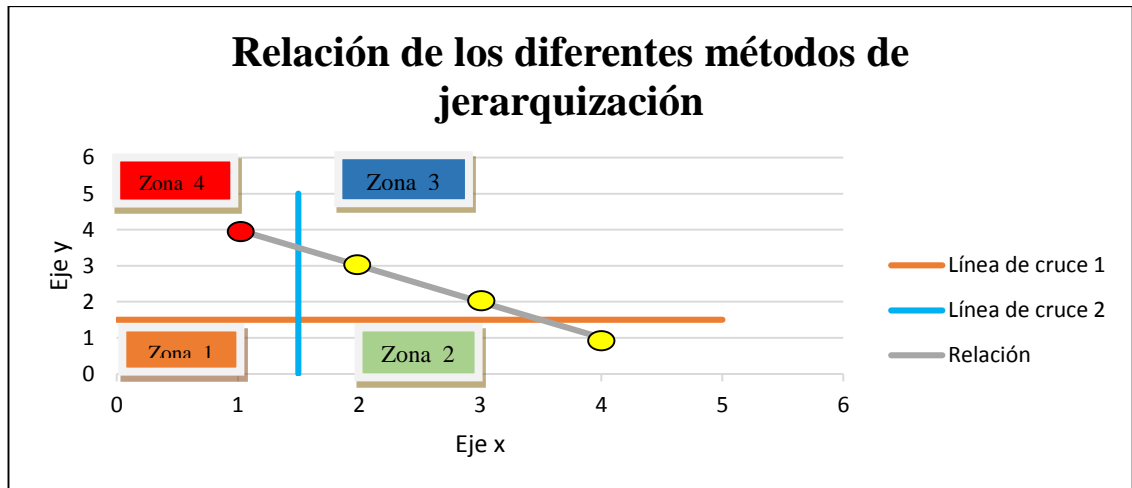


Figura 2.9: Relación de los diferentes métodos de jerarquización

Con el análisis por medio del método “Matriz de relaciones”; se ha determinado que el método de jerarquización AHP “Proceso Analítico Jerárquico” es el que sobresale respecto a los otros métodos.

Ya que es un modelo multicriterio y realiza un análisis tanto cualitativo como cuantitativo, para determinar la jerarquía de un equipo o sistema, basándose en diferentes factores (seguridad, fiabilidad, medio ambiente, etc.).

Teniendo esta metodología como base, es importante aportar con criterios y análisis usados tanto en el modelo MCR y CTR, los cuales utilizan una matriz de frecuencia de fallos respecto a las consecuencia del mismo, se cree que es importante relacionar estos modelos ya que técnicamente es factible y además se aportara de mejor manera para la toma de decisiones y la determinación de la jerarquía de los diferentes sistemas o equipos.

A este modelo debemos adaptar todos los factores que creemos importantes para el sistema tranviario como son:

- Seguridad (peatones, operadores, usuarios, otros vehículos, población en general)
- Medio ambiente ( impacto que genere tanto a usuarios, empleados y población en general)
- Confiabilidad

- Mantenibilidad
- Fiabilidad
- Costos ( producción, mantenibilidad)
- Calidad
- Entrega o servicio prestado

## **2.10 Conclusiones**

- En base al análisis comparativo realizado, se determinó que metodología de jerarquización es la más adecuada para realizar esta tarea en la unidad de mantenimiento del sistema tranviario. El método que se propone, combina el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), con las características más importantes de los modelos de jerarquización que involucran en su análisis, el criterio de "riesgo", esto son los modelos MCR y CTR (Modelo de criticidad por riesgo, y Modelo de criticidad total por riesgo), así el método a utilizar es un modelo "hibrido", el cual permite un análisis tanto cualitativo como cuantitativo, además es multicriterio y se puede adaptar a las diferentes necesidades y variables que se deben incluir para el análisis de los diferentes sistemas y equipos de un sistema tranviario.
- Como punto de partida se esbozaron diferentes mapas de procesos, los mismos que permiten conocer las operaciones principales que se darán, cuando el sistema tranviario entre en funcionamiento; así también de tareas importantes que se desarrollarán en la unidad de mantenimiento, esta información es necesaria, ya que en el siguiente capítulo se realizará la jerarquización de los equipos y sistemas relevantes del sistema tranviario.

## **CAPÍTULO III**

### **APLICACIÓN DEL MODELO AHP HIBRIDO**

#### **3.1. Aplicación del método AHP “Proceso analítico Jerárquico” combinado con los modelos MCR y CTR; adaptado para un sistema tranviario**

El estudio propuesto, consiste en jerarquizar los principales sistemas que componen el sistema del tranvía cuatro ríos. Los sistemas y equipos a considerar en la evaluación son los siguientes: Sistema del material rodante, sistema de comunicación y señalización, sistema de alimentación, sistema de obra civil, sistema de mantenimiento.

Tomando en cuenta el modelo AHP y el ejemplo descrito en el documento “Técnicas de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicadas en el proceso de Gestión de Activos” se procede a realizar el modelo para la jerarquización de los diferentes sistemas o equipos; el análisis tiene dos fases: en la primera intervienen factores cuantitativos y en la segunda los factores cualitativos.

Una de las ventajas de este modelo es que, en función de los resultados y las necesidades que se puedan generar con el pasar del tiempo o la vida útil del sistema o equipo; se pueden ajustar los ponderadores con el fin de retroalimentar el modelo. Mencionar que se podrán realizar entrevistas, revisar fichas, analizar resultados, reuniones de grupos focales, etc. Esta información deberá ser analizada por especialistas y no debe ser subjetiva.

##### **3.1.1. Jerarquización con análisis de factores cuantitativos**

La primera etapa del modelo de jerarquización corresponde al análisis de los cuatro factores cuantitativos: Frecuencia de fallos, predicción de fallos, severidad de fallos, costos de fallos. En base a una escala del 1 al 10 se determinará los niveles de

jerarquización de cada factor, estos irán variando y se adaptarán según las necesidades del sistema o equipo que se desee analizar en una empresa.<sup>1</sup>

### 3.1.1.2. Determinar los niveles de jerarquización cuantitativos

Se debe realizar un diagrama en el que consten tres niveles: El nivel uno es el objetivo principal que en este caso será la jerarquización de los sistemas o equipos, el nivel dos corresponde a determinar los factores cuantitativos que van a intervenir para la jerarquización y en el nivel tres se establecerán los diferentes sistemas o equipos que serán analizados. (**Figura3.1**)

- **Nivel 1.** Objetivo Principal.
- **Nivel 2.** Definir los factores cuantitativos a evaluar
- **Nivel 3.** Sistemas a evaluar para su jerarquización.

### 3.1.1.3. Análisis de los factores de fallas y costos

Por medio de una reunión se deberá discutir y analizar los diferentes criterios a analizar (frecuencia de fallos, detección de fallos, severidad de fallos y costos de fallos), por parte del equipo de mantenimiento y personas que conocen de los distintos temas a tratar, para definir la importancia de cada uno de los criterios.

Se calculará en base a una comparación cualitativa entre criterios de forma apareada; esta comparación cualitativa entre criterios se hace de esta forma, debido principalmente a la falta de acuerdo entre el personal de operaciones, mantenimiento y procesos para generar una tabla de niveles que permite evaluar de forma precisa cada uno de los cuatro criterios. En la (**Tabla3.1**) podemos observar los resultados obtenidos de la valoración de juicios utilizada para realizar la comparación entre los criterios evaluados.

- Frecuencia de Ocurrencia de fallos (FF)
- Predicción de fallos (PF)
- Severidad de los fallos (SF)
- Costos de los fallos (CF)

---

<sup>1</sup> Estos factores pueden disminuir o aumentar según las necesidades del sistema o equipo que se desea jerarquizar; no necesariamente deben ser cuatro como en este estudio, esto ya depende de las personas o equipo de mantenimiento que realicen la jerarquización.



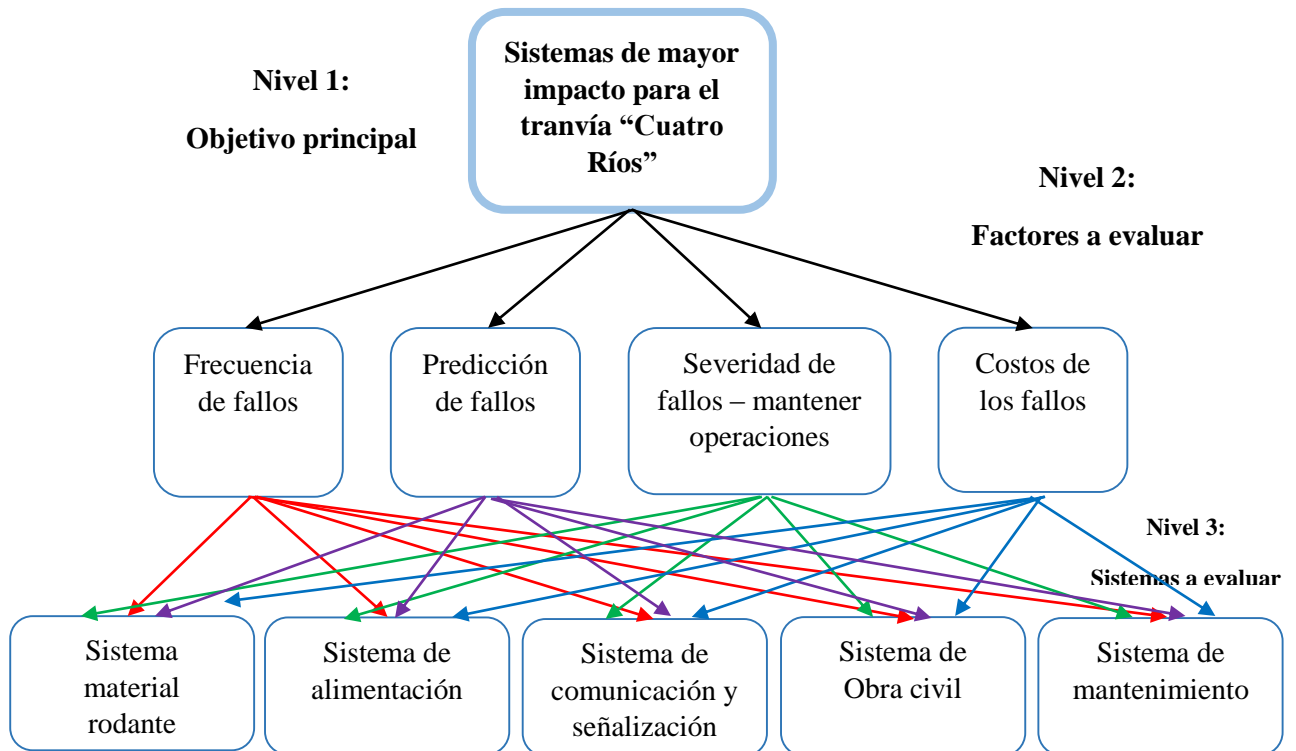


Figura 3.1: Esquema general AHP para la jerarquización por criterios de fallas y costos

### 3.1.1.3.1. Comparación apareada de los factores de fallas y costos

Para llenar la **Tabla 3.1** de comparación apareada de los factores se debe seguir los siguientes pasos:

- Se establecerá una matriz  $n \times n$  según el número de factores ( $n =$  número de variables), colocar los factores tanto en la primera columna como en la primera fila.
- Luego se comparará el primer factor de la columna respecto a cada factor de la fila respectivamente y se hará una comparación en pares.
- En una escala del 1 al 9 se deberá colocar el valor que se determine en base al análisis realizado por el equipo de mantenimiento apoyado en la **Tabla 1.1**.
- El análisis se realizará tomando en cuenta la importancia del factor de la fila respecto al primer factor de la columna, si la importancia del factor de la fila respecto al de la columna es menor se colocará en forma inversa ejemplo  $1/3$ .
- Después los valores de los factores que ya han sido comparados serán los inversos respecto al factor correspondiente que fue analizado.

- En el cuadro que corresponda a la comparación entre dos factores iguales se colocara 1 es decir la diagonal de la matriz tendrá valores de 1.
- Este proceso se deberá realizar para el resto de factores.

Tabla 3.1: Comparación apareada de los factores de fallas y costos

<b>Factores</b>	<b>Frecuencia de fallos</b>	<b>Predicción de fallos</b>	<b>Severidad de fallos</b>	<b>Costos de fallos</b>
<b>Frecuencia de fallos</b>	1	4	1	1
<b>Predicción de fallos</b>	1/4	1	1/3	1/2
<b>Severidad de fallos</b>	1	3	1	1/2
<b>Costos de fallos</b>	1	2	2	1

**Nota:** Los valores colocados en la **Tabla 3.1** fueron colocados bajo criterios de las personas que desarrollaron el estudio. Pueden variar según las necesidades de la empresa o las personas que realicen el análisis.

#### **3.1.1.4. Pesos de cada factor cuantitativo según los diferentes criterios**

Se procede a evaluar cada factor de forma cuantitativa, mediante un proceso basado en el análisis de una serie de criterios ponderados que permiten cuantificar cada factor por cada alternativa a jerarquizar.

Cada criterio es dividido en varias clases a las cuales se les asigna diferentes niveles de criticidad (intervalo del 1 al 10). Las puntuaciones para cada criterio se asignarán de forma cuantitativa en reuniones de trabajo con el personal de mantenimiento, operaciones, procesos, seguridad.

**Nota:** Los valores, criterios y conceptos de cada nivel pueden variar según las necesidades de cada empresa o según las personas que analicen el proceso.

### 3.1.1.4.1. Frecuencia de Fallos (FF)

Es evaluado en función del número de fallos en un tiempo determinado o período de tiempo. Para determinar el nivel de frecuencia de fallos de cada sistema o equipo a ser evaluado es necesario recopilar o tener el historial de fallos de cada uno (Tabla 3.2).

Tabla3.2: Escala que permite definir el criterio de frecuencia de fallos

<b>F F</b>	<b>Escala</b>	<b>Nivel de frecuencia de ocurrencia de fallos</b>	<b>Definición del nivel de frecuencia de ocurrencia de fallos</b>
1	Bajo	Casi no es probable que ocurra	Una falla en más de diez años
2			Una falla entre siete y nueve años
3	Medio	Ocurre muy poco	Una falla entre tres y seis años
4			Una falla entre dos y cuatro años
5	Alto	se produce ocasionalmente	Una falla cada año
6			Una falla cada nueve meses
7	Muy alto	se produce continuamente	Una falla cada seis meses
8			Una falla cada tres meses
9	Extremo	Fallo que es casi inevitable	Una falla por mes
10			Una falla por semana

### 3.1.1.4.2. Predicción de Fallos (PF)

Está relacionado con los sistemas de protección, control y alerta disponibles para detectar de forma segura la ocurrencia de fallos. Para determinar el nivel de predicción de fallos de cada sistema o equipo a ser evaluado, es necesario recopilar información sobre todos los aspectos de instrumentación, control y protección existentes en cada uno de los sistemas o equipos a ser evaluados (Tabla 3.3)

**Tabla 3.3:** Escala que permite definir el criterio de predicción de fallos

PF	Escala y nivel de frecuencia de ocurrencia de fallos	Definición del nivel de predicción de fallos
1	Absolutamente controlado	El sistema es controlado bajo técnicas estadísticas de control de fallos y su correcto funcionamiento es controlado constantemente mientras realiza su operación. (100% automatización con monitoreo continuo mediante un software que controle e inspeccione continuamente los diferentes sistemas y equipos)
2	Muy alto	El sistema es controlado bajo técnicas estadísticas de control de fallos y su correcto funcionamiento es controlado constantemente mientras realiza su operación. (100% automatización)
3	Alto	El sistema es controlado bajo técnicas estadísticas de control de fallos y el funcionamiento se controla más de dos veces durante su operación (75% automatización)
4		
5	Medio	El sistema es controlado únicamente por técnicas estadísticas de control de fallos, y el funcionamiento es controlado solamente al final de su operación.(25% automatización)
6		
7	Bajo	El sistema es inspeccionado solo de forma visual durante su funcionamiento( no hay la ayuda de software o otros sistemas de control)
8 9 10	Absolutamente incierto	El sistema no está controlado o inspeccionado y las anomalías por fallos no son detectadas

#### 3.1.1.4.3. Severidad de Fallos (SF)

Se relaciona con el impacto de los fallos sobre la seguridad, el ambiente y las operaciones. Para la definición del criterio de severidad de fallos, es necesario conocer los posibles efectos que pueden generar los fallos una vez que estos ocurren dentro de un escenario operacional determinado (Tabla 3.4).

Tabla3.4: Escala que permite definir el criterio de severidad de fallos

SF	Escala y nivel de frecuencia de ocurrencia de fallos	Definición del nivel de severidad de fallos
1	Ninguno	Fallos que son imperceptibles para el cliente y que no afectan al servicio prestado.
2		Fallos que pueden ser desapercibidos para los usuarios y sus efectos serán insignificantes para el servicio prestado
3	Bajo	Fallos que podrían causar mínimas molestias en los usuarios, y que pueden ser corregidas de una manera inmediata
4		Fallos que pueden ser solucionados con pequeños ajustes y su impacto sobre la eficiencia de los equipos es mínima
5	Medio	Fallos que provocan la deficiencia del servicio y generan la queja de los usuarios
6		Fallos que afectan a un subsistema o equipo, originando el mal funcionamiento del mismo y disminuyen la calidad del servicio en general
7	Alto	Fallos que pueden causar un alto grado de insatisfacción al usuarios del servicio
8		Fallos que hacen inoperable un sistema o equipo y provocan la pérdida de la función para la que fueron diseñados.
9	Peligrosamente alto	Fallos que pueden causar problemas con regulaciones municipales o gubernamentales (leyes)
10		Fallos que pueden causar pérdidas humanas

#### 3.1.1.4.4. Costes de fallos (CF)

Está vinculado con las posibles consecuencias económicas de los fallos sobre la seguridad, el ambiente y las operaciones. Para la determinación del criterio de costos de fallos, es necesario proyectar cuales serían los costos que pueden traer consigo los fallos una vez que estos ocurran dentro de un escenario operacional determinado (Tabla 3.5).

Tabla 3.5: Escala que permite definir el criterio de costos de fallos

CF	Escala y nivel de frecuencia de ocurrencia de fallos	Definición del nivel de costos de fallos
1 2	Bajo	Fallos que generan costos insignificantes y no afectan a la operación y al servicio prestado
3 4	Medio	Fallos que generan costos significativos de operación
5 6	Alto	Fallos que provocan altos costos por reparaciones correctivas de un sistema o equipo
7 8	Muy alto	Fallos que provocan altos costos por paralización del servicio prestado
9 10	Peligrosamente alto	Fallos que provocan altos costos por aspectos de seguridad y medio ambiente (indemnizaciones)

Una vez que se estableció las distintas escalas para cada factor, se procede a realizar una evaluación de los diferentes sistemas o equipos; en función de cada uno de los factores explicados anteriormente (Frecuencia de fallos, predicción de fallos, severidad de los fallos y costos de los fallos).<sup>2</sup>

### 3.1.1.5. Evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios cuantitativos seleccionados

La evaluación de los sistemas o equipos para cada uno de los criterios, se realizará en una reunión de trabajo donde intervenga el equipo de mantenimiento, seguridad, personas que estén relacionadas al tema. Se deberá determinar un valor cuantificado por cada uno de los factores evaluados, tomando en cuenta la escala de los valores establecidos en las tablas (3.2, 3.3, 3.4 y 3.5). Posterior a esto se deberá seguir los siguientes pasos para llenar la (Tabla 3.6):

- Se debe tener o llevar un historial detallado de: frecuencia de fallos, predicción de fallos, severidad de fallos y costos de fallos de cada sistema o equipos a analizar.

<sup>2</sup> Las escalas, definición de niveles pueden variar según las necesidades de la empresa o las personas que realicen el análisis.

- En la columna **FF** (Frecuencia de fallos) se colocará respectivamente en cada sistema el número que corresponda según la escala de la (**Tabla 3.2**)
- En la columna tres ( $FFI=FF/ \text{total}$ ) el valor colocado para el respectivo sistema se divide para el valor total de la suma de la columna FF.
- En la columna **PF** (predicción de fallos) se colocará respectivamente en cada sistema el número que corresponda según la escala de la (**Tabla3.3**).
- En la columna cuatro ( $PFI=PF/ \text{total}$ ) el valor colocado para el respectivo sistema se divide para el valor total de la suma de la columna PF.
- En la columna **SF** (severidad de fallos) se colocará respectivamente en cada sistema el número que corresponda según la escala de la (**Tabla 3.4**).
- En la columna cuatro ( $SFI=SF/ \text{total}$ ) el valor colocado para el respectivo sistema se divide para el valor total de la suma de la columna SF.
- En la columna **CF** (costos de fallos) se colocará respectivamente en cada sistema el número que corresponda según la escala de la (**Tabla 3.5**).
- En la columna cuatro ( $CFI=CF/ \text{total}$ ) el valor colocado para el respectivo sistema se divide para el valor total de la suma de la columna CF.
- Al final se suma los valores colocados en cada columna (FF, PF, SF, CF) respectivamente y se coloca el valor total de la suma al final
- Se divide cada valor de la columna para la suma total de esta respectivamente y se coloca en el siguiente cajón el resultado de la división mencionada anteriormente. (si se tomó el primer valor de la columna uno se divide para la suma total de esta columna, el resultado se colocara en el segundo cajón de la columna tres).<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Los valores colocados en la Tabla 3.6 fueron colocados bajo criterios de las personas que desarrollaron el estudio, pueden variar según la persona que realice el análisis.

Tabla 3.6: Evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios seleccionados

<b>Criterios</b>	<b>FF</b>	<b>Jerarquización Local FFI=(FF/total)</b>	<b>PF</b>	<b>Jerarquización local PFI=(PF/total)</b>	<b>SF</b>	<b>Jerarquización local SFI=(SF/total)</b>	<b>CF</b>	<b>Jerarquización local CFI=(CF/total)</b>
<b>Sistemas</b>								
<b>Sistema material rodante</b>	<b>4</b>	0,3077	<b>5</b>	0,3125	<b>4</b>	0,2666	<b>3</b>	0,2308
<b>Sistema de alimentación</b>	<b>2</b>	0,1538	<b>4</b>	0,25	<b>3</b>	0,2	<b>2</b>	0,1538
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	<b>3</b>	0,2308	<b>3</b>	0,1875	<b>3</b>	0,2	<b>3</b>	0,2308
<b>Sistema de obra civil</b>	<b>1</b>	0,0769	<b>2</b>	0,125	<b>3</b>	0,2	<b>2</b>	0,1538
<b>Sistema de mantenimiento</b>	<b>3</b>	0,2308	<b>2</b>	0,125	<b>2</b>	0,1333	<b>3</b>	0,2307
<b>Total</b>	<b>13</b>		<b>16</b>		<b>15</b>		<b>13</b>	

### 3.1.1.6. Jerarquización por nivel de importancia y por cada criterio

En función de los valores de jerarquización obtenidos para cada uno de los criterios (**Tabla 3.6**); se ordenará los sistemas o equipos según el nivel de importancia (de mayor a menor) por cada uno de los 4 factores evaluados.

Se deberá trasladar los valores de la (**Tabla 3.6**) a las tablas (3.7, 3.8, 3.9, 3.10) respectivamente.



**Factor frecuencia de fallos (FF)**

Tabla 3.7: Jerarquización por factor frecuencia de Ocurrencia de fallos

<b>Criterios</b>		<b>Criticidad (FFI=FF/total)</b>
<b>Sistemas</b>	<b>FF</b>	
<b>Sistema material rodante</b>	<b>4</b>	0,3077
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	<b>3</b>	0,2308
<b>Sistema de mantenimiento</b>	<b>3</b>	0,2308
<b>Sistema de alimentación</b>	<b>2</b>	0,1538
<b>Sistema de obra civil</b>	<b>1</b>	0,0769
<b>Total</b>	<b>13</b>	

**Factor predicción de fallos (PF)**

Tabla 3.8: Jerarquización por factor predicción de fallos

<b>Criterios</b>		<b>Criticidad (PFI=DF/total)</b>
<b>Sistemas</b>	<b>PF</b>	
<b>Sistema material rodante</b>	<b>5</b>	0,3125
<b>Sistema de alimentación</b>	<b>4</b>	0,25
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	<b>3</b>	0,1875
<b>Sistema de obra civil</b>	<b>2</b>	0,125
<b>Sistema de mantenimiento</b>	<b>2</b>	0,125
<b>Total</b>	<b>16</b>	

**Factor severidad de los fallos (SF)**

Tabla 3.9: Jerarquización por factor Severidad de fallos

<b>Criterios</b>		<b>Criticidad (SFI=SF/total)</b>
<b>Sistemas</b>	<b>SF</b>	
<b>Sistema material rodante</b>	<b>4</b>	0,2666
<b>Sistema de alimentación</b>	<b>3</b>	0,2
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	<b>3</b>	0,2
<b>Sistema de obra civil</b>	<b>3</b>	0,2
<b>Sistema de mantenimiento</b>	<b>2</b>	0,1333
<b>Total</b>	<b>15</b>	

**Factor costos de los fallos (CF)**

Tabla 3.10: Jerarquización por factor Costes de fallos

<b>Criterios</b>		<b>Criticidad (CFI=CF/total)</b>
<b>Sistemas</b>	<b>CF</b>	
<b>Sistema material rodante</b>	<b>3</b>	0,2308
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	<b>3</b>	0,2308
<b>Sistema de mantenimiento</b>	<b>3</b>	0,2307
<b>Sistema de alimentación</b>	<b>2</b>	0,1538
<b>Sistema de obra civil</b>	<b>2</b>	0,1538
<b>Total</b>	<b>13</b>	

### 3.1.1.7. Congruencia de los juicios. Radio de inconsistencia (IR) y jerarquización por cada uno de estos criterios

- Para la resolución de la (**Tabla 3.11**) trasladamos los valores de la (**Tabla 3.1**).
- Se suma de forma vertical los valores de cada columna (2, 3, 4, 5) y se coloca el valor de la suma al final de cada columna, en la fila que corresponde al **Total**.
- Luego se realiza una nueva matriz (**Tabla3.12**), con los mismos títulos que están representados en la (**Tabla 3.11**) pero sin incluir las dos últimas filas.

Para llenar la (**Tabla 3.12**) se debe seguir los siguientes pasos:

- Se basa en los valores de la (**Tabla 3.11**), se divide el valor de cada fila para el total de cada columna respectivamente y se coloca en el lugar correspondiente de la (**Tabla 3.12**) por ejemplo: el valor 1 que corresponde al segundo elemento de la segunda fila se divide para el valor 3,25 que corresponde al total de la segunda columna y el resultado se lo coloca en el segundo cuadro de la primera fila de la (**Tabla 3.12**). De esta manera se realiza lo mismo con el resto de valores.
- Para llenar la última columna de la (**Tabla3.12**) se suma los valores de cada fila, se saca el promedio y ese valor se coloca el cuadro del final de la fila que corresponde a la jerarquización total por criterio. Lo mismo se realiza en las siguientes filas.
- Finalmente se coloca los valores de la última columna de la (**Tabla 3.12**) en la columna correspondiente de la (**Tabla 3.11**).

- Para conocer que el sistema de juicios es consistente, se utiliza las ecuaciones (5, 6, 7) para obtener el radio de inconsistencia.
  - Se realiza una multiplicación de matrices; entre los valores de la matriz de la Tabla 3.1 (orden 4x4) y los valores de los autovectores (Jerarquización por criterio) (matriz 1x4) de la Tabla 3.12; con ello se consiguen los valores de la (**Tabla 3.13**).
  - Divide cada valor obtenido de la matriz resultante (columna 1 de la **Tabla 3.13**) para cada valor obtenido de la matriz de autovectores (columna 2 de la **Tabla 3.13**) respectivamente. (se divide el primer valor de la segunda fila para el segundo valor de la segunda fila y ese valor se coloca en el tercer cuadro de la misma fila) se realiza lo mismo con el resto de valores.
  - Se saca un promedio de los valores de la tercera columna y ese valor es  $\lambda_{max}$  (**Tabla 3.13**).
  - Con la ecuación 7 se determina el índice de consistencia (CI).
  - Para encontrar el radio de inconsistencia ecuación 8, se toma el valor de RI (valor aleatorio promedio) de la (**Tabla 1.2**).
  - Al final se debe comprobar que el valor del radio de inconsistencia  $IR \leq 0,1$ ; si existiera inconsistencia, inmediatamente se volvería a repetir la evaluación de la matriz (**Tabla 3.1**). Si no hay inconsistencia se continúa con el análisis.
    - $IR \leq 0.10$  Consistencia razonable
    - $IR > 0.10$  Inconsistencia

Tabla 3.11: Estimación del IR y jerarquización de los criterios evaluados

<b>Criterios</b>	<b>Frecuencia de fallos</b>	<b>Predicción de fallos</b>	<b>Severidad de fallos</b>	<b>Costos de fallos</b>	<b>Jerarquización por criterio</b>
<b>Frecuencia de fallos</b>	1	4	1	1	<b>0,3178</b>
<b>Predicción de fallos</b>	1/4	1	1/3	1/2	<b>0,1051</b>
<b>Severidad de fallos</b>	1	3	1	1/2	<b>0,2511</b>
<b>Costos de fallos</b>	1	2	2	1	<b>0,3256</b>
<b>Total</b>	3,25	10	4,33	3	
<b>Radio de inconsistencia IR</b>	0,05				

Tabla 3.12: Tabla de apoyo para resolución de la (Tabla3.11)

<b>Criterios</b>	<b>Frecuencia de fallos</b>	<b>Predicción de fallos</b>	<b>Severidad de fallos</b>	<b>Costos de fallos</b>	<b>Jerarquización por criterio</b>
<b>Frecuencia de fallos</b>	0,3076	0,4	0,2309	0,333	<b>0,3178</b>
<b>Predicción de fallos</b>	0,0769	0,1	0,0762	0,166	<b>0,1051</b>
<b>Severidad de fallos</b>	0,3076	0,3	0,2309	0,166	<b>0,2511</b>
<b>Costos de fallos</b>	0,3076	0,2	0,4618	0,333	<b>0,3256</b>

### Obtención de $\lambda_{\max}$

Tabla 3.13: Tabla para obtener el valor  $\lambda_{\max}$  de la matriz

Valores de la matriz resultante ( $W*\tilde{\omega}$ )	Valores de la matriz de autovectores ( $\tilde{\omega}$ )	$(W*\tilde{\omega})/(\tilde{\omega})$
1.3153	0,3178	4.1370
0.4311	0,1051	4.1016
1.0474	0,2511	4.1683
1.3564	0,3256	4.1653
	<b><math>\lambda_{\max}</math></b>	<b>4.1430</b>

Se aplica las ecuaciones 7 y 8 respectivamente

$$CI = \frac{4,1430 - 4}{4 - 1} = 0,0476$$

$$RI = \frac{0,0476}{0,89} = 0,05$$

#### 3.1.1.8 Jerarquización final de los sistemas con factores cuantitativos

Se deberá cuantificar para cada uno de los sistemas o equipos evaluados la jerarquización final, en función de la valoración realizada a cada uno de los criterios (local/total) evaluados anteriormente (**Tablas 3.7 a 3.9**).

- Se colocará los valores de la (**Tabla 3.7**) en la columna dos (Factor FF) de la (**Tabla 3.14**) y se multiplicará cada valor de esta columna por el valor de la jerarquización por criterio correspondiente al factor frecuencia de fallos (**Tabla 3.12**).

- Los valores de la (**Tabla 3.8**) se colocará en la columna tres (Factor PF) de la (**Tabla 3.14**) y se multiplicará cada valor de esta columna por el valor de la jerarquización por criterio correspondiente al factor predicción de fallos (**Tabla 3.12**).
- Los valores de la (**Tabla 3.9**) se colocará en la columna cuatro (Factor SF) de la (**Tabla 3.14**) y se multiplicará cada valor de esta columna por el valor de la jerarquización por criterio correspondiente al factor severidad de fallos (**Tabla 3.12**).
- Los valores de la (**Tabla 3.10**) se colocará en la columna cinco (Factor CF) de la (**Tabla 3.14**) y se multiplicará cada valor de esta columna por el valor de la jerarquización por criterio correspondiente al factor costos de fallos (**Tabla 3.12**).
- Finalmente cada valor obtenido se sumara de forma horizontal y se colocará al final de cada fila.

Tabla 3.14: Jerarquización Final

<b>Criterios</b> <b>Sistemas</b>	<b>Jerarquización local x total factor FF</b> <b>(1)</b>	<b>Jerarquización local x total factor PF</b> <b>(2)</b>	<b>Jerarquización local x total factor SF</b> <b>(3)</b>	<b>Jerarquización local x total factor CF</b> <b>(4)</b>	<b>Jerarquización Final=(1)+(2)+(3)+(4)</b>
<b>Sistema del material rodante</b>	(0,3077)x(0,3178)	(0,3125)x(0,1051)	(0,2666)x(0,2511)	(0,2308)x(0,3256)	<b>0,2728</b>
<b>Sistema de alimentación</b>	(0,1538)x(0,3178)	(0,25)x(0,1051)	(0,2)x(0,2511)	(0,1538)x(0,3256)	<b>0,1756</b>
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	(0,2308)x(0,3178)	(0,1875)x(0,1051)	(0,2)x(0,2511)	(0,2308)x(0,3256)	<b>0,2184</b>
<b>Sistema de obra civil</b>	(0,0769)x(0,3178)	(0,125)x(0,1051)	(0,2)x(0,2511)	(0,1538)x(0,3256)	<b>0,1379</b>
<b>Sistema de mantenimiento</b>	(0,2308)x(0,3178)	(0,125)x(0,1051)	(0,1333)x(0,2511)	(0,2307)x(0,3256)	<b>0,1952</b>

Luego, se ordenan los resultados según el nivel de importancia (ranking) de mayor a menor (**Tabla3.15**).

### 3.1.1.9 Ranking de jerarquización final

Para llenar la (Tabla 3.15), hay que basarse en los resultados de la columna (Jerarquización Final) de la tabla 3.12; colocar los nombres de cada sistema y sus valores correspondientes (primera y segunda columna del **Tabla 3.13**) de mayor a menor. Finalmente enumerar del 1 al 5 en la columna del ranking.<sup>4</sup>

Tabla 3.15: Ranking con factores cuantitativos

Sistemas	Jerarquización Final	Ranking
Sistema del material rodante	0,27	1
Sistema de comunicación y señalización	0,22	2
Sistema de mantenimiento	0.20	3
Sistema de alimentación	0.18	4
Sistema de obra civil	0.14	5

En el análisis con valores cuantitativos se determinó que el sistema más crítico es el material rodante (**Tabla 3.13**), por ende a este sistema es al que más precaución se le debería tomar. Vale recalcar que el análisis es una hipótesis, ya que no se tiene un historial de fallos, mantenimientos, etc. del sistema tranviario por lo que aún no entra en funcionamiento. Se ha tomado valores aleatorios para tener una secuencia de cómo sería el análisis para determinar el sistema o equipo más crítico.

### 3.1.2 Jerarquización con análisis de factores cualitativos

Corresponde al análisis de los seis factores Cualitativos: Medio ambiente, seguridad, calidad, disponibilidad, servicio prestado, mantenibilidad. En base a una escala del 1

<sup>4</sup> En este caso se enumerara del 1 al 5 por que hay cinco sistemas que se está analizando, puede variar según el número de sistemas o equipos que se deseen analizar.



al 10 se determinará los niveles de jerarquización de cada factor, estos irán variando y se adaptará según las necesidades del sistema o equipo que se desee analizar en una empresa.<sup>5</sup>

### **3.1.2.1. Determinar los niveles de jerarquización cualitativos**

Se debe realizar un diagrama en el que consten tres niveles: El nivel uno es el objetivo principal que en este caso será la jerarquización de los sistemas o equipos, el nivel dos corresponde a determinar los factores cualitativos que van a intervenir para la jerarquización y en el nivel tres se establecerán los diferentes sistemas o equipos que serán analizados. Figura3.2

- **Nivel 1.** Objetivo Principal.
- **Nivel 2.** Definir los factores cualitativos a evaluar
- **Nivel 3.** Sistemas a evaluar para su jerarquización.

### **3.1.2.2. Análisis de los factores cualitativos**

Por medio de una reunión se deberá discutir y analizar los diferentes criterios a analizar (medio ambiente, seguridad, calidad, disponibilidad, servicio prestado, mantenibilidad), por parte del equipo de mantenimiento y personas que conozcan de los distintos temas a tratar, para definir la importancia de cada uno de los criterios. El análisis con factores cualitativos se realiza cuando un equipo o sistema aún no ha entrado en funcionamiento o no se cuenta con un historial de fallas o reparaciones.

Se calculará en base a una comparación cualitativa de criterios de forma apareada; esta comparación cualitativa entre criterios se hace de esta forma, debido principalmente a la falta de acuerdo entre el personal de operaciones, mantenimiento y procesos para generar una tabla de niveles que permite evaluar de forma precisa cada uno de los cuatro criterios. En la siguiente (**Tabla3.16**) podemos observar los resultados obtenidos de la valoración de juicios utilizada para realizar la comparación entre los criterios evaluados.

---

<sup>5</sup> Estos factores pueden disminuir o aumentar según las necesidades del sistema o equipo que se desea jerarquizar; no necesariamente deben ser siete como en este caso, esto ya depende de las personas o equipo de mantenimiento que realicen la jerarquización.

- Medio ambiente (E)
- Seguridad (S)
- Calidad (Q)
- Disponibilidad (D)
- Servicio prestado (SP)
- Mantenibilidad (M)

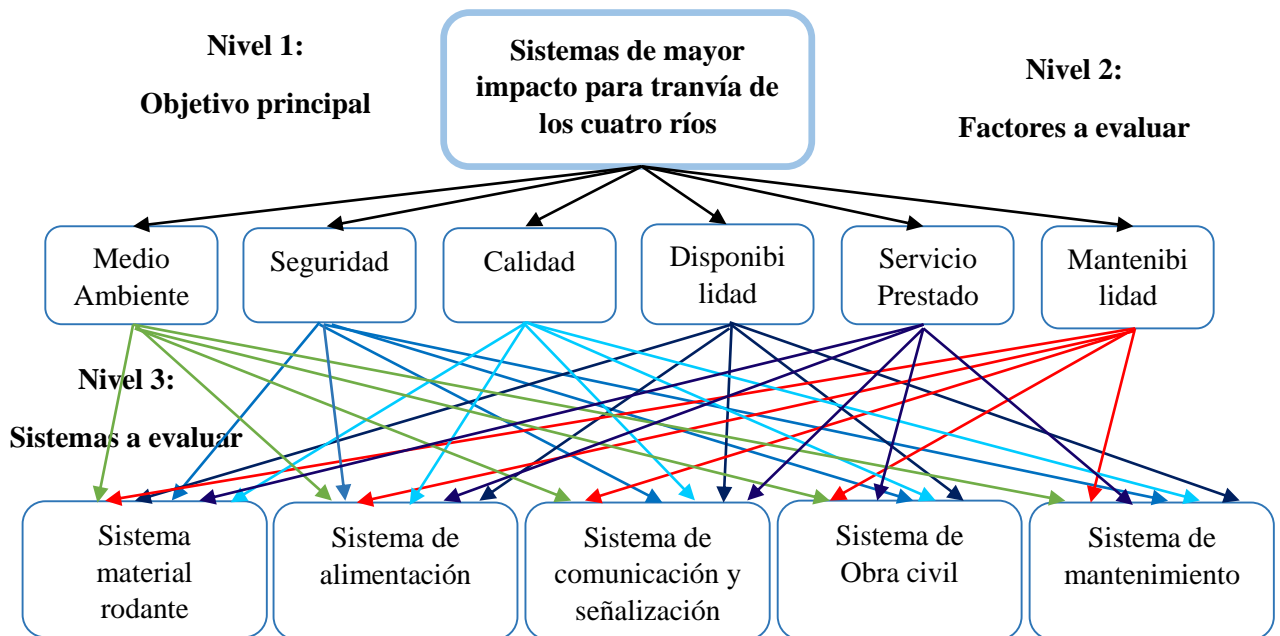


Figura 3.2: Esquema general AHP para la jerarquización por criterios cualitativos

### 3.1.2.3. Comparación apareada de los factores cualitativos

Para llenar la (Tabla 3.16) de comparación apareada de los factores se debe seguir los siguientes pasos:

- Se establece una matriz nxn según el número de factores (n= número de variables), colocar los factores tanto en la primera columna y fila.
- Luego se comparará el primer factor de la columna respecto a cada factor de la fila respectivamente y se hará una comparación en pares.
- En una escala del 1 al 9 se deberá colocar el valor que se determine en base al análisis realizado por el equipo de mantenimiento basando en la (Tabla 1.1).

- El análisis se realizará tomando en cuenta la importancia del factor de la fila respecto al primer factor de la columna. Si la importancia del factor de la fila respecto al de la columna es menor se colocará de forma inversa ejemplo 1/3.
- Después los valores de los factores que ya han sido comparados serán los inversos respecto al factor correspondiente que fue analizado.
- En el cuadro que corresponda a la comparación entre dos factores iguales se colocará 1, es decir la diagonal de la matriz tendrá valores de 1.
- Este proceso se deberá realizar para el resto de factores.

Tabla 3.16: Comparación apareada de los factores de fallos y costos <sup>6</sup>

Factores	Medio Ambiente	Seguridad	Calidad	Disponibilidad	Servicio Prestado	Mantenibilidad
Medio Ambiente	1	1/2	1/2	1/2	1/5	1/2
Seguridad	2	1	1/3	1/3	1/6	1/2
Calidad	2	3	1	2	1/2	2
Disponibilidad	2	3		1	1/4	2
Servicio Prestado	5	6	2	4	1	3
Mantenibilidad	2	2	1/2	1/2	1/3	1

#### 3.1.2.4. Pesos de cada factor cualitativo según los diferentes criterios

Se procede a evaluar cada factor de forma cuantitativa, mediante un proceso basado en el análisis de una serie de criterios ponderados que permiten cuantificar cada factor por cada alternativa a jerarquizar.

Cada criterio es dividido en varias clases a las cuales se les asigna diferentes niveles de criticidad (intervalo del 1 al 10). Las puntuaciones para cada criterio se asignarán de forma cuantitativa en reuniones de trabajo con el personal de mantenimiento, operaciones, procesos, seguridad. <sup>7</sup>

<sup>6</sup> Los valores colocados en la Tabla 3.16 fueron colocados bajo criterios de las personas que desarrollaron el estudio. Pueden variar según las necesidades de la empresa o las personas que realicen el análisis

<sup>7</sup> Los valores, criterios y conceptos de cada nivel pueden variar según las necesidades de cada empresa o según las personas que analicen el proceso.

### 3.1.2.4.1. Medio ambiente (E)

Este factor será analizado en base a las diferentes sustancias o consumibles utilizados por la empresa, para el funcionamiento de los diferentes sistemas o equipos y el impacto que pueda generar cada uno de estos o alguna falla en el ciclo de operación sobre el medio ambiente.

Tabla 3.17: Escala que permite definir el criterio de medio ambiente

E	Escala y nivel de medio ambiente	Definición del nivel del medio ambiente
1	Bajo	Un fallo en un equipo o sistema que no cause contaminación ambiental. (No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales)
2		
3	Medio	Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) o incidente ambiental menor (controlable), derrames fáciles de contener y fugas repetitivas
4	Alto	Un fallo en un equipo o sistema que pueda afectar a los trabajadores o en la interna de la empresa. Riesgo medio de pérdidas de vida
5		
6	Muy alto	Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración
7	Altamente peligroso	Un fallo en un equipo o sistema que obligue a la empresa a informar a las autoridades públicas por problemas de salud que se puede generar en la población o medio ambiente. Además genera un riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente (catastrófico) que exceden los límites permitidos
8		
9		
10		

### 3.1.2.4.2 Seguridad (S)

Será con el fin de dar la adecuada seguridad tanto para el usuario, peatones, empleados y población en general que se puedan ver inmersos en algún problema de seguridad cuando el sistema tranviario esté en funcionamiento.

Tabla 3.18: Escala que permite definir el criterio de seguridad

S	Escala y nivel de Seguridad	Definición del nivel de seguridad
1	Bajo	Fallas que no produzcan accidentes (no existen riesgos de pérdidas de vidas, o atentar con la seguridad de los usuarios, trabajadores o población en general)
2		
3	Medio	Fallos que tengan muy baja probabilidad de generar accidentes.(no existe riesgo de pérdidas humanas y poca probabilidad de causar inconvenientes en los trabajadores, usuarios y población en general)
4	Alto	Fallas que produzcan accidentes que afecten de menor manera al usuario, peatones, empleados o población en general (riesgos bajo de pérdida de vida)
5		
6	Muy alto	Fallas que produzcan accidentes que afecten de manera considerable al usuario, peatones, empleados o población en general (riesgo medio de pérdida de vida)
7	Extremadamente alto	Fallas que produzcan accidentes que afecten de manera grave al usuario, peatones, empleados o población en general (alto riesgo de pérdida de vida)
8		
9		
10		

### 3.1.2.4.3 Calidad (Q)

Con el fin de garantizar la calidad del servicio prestado hacia el usuario y un correcto sistema de operación para mantener el servicio de una manera continúa.

Tabla 3.19: Escala que permite definir el criterio de calidad

Q	Escala y nivel de calidad	Definición del nivel de calidad
1	Bajo	Fallo mínimo en el servicio prestado. Que no produzca molestias o inconvenientes a usuarios.
2		
3	Medio	Fallo leve en el servicio. Que genere molestias
4	Alto	Fallo parcial en el servicio. Que genere molestias e insatisfacción a los usuarios.
5		
6	Muy alto	Fallo grave en el servicio. Que genere grandes molestias e insatisfacción a los usuarios.
7	Extremadamente Alto	Fallo total en el servicio prestado. Genere inconvenientes muy graves con los usuarios, molestias que puedan generar conflictos o ámbitos legales con los consumidores del servicio.
8		
9		
10		

#### 3.1.2.4.4 Disponibilidad (W)

La continuidad que tiene el sistema tranviario durante el ciclo diario de operación o que presta el servicio.

Tabla 3.20: Escala que permite definir el criterio de disponibilidad

W	Escala y nivel de Disponibilidad	Definición del nivel de disponibilidad
1	Bajo	Los elementos o equipos que trabajen $1 \leq o \leq 7$ a horas seguidas.
2		
3		
4	Medio	Los elementos o equipos que trabajen $7 < o \leq 12$ a horas seguidas.
5		
6		
7	Alto	Los elementos o equipos que trabajen $> 12$ a horas seguidas.
8		
9		
10		

#### 3.1.2.4.5 Servicio prestado (SP)

El daño de un equipo, elemento o sistema que impacto genera sobre los usuarios, población o empleados.

Tabla 3.21: Escala que permite definir el criterio de servicio prestado

SP	Escala y nivel de servicio prestado	Definición del nivel del servicio prestado
1	Bajo	Fallos que no producen una interrupción significativa de ningún sistema, pero sí puede afectar a algún equipo, el cual no influye en el ciclo operativo.
2		
3		
4	Medio	Produce la parada un solo sistema o equipo que no influye en el funcionamiento del sistema tranviario.
5		
6		
7	Alto	Un fallo produce la parada de todo el sistema de tranviario.
8		
9		
10		

### 3.1.2.4.6 Mantenibilidad (M)

Relaciona los tiempos medios que se tiene para reparar una falla de un equipo o sistema, saber si se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística.

Tabla 3.22: Escala que permite definir el criterio de mantenibilidad

M	Escala y nivel de mantenibilidad	Definición del nivel servicio de mantenibilidad
1	Bajo	Se cuenta con unidades de reserva en línea, tiempos de reparación y logística pequeños. ( $1 \leq o \leq 6$ horas para reparar una falla)
2		
3		
4	Medio	Se cuenta con unidades de reserva que logran cubrir de forma parcial el impacto de producción, tiempos de reparación y logística intermedios. ( $6 < o \leq a 12$ horas para reparar la falla)
5		
6		
7	Alto	No se cuenta con unidades de reserva para cubrir la producción, tiempos de reparación y logística muy grandes. ( $> a 12$ horas para reparar la falla)
8		
9		
10		

Una vez que se estableció las distintas escalas para cada factor, se procede a realizar una evaluación de los diferentes sistemas o equipos; en función de cada uno de los factores explicados anteriormente (medio ambiente, seguridad, calidad, disponibilidad, servicio prestado, mantenibilidad).<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Las escalas pueden variar y las definiciones también, según las necesidades de la empresa o por si quien realice el análisis así lo considera.

### 3.1.2.5 Evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios cualitativos seleccionados

La evaluación de los sistemas o equipos para cada uno de los criterios, se realizará en una reunión de trabajo donde intervenga el equipo de mantenimiento, seguridad, personas que estén relacionadas al tema. Se deberá determinar un valor cuantificado por cada uno de los factores evaluados, tomando en cuenta la escala de los valores establecidos en las Tablas (3.17, 3.18, 3.19 y 3.20, 3.21 y 3.22) Posterior a esto se deberá seguir los siguientes pasos para llenar la (**Tabla 3.23**):

- Se debe tener o llevar un historial detallado de los fallos, mantenimientos de los sistemas y equipos.
- En la columna **E** (Medio Ambiente) se colocará respectivamente en cada sistema el número que corresponda según la escala de la (**Tabla 3.17**).
- En la columna tres ( $EI=E/\text{total}$ ) el valor colocado para el respectivo sistema se divide para el valor total de la suma de la columna E.
- En la columna **S** (Seguridad) se colocará respectivamente en cada sistema el número que corresponda según la escala de la (**Tabla 3.18**).
- En la columna cuatro ( $SI=S/\text{total}$ ) el valor colocado para el respectivo sistema se divide para el valor total de la suma de la columna S.
- En la columna **Q** (Calidad) se colocará respectivamente en cada sistema el número que corresponda según la escala de la (**Tabla 3.19**).
- En la columna cuatro ( $QI=Q/\text{total}$ ) el valor colocado para el respectivo sistema se divide para el valor total de la suma de la columna Q.
- En la columna **W** (Disponibilidad) se colocará respectivamente en cada sistema el número que corresponda según la escala de la (**Tabla 3.20**).
- En la columna cuatro ( $WI=W/\text{total}$ ) el valor colocado para el respectivo sistema se divide para el valor total de la suma de la columna W.



- En la columna **SP** (Servicio Prestado) se colocará respectivamente en cada sistema el número que corresponda según la escala de la (**Tabla 3.21**).
- En la columna cuatro ( $SPI=SP/ \text{total}$ ) el valor colocado para el respectivo sistema se divide para el valor total de la suma de la columna SP.
- En la columna **M** (Mantenibilidad) se colocará respectivamente en cada sistema el número que corresponda según la escala de la (**Tabla 3.22**).
- En la columna cuatro ( $MI=M/ \text{total}$ ) el valor colocado para el respectivo sistema se divide para el valor total de la suma de la columna W.
- Al final se suma los valores colocados en cada columna (E, S, Q, W, SP, M) respectivamente y se coloca el valor total de la suma al final.
- Se divide cada valor de la columna para el total de la suma de la respectiva columna y se coloca en siguiente cajón del valor que se tomó para dividir. (si se toma el primer valor de la columna uno se divide para la suma total de esta columna, el resultado se colocará en el segundo cajón de la columna tres).

Tabla 3.23: Evaluación de los sistemas para cada uno de los criterios seleccionados

<b>Criterios</b>	<b>E</b>	<b>Jerarquización Local El=(E/total)</b>	<b>S</b>	<b>Jerarquización local Sl=(S/total)</b>	<b>Q</b>	<b>Jerarquización local Ql=(Q/total)</b>	<b>W</b>	<b>Jerarquización local Wl=(W/total)</b>	<b>SP</b>	<b>Jerarquización local SPl=(SP/total)</b>	<b>M</b>	<b>Jerarquización local Ml=(M/total)</b>
<b>Sistemas</b>												
<b>Sistema material rodante</b>	2	0,1538	5	0,2083	3	0,1667	9	0,2571	6	0,2727	5	0,2778
<b>Sistema de alimentación</b>	2	0,1538	7	0,2917	3	0,1667	7	0,2	6	0,2727	3	0,1667
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	2	0,1538	3	0,125	5	0,2778	7	0,2	3	0,1363	4	0,2222
<b>Sistema de obra civil</b>	2	0,1538	3	0,125	3	0,1667	7	0,2	3	0,1363	4	0,2222
<b>Sistema de mantenimiento</b>	5	0,3846	6	0,25	4	0,2222	5	0,1428	4	0,1818	2	0,1111
<b>Total</b>	<b>13</b>		<b>24</b>		<b>18</b>		<b>35</b>		<b>22</b>		<b>18</b>	

### 3.1.2.6 Jerarquización por nivel de importancia y por cada criterio

En función de los valores de jerarquización obtenidos para cada uno de los criterios (**Tabla 3.23**); se ordenará los sistemas o equipos según el nivel de importancia (de mayor a menor) por cada uno de los 7 factores evaluados.

Se deberá trasladar los valores de la (**Tabla 3.23**) a las tablas (3.24, 3.25, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29) respectivamente.

#### Factor medio ambiente (E)

Tabla 3.24: Jerarquización por factor medio ambiente

<b>Criterios</b>	<b>E</b>	<b>Criticidad (EI=E/total)</b>
<b>Sistemas</b>	<b>E</b>	
<b>Sistema de mantenimiento</b>	<b>5</b>	0,3846
<b>Sistema material rodante</b>	<b>2</b>	0,1538
<b>Sistema de alimentación</b>	<b>2</b>	0,1538
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	<b>2</b>	0,1538
<b>Sistema de obra civil</b>	<b>2</b>	0,1538
<b>Total</b>	<b>13</b>	

**Factor seguridad (S)**

Tabla 3.25: Jerarquización por factor predicción de fallos

<b>Criterios</b>		<b>Criticidad (SI=S/total)</b>
<b>Sistemas</b>	<b>S</b>	
<b>Sistema de alimentación</b>	<b>7</b>	0,2917
<b>Sistema de mantenimiento</b>	<b>6</b>	0,25
<b>Sistema material rodante</b>	<b>5</b>	0,2083
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	<b>3</b>	0,125
<b>Sistema de obra civil</b>	<b>3</b>	0,125
<b>Total</b>	<b>24</b>	

**Factor calidad (Q)**

Tabla 3.26: Jerarquización por factor calidad

<b>Criterios</b>		<b>Criticidad (QI=Q/total)</b>
<b>Sistemas</b>	<b>Q</b>	
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	<b>5</b>	0,2778
<b>Sistema de mantenimiento</b>	<b>4</b>	0,2222
<b>Sistema material rodante</b>	<b>3</b>	0,1667
<b>Sistema de alimentación</b>	<b>3</b>	0,1667
<b>Sistema de obra civil</b>	<b>3</b>	0,1667
<b>Total</b>	<b>18</b>	

**Factor disponibilidad (W)**

Tabla 3.27: Jerarquización por factor disponibilidad

<b>Criterios</b>		<b>Criticidad (WI=W/total)</b>
<b>Sistemas</b>	<b>W</b>	
<b>Sistema material rodante</b>	<b>9</b>	0,2571
<b>Sistema de alimentación</b>	<b>7</b>	0,2
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	<b>7</b>	0,2
<b>Sistema de obra civil</b>	<b>7</b>	0,2
<b>Sistema de mantenimiento</b>	<b>5</b>	0,1428
<b>Total</b>	<b>35</b>	

**Factor servicio prestado (SP)**

Tabla 3.28: Jerarquización por factor servicio prestado

<b>Criterios</b>		<b>Criticidad (SPI=SP/total)</b>
<b>Sistemas</b>	<b>SP</b>	
<b>Sistema material rodante</b>	<b>6</b>	0,2727
<b>Sistema de alimentación</b>	<b>6</b>	0,2727
<b>Sistema de mantenimiento</b>	<b>4</b>	0,1818
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	<b>3</b>	0,1363
<b>Sistema de obra civil</b>	<b>3</b>	0,1363
<b>Total</b>	<b>22</b>	

**Factor mantenibilidad (M)**

Tabla 3.29: Jerarquización por factor mantenibilidad

<b>Criterios</b>	<b>M</b>	<b>Criticidad (MI=M/total)</b>
<b>Sistemas</b>		
<b>Sistema material rodante</b>	<b>5</b>	0,2778
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	<b>4</b>	0,2222
<b>Sistema de obra civil</b>	<b>4</b>	0,2222
<b>Sistema de alimentación</b>	<b>3</b>	0,1667
<b>Sistema de mantenimiento</b>	<b>2</b>	0,1111
<b>Total</b>	<b>18</b>	

### 3.1.2.7 Congruencia de los juicios. Radio de inconsistencia (ir) y jerarquización cada uno de estos criterios

- Para la resolución de la (**Tabla 3.30**) trasladamos los valores de la (**Tabla 3.16**) en los espacios correspondientes.
- Sumamos de forma vertical los valores de cada columna (2, 3, 4, 5, 6,7) y colocamos el valor de la suma al final de cada columna, en la fila que corresponde al Total.
- Luego se realiza una nueva matriz (**Tabla3.31**), con los mismos títulos que están representados en la (**Tabla 3.30**) pero sin incluir las dos últimas filas.

Para llenar la (**Tabla 3.31**) se debe seguir los siguientes pasos:

- Se divide el valor de cada fila para el total de cada columna respectivamente y se coloca en el lugar correspondiente de la (**Tabla3.31**) por ejemplo: el valor 1 que corresponde al segundo elemento de la segunda fila se divide para el valor 14 que corresponde al total de la segunda columna y el resultado se lo coloca en el segundo cuadro de la primera fila de la (**Tabla 3.31**). De esta manera se realiza con el resto de valores.

- Para llenar la última columna de la (**Tabla 3.31**) se suma los valores de cada fila, se saca el promedio y ese valor se coloca en el cuadro del final de la fila que corresponde a la jerarquización total por criterio. Lo mismo se realiza en las siguientes filas. }
- Finalmente se ubica los valores de la última columna de la (**Tabla 3.31**) en la columna correspondiente de la (**Tabla 3.30**).
- Para conocer que el sistema de juicios es consistente, se utiliza las ecuaciones (5, 6, 7 y 8) para obtener el radio de inconsistencia.
  - Se realiza una multiplicación de matrices; entre los valores de la matriz de la Tabla 3.16 (orden 6x6) y los valores de los auto vectores (Jerarquización por criterio) (matriz 4x1) de la Tabla 3.28; con ello se consiguen los valores de la (**Tabla 3.32**).
  - Divide cada valor obtenido de la matriz resultante (columna 1 de la **Tabla 3.32**) para cada valor obtenido de la matriz de autovectores (columna 2 de la **Tabla 3.32**) respectivamente. (se divide el primer valor de la segunda fila para el segundo valor de la segunda fila y ese valor se coloca en el tercer cuadro de la misma fila) se realiza lo mismo con el resto de valores.
  - Se obtiene un promedio de los valores de la tercera columna y ese valor es  $\lambda_{\max}$  (**Tabla 3.32**).
  - Con la ecuación 7 se determina el índice de consistencia (CI).
  - Para encontrar el radio de inconsistencia ecuación 8, se toma el valor de RI (valor aleatorio promedio) de la (**Tabla 1.2**).
  - Al final se debe comprobar que el valor del radio de inconsistencia  $IR \leq 0,1$ ; si existiera inconsistencia, inmediatamente se volvería a repetir la evaluación de la matriz (**Tabla 3.16**). Si no hay inconsistencia se continúa con el análisis.
    - $IR \leq 0.10$  Consistencia razonable
    - $IR > 0.10$  Inconsistencia

Tabla 3.30: Estimación del IR y jerarquización de los criterios evaluados

<b>Criterios</b>	<b>Medio ambiente</b>	<b>Seguridad</b>	<b>Calidad</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Servicio prestado</b>	<b>Mantenibilidad</b>	<b>Jerarquización por criterio</b>
<b>Medio ambiente</b>	1	1/2	1/2	1/2	1/5	1/2	<b>0,0674</b>
<b>Seguridad</b>	2	1	1/3	1/3	1/6	1/2	<b>0,0733</b>
<b>Calidad</b>	2	3	1	2	1/2	2	<b>0,2016</b>
<b>Disponibilidad</b>	2	3	1/2	1	1/4	2	<b>0,1474</b>
<b>Servicio prestado</b>	5	6	2	4	1	3	<b>0,3966</b>
<b>Mantenibilidad</b>	2	2	1/2	1/2	1/3	1	<b>0,1138</b>
<b>Total</b>	14,00	15,50	4,83	8,33	2,45	9,00	
<b>Radio de inconsistencia IR</b>	<b>0.037</b>						

Tabla 3.31: Tabla de apoyo para la resolución de la (Tabla3.30)

<b>Criterios</b>	<b>Medio ambiente</b>	<b>Seguridad</b>	<b>Calidad</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Servicio prestado</b>	<b>Mantenibilidad</b>	<b>Jerarquización por criterio</b>
<b>Medio ambiente</b>	0,0714	0,0323	0,1034	0,0600	0,0816	0,0556	<b>0,0674</b>
<b>Seguridad</b>	0,1429	0,0645	0,0690	0,0400	0,0680	0,0556	<b>0,0733</b>
<b>Calidad</b>	0,1429	0,1935	0,2069	0,2400	0,2041	0,2222	<b>0,2016</b>
<b>Disponibilidad</b>	0,1429	0,1935	0,1034	0,1200	0,1020	0,2222	<b>0,1474</b>
<b>Servicio prestado</b>	0,3571	0,3871	0,4138	0,4800	0,4082	0,3333	<b>0,3966</b>
<b>Mantenibilidad</b>	0,1429	0,1290	0,1034	0,0600	0,1361	0,1111	<b>0,1138</b>



Tabla 3.32: Tabla para obtener el valor  $\lambda_{\max}$  de la matriz

Valores de la matriz resultante ( $W \cdot \tilde{\omega}$ )	Valores de la matriz de autovectores ( $\tilde{\omega}$ )	$(W \cdot \tilde{\omega}) / (\tilde{\omega})$
0,4147	0,0674	6,1542
0,4473	0,0733	6,1018
1,2768	0,2016	6,3334
0,9295	0,1474	6,3082
2,5073	0,3966	6,3222
0,7018	0,1138	6,1699

Se aplica las ecuaciones 7 y 8 respectivamente

$$CI = \frac{6,2316 - 6}{6 - 1} = 0,0463$$

$$RI = \frac{0,0436}{1,25} = 0,037$$

### 3.1.2.8 Jerarquización final de los sistemas con factores cualitativos

Se deberá cuantificar para cada uno de los sistemas o equipos evaluados la jerarquización final, en función de la valoración realizada a cada uno de los criterios (local/total) evaluados anteriormente (**Tablas 3.24 al 3.29**).

- Se colocará los valores de la (**Tabla 3.24**) en la columna dos (Factor E) de la (**Tabla 3.33**) y se multiplicará cada valor de esta columna por el valor de la jerarquización por criterio correspondiente al factor medio ambiente (**Tabla 3.31**).
- Los valores de la (**Tabla 3.25**) se colocará en la columna Tres (Factor S) de la (**Tabla 3.33**) y se multiplicará cada valor de esta columna por el valor de la jerarquización por criterio correspondiente al factor seguridad (**Tabla 3.31**).

- Los valores de la (**Tabla 3.26**) se colocará en la columna cuatro (Factor Q) de la (**Tabla 3.33**) y se multiplicará cada valor de esta columna por el valor de la jerarquización por criterio correspondiente al factor calidad (**Tabla 3.31**).
- Los valores de la (**Tabla 3.27**) se colocará en la columna cinco (Factor W) de la (**Tabla 3.33**) y se multiplicará cada valor de esta columna por el valor de la jerarquización por criterio correspondiente al factor disponibilidad (**Tabla 3.31**).
- Los valores de la (**Tabla 3.28**) se colocará en la columna seis (Factor SP) de la (**Tabla 3.33**) y se multiplicará cada valor de esta columna por el valor de la jerarquización por criterio correspondiente al factor servicio prestado (**Tabla 3.31**).
- Los valores de la (**Tabla 3.29**) se colocará en la columna siete (Factor M) de la (**Tabla 3.33**) y se multiplicará cada valor de esta columna por el valor de la jerarquización por criterio correspondiente al factor mantenibilidad (**Tabla 3.31**).
- Finalmente cada valor obtenido se sumará de forma horizontal y se colocará al final de cada fila.

Tabla 3.33: Jerarquización Final

<b>Criterios</b>	<b>Jerarquización local x total factor E</b>	<b>Jerarquización local x total factor S</b>	<b>Jerarquización local x total factor Q</b>	<b>Jerarquización local x total factor W</b>	<b>Jerarquización local x total factor SP</b>	<b>Jerarquización local x total factor M</b>	<b>Jerarquización Final=(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)</b>
<b>Sistemas</b>	<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(3)</b>	<b>(4)</b>	<b>(5)</b>	<b>(6)</b>	
<b>Sistema del material rodante</b>	(0,1538)x(0,0674)	(0,2083)x(0,0733)	(0,1667)x(0,2016)	(0,2571)x(0,1474)	(0,2727)x(0,3966)	(0,2728)x(0,1138)	<b>0,24</b>
<b>Sistema de alimentación</b>	(0,1538)x(0,0674)	(0,2917)x(0,0733)	(0,1667)x(0,2016)	(0,2)x(0,1474)	(0,2727)x(0,3966)	(0,1667)x(0,1138)	<b>0,22</b>
<b>Sistema de comunicación y señalización</b>	(0,1538)x(0,0674)	(0,125)x(0,0733)	(0,2778)x(0,2016)	(0,2)x(0,1474)	(0,1363)x(0,3966)	(0,2222)x(0,1138)	<b>0,18</b>
<b>Sistema de obra civil</b>	(0,1538)x(0,0674)	(0,125)x(0,0733)	(0,1667)x(0,2016)	(0,2)x(0,1474)	(0,1336)x(0,3966)	(0,2222)x(0,1138)	<b>0,16</b>
<b>Sistema de mantenimiento</b>	(0,3836)x(0,0674)	(0,25)x(0,0733)	(0,2222)x(0,2016)	(0,1428)x(0,1474)	(0,1818)x(0,3966)	(0,1111)x(0,1138)	<b>0,19</b>

- Luego, se ordenan los resultados según el nivel de importancia (ranking) de mayor a menor (**Tabla3.34**). **Ranking de jerarquización final**
- Para llenar la (**Tabla 3.34**), hay que basarse en los resultados de la columna (Jerarquización Final) del (**Tabla 3.33**); colocar los nombres de cada sistema y sus valores correspondientes (primera y segunda columna del (**Tabla 3.34**) de mayor a menor. Finalmente enumerar del 1 al 5 en la columna del ranking.<sup>9</sup>

Tabla3.34: Ranking con factores cualitativos

Sistemas	Jerarquización Final	Ranking
Sistema del material rodante	0,24	1
Sistema de alimentación	0,22	2
Sistema de mantenimiento	0,19	3
Sistema de comunicación y señalización	0,18	4
Sistema de obra civil	0,16	5

En la (**Tabla3.34**). Se tiene como resultado la jerarquización de los sistemas en base a la aplicación del modelo AHP con los factores cuantitativos.

En el análisis con valores cualitativos se determinó que el sistema más crítico es el material rodante (**Tabla 3.34**), por tanto a este sistema es el que más precaución se debería tomar. Vale recalcar que los valores colocados en el análisis son hipótesis, ya que no se tiene los criterios del equipo de mantenimiento.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> En este caso se enumerará del 1 al 5 por que hay cinco sistemas que se está analizando, puede variar según el número de sistemas o equipos que se deseen analizar

<sup>10</sup> Para tener una secuencia de cómo es el análisis para determinar el sistema o equipo más crítico. Se ha tomado valores que no son reales ya que no se tiene un historial de fallos o mantenimiento.

### 3.1.3 Comparación de jerarquización con factores cuantitativos y cualitativos

Tabla3.35: Ranking con factores cuantitativos

Sistemas	Jerarquización Final	Ranking
Sistema del material rodante	0,272	1
Sistema de comunicación y señalización	0,218	2
Sistema de mantenimiento	0,185	3
Sistema de alimentación	0,176	4
Sistema de obra civil	0,138	5

Tabla3.36: Ranking con factores cualitativos

Sistemas	Jerarquización Final	Ranking
Sistema del material rodante	0,236	1
Sistema de alimentación	0,221	2
Sistema de mantenimiento	0,195	3
Sistema de comunicación y señalización	0,184	4
Sistema de obra civil	0,162	5

Se puede observar que la jerarquización es totalmente diferente en cada análisis, ya que los sistemas de alimentación, mantenimiento, comunicación y señalización, varían en posición del análisis cuantitativo con respecto al cualitativo.

Este proceso se lo puede realizar cada 6 meses o anualmente, dependiendo la organización que tenga el equipo de mantenimiento. Las jerarquizaciones de los sistemas pueden variar en cada análisis en función del número de fallos, mantenimientos y repercusiones que estos generen.

### 3.2 Conclusiones

- Se aplicó el modelo AHP híbrido para determinar la jerarquización de los cinco sistemas principales de un sistema tranviario tanto con factores cuantitativos como cualitativos; así se pudo constatar la viabilidad de su implementación.
- El modelo AHP híbrido permite establecer los sistemas críticos, relacionando diferentes tipos de variables según el historial de mantenimiento y fallos que presente el sistema del tranvía y las normas internas que establezca la empresa por medio del equipo de mantenimiento basándose en norma nacionales, gubernamentales e internacionales; tomando en consideración diferentes variables como (seguridad, medio ambiente, etc.).
- Se determinó que la jerarquización con la aplicación de factores cuantitativos es totalmente distinta a la jerarquización que se estableció con los factores cualitativos esto se puede observar en las tablas (3.35 y 3.36). Los valores colocados son hipótesis ya que no se tiene un registro del historial de fallos, mantenimientos, repercusiones de estos, ya que el tranvía está en etapa de construcción (estos valores fueron determinados bajo criterio de los autores del trabajo, y únicamente con propósitos demostrativos).
- En la jerarquización con factores cuantitativos, el sistema material rodante es el más crítico según el orden jerárquico; en el análisis con factores cualitativos, el sistema más crítico es el sistema de material rodante. Si los valores colocados fueran de un historial real de fallos y de mantenimientos; estos sistemas son los que más atención deberían tener por parte del equipo de mantenimiento.
- Este modelo es totalmente aplicable a cualquier sistema, equipo o empresa que desee jerarquizar alguna área o departamento de trabajo. El modelo AHP híbrido se adapta a las distintas necesidades, y variables que se presenten o determinen por parte del equipo de mantenimiento y personas que realicen el análisis jerárquico.

## **Capítulo IV**

### **DESARROLLO DE HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DEL MODELO AHP HÍBRIDO**

#### **4.1 Descripción del software**

La herramienta computacional que se desarrolló para la jerarquización de los sistemas o equipos del tranvía de los cuatro ríos fue implementada en una hoja de cálculo en el programa “Excel” a base de “macros”, este programa permite jerarquizar los equipos, introduciendo las variables que la empresa requiera para el funcionamiento del mismo. Además se puede cambiar las variables y equipos según la exigencia del mismo. (Ver Anexo 1)

##### **4.1.1 Características principales**

- Analiza seis criterios cualitativos: Medio ambiente, seguridad, calidad, disponibilidad, servicio prestado y mantenibilidad. Para jerarquizar los equipos o sistema antes que entren en funcionamiento.
- Analiza cuatro criterios cuantitativos: Frecuencia de fallos, predicción de fallos, severidad de fallos y costos de fallos. Este tipo de análisis permite jerarquizar los equipos o sistema en función de un historial de fallos que se lleve la empresa.
- Optimiza la jerarquización al simplificar varios procesos en el análisis.
- Permite Jerarquizar 300 equipos o sistema de manera cualitativa y cuantitativa a la vez o independientemente.

## 4.2 Plan para la implementación de la metodología AHP para la jerarquización de equipos en la unidad de mantenimiento del tranvía

A continuación se presenta la forma de aplicar la metodología AHP con ayuda de un software, de forma que permita determinar la jerarquización de cualquier sistema o equipo.

### 4.2.1 Introducción de los sistemas o equipos a ser jerarquizados

Se debe introducir los nombres de los sistemas o equipos que se desee analizar y jerarquizar, para ello se va a tomar los subsistemas del sistema material rodante.

- Para ingresar el equipo o sistema, el programa debe estar en la ventana **Ingresar datos** (Figura 4.1) y se debe realizar clic en el espacio en blanco para colocar el nombre del equipo.
- Hacer clic en el botón **Ingresar** para introducir el equipo (Figura 4.2) al sistema, se puede comprobar que el equipo ha sido introducido en la lista de equipos (Figura 4.3).
- En caso de que el equipo no sea el correcto se lo puede eliminar realizando clic en el botón **Borrar** (Figura 4.1).
- Una vez que se ingresó todos los sistemas o equipos que se desee jerarquizar se debe visualizar el cuadro Ir (Figura 4.1).



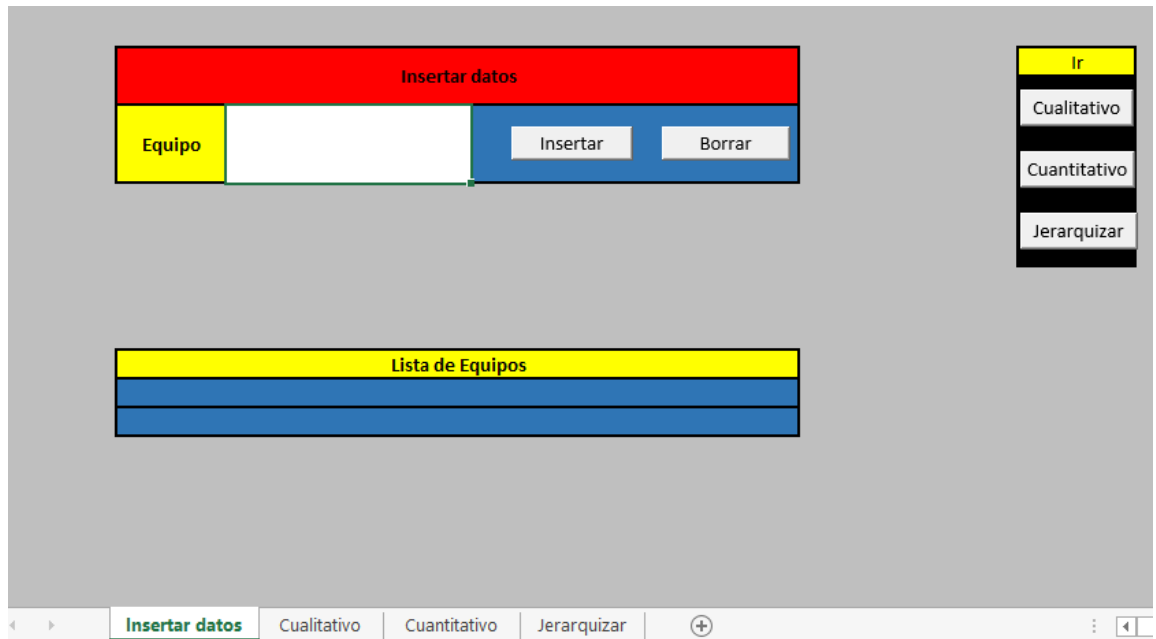


Figura 4.1: Ventana Ingresar datos

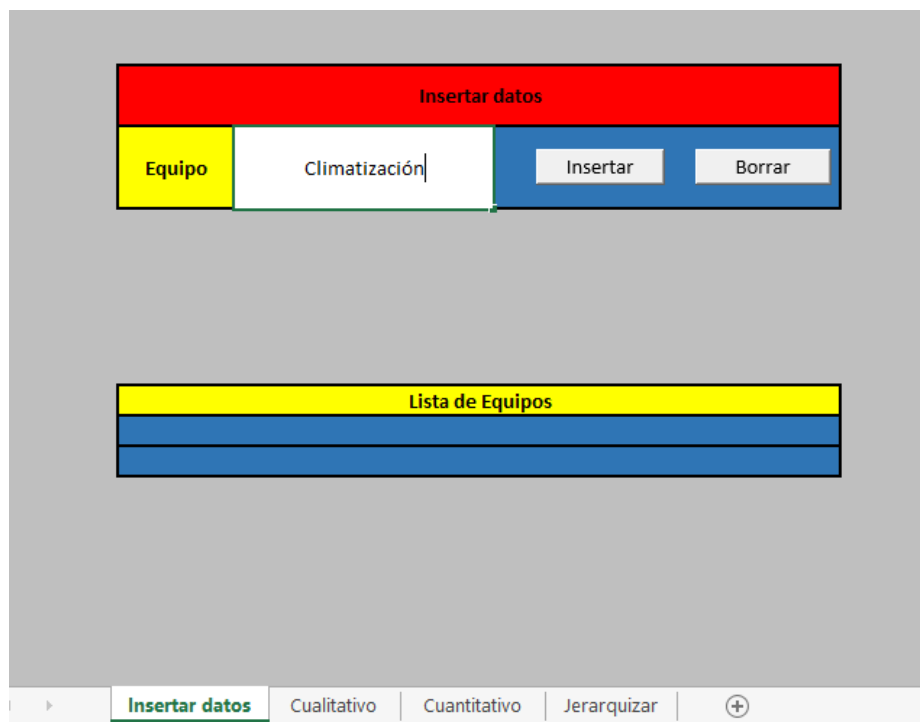


Figura 4.2: Insertar equipo

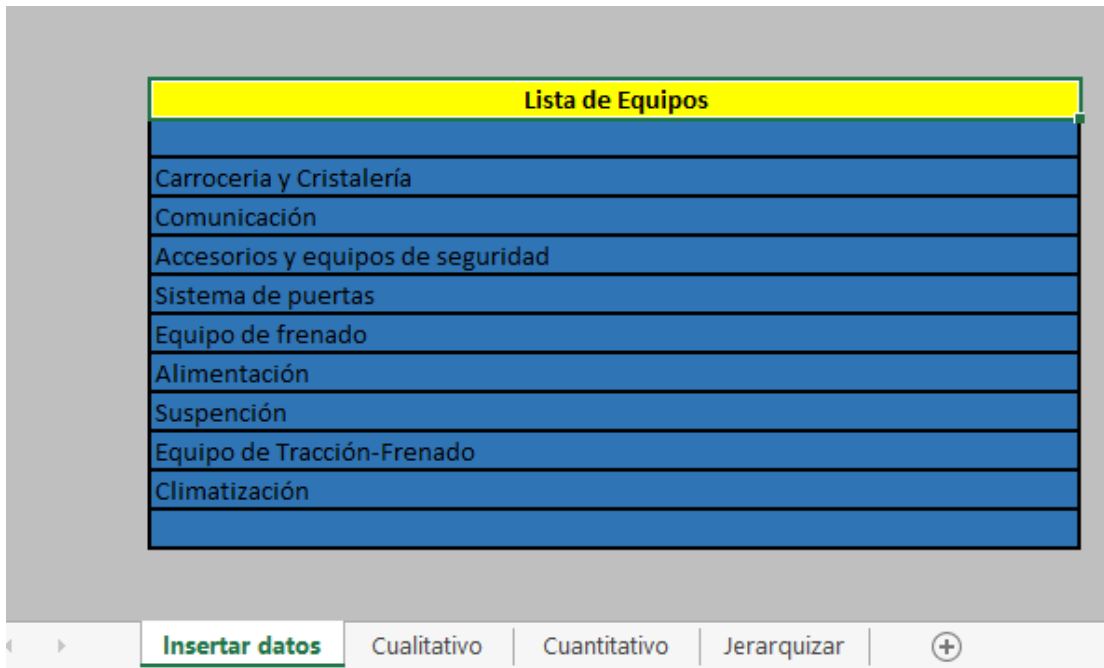


Figura 4.3: Lista de equipos

### 4.3 Análisis cualitativo

#### 4.3.1 Ingresar valores cualitativos de los equipos

Los valores cualitativos se los determinará en reuniones con el equipo de mantenimiento del sistema y personas que tengan conocimientos del funcionamiento de cada sistemas o equipos que van a ser analizados.

Para Ingresar los valores establecidos en el análisis con factores cualitativos se deberá seguir los siguientes pasos:

- Hacer clic en el botón **Cualitativo** (Figura 4.1), el cual nos lleva a la ventana del mismo nombre (Figura 4.4).

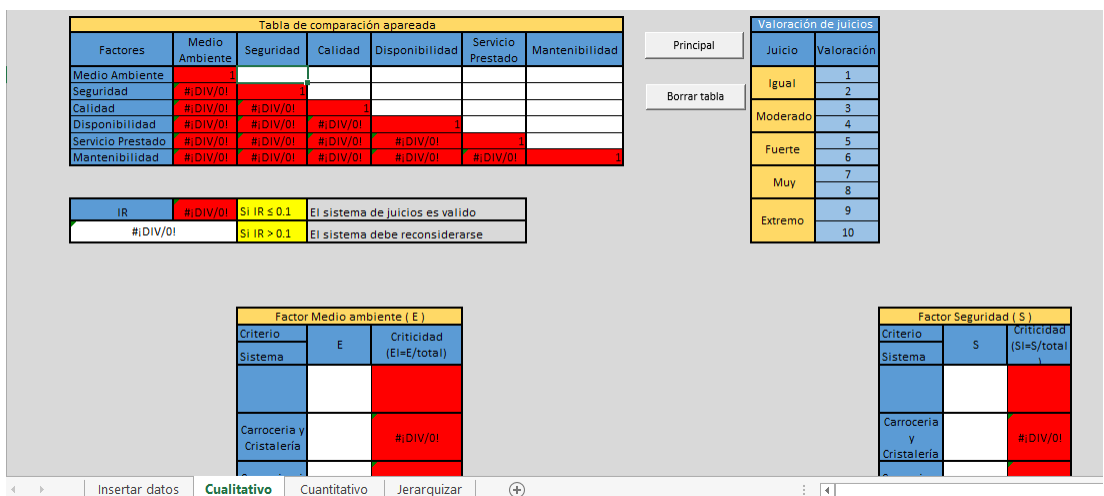


Figura 4.4: Ventana Cualitativo

- En la ventana **Cualitativo** se deberá llenar la tabla de comparación apareada la cual se debe realizar a través de criterios del personal de mantenimiento y personas que conozcan del tema antes expuesto, ayudados de la tabla valoración de juicios, dispuesto en la misma ventana (para entender mejor la comparación apareada dirigirse a la tabla 3.14). (figura 4.4).
- Al llenar la tabla se debe constatar que sea válida, para ello se debe verificar el valor de radio de inconsistencia, para ello la (Figura 4.5) **a** significa que la tabla es correcta ya que ( $IR \leq 0.10$ ) en caso contrario, **b** indica que no es válida ( $IR \geq 0.10$ )<sup>11</sup> en ese caso se puede aplastar el botón (**Borrar tabla**) para reiniciar el sistema de juicios, realizar el mismo proceso hasta que la tabla sea válida.

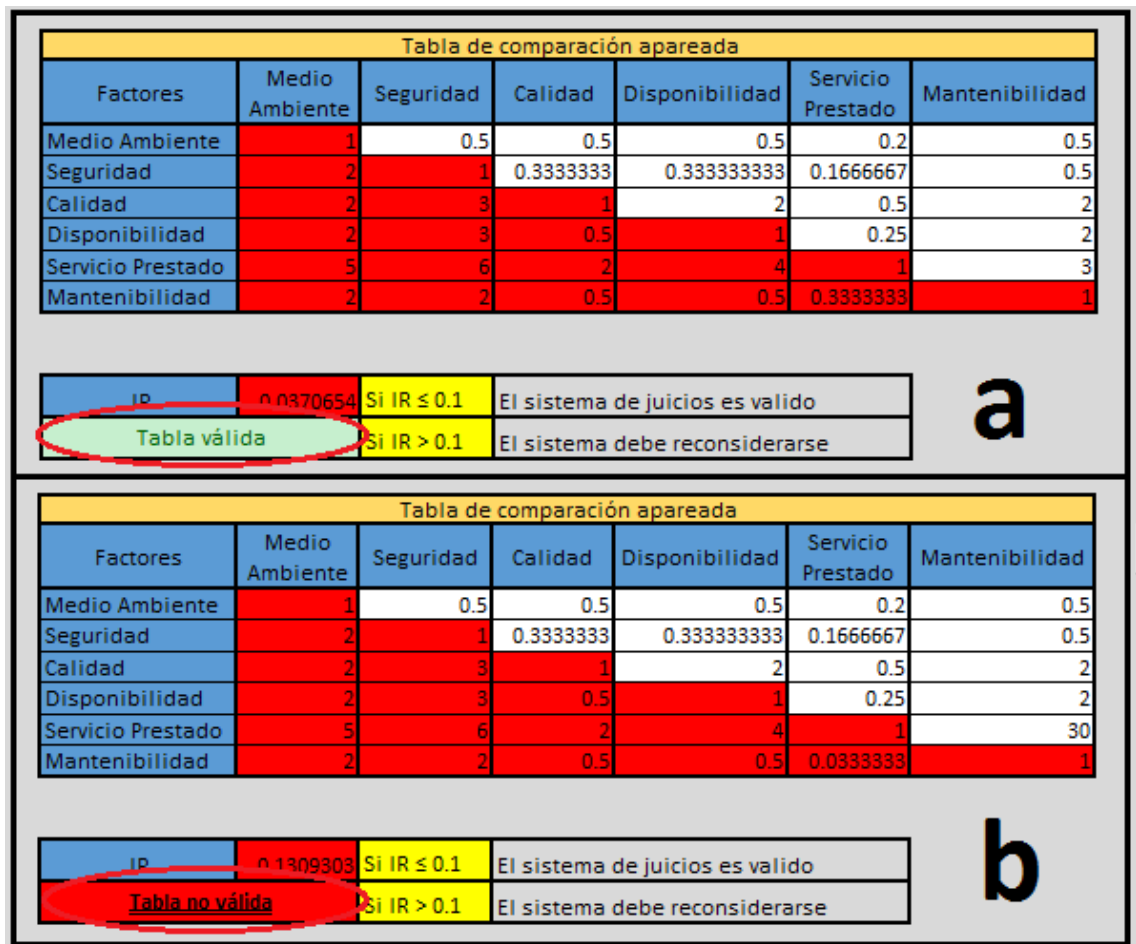


Figura 4.5: Verificación de tabla apareada cualitativa

<sup>11</sup> La tabla es correcta cuando el radio de inconsistencia esta dentro del rango que determinó **Thomas L. Saaty** en el análisis AHP de 1000 matrices y cuando no está dentro de ese rango no es válido los valores de la matriz de comparación apareada.

- Colocar los valores de los factores cualitativos a ser analizados por la empresa (Medio ambiente, seguridad, calidad, disponibilidad, servicio prestado y mantenibilidad), determinados para cada equipo o sistema a ser jerarquizado (Figura 4.6). En la parte de inferior de cada tabla se tiene como referencia la escala del respectivo factor (Figura 4.7). Todas las tablas deberán ser llenadas basándose en la escala de cada factor respectivamente.
- Una vez llenado todas las tablas de los factores cualitativos respecto a cada equipo o sistema, se da clic en el botón **(Principal)** (Figura 4.4) para retornar a la ventana **Ingresar datos** (Figura 4.1).



Figura 4.6: Valores cualitativos de los equipos

Escala del criterio Medio ambiente		
E	Escala y nivel de medio ambiente	Definición del nivel del medio ambiente
1	Bajo	Un fallo en un equipo o sistema que no cause contaminación ambiental. (No existe ningún riesgo de pérdida de vida, ni afección a la salud, ni daños ambientales)
2		
3	Medio	Riesgo mínimo de pérdida de vida y afección a la salud (recuperable en el corto plazo) o incidente ambiental menor (controlable), derrames fáciles de contener y fugas repetitivas
4	Alto	Un fallo en un equipo o sistema que pueda afectar a los trabajadores o en la interna de la empresa. Riesgo medio de pérdidas de vida
5		
6	Muy alto	Riesgo medio de pérdida de vida, daños importantes a la salud, y/o incidente ambiental de difícil restauración
7	Altamente peligroso	Un fallo en un equipo o sistema que obligue a la empresa a informar a las autoridades públicas por problemas de salud que se puede generar en la población o medio ambiente. Además genera un riesgo alto de pérdida de vida, daños graves a la salud del personal y/o incidente (catastrófico) que exceden los límites permitidos
8		
9		
10		

Insertar datos **Cualitativo** Cuantitativo Jerarquizar (+)

Figura 4.7: Escala de valores cualitativos de las variables

#### 4.4 Análisis cuantitativo

##### 4.4.1 Ingresar valores cuantitativos de los equipos

Los valores cuantitativos se los determinará en función del historial de fallos, reparaciones y consecuencias que están han causado al sistema tranviario.

Para Ingresar los valores establecidos en el análisis con factores cuantitativos se deberá seguir los siguientes pasos:

- Hacer clic en el botón **Cuantitativo** (Figura 4.1) el cual me dirige la ventana del mismo nombre (figura 4.8).

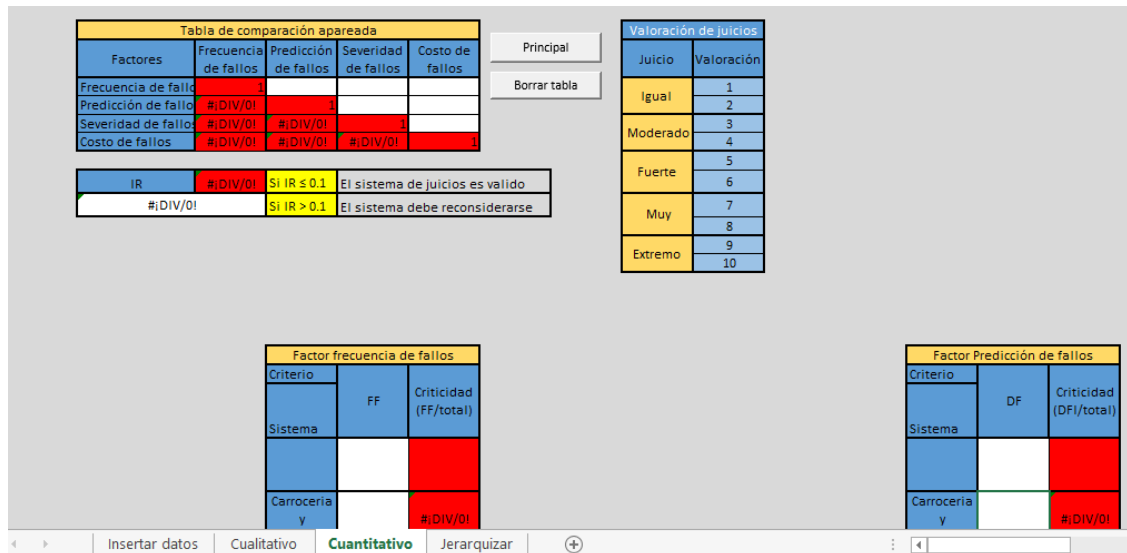


Figura 4.8: Ventana Cuantitativo

- En la ventana **Cuantitativo** se deberá llenar la tabla de comparación apareada, la cual se debe realizar a través de criterios del personal de mantenimiento en base al historial de fallos, reparaciones y consecuencias que éstas han generado (para entender mejor la comparación apareada dirigirse a la tabla 3.14) (Figura 4.8).
- Al llenar la tabla se debe constatar que sea válida, para ello se debe verificar el valor de radio de inconsistencia, para ello la (Figura 4.9) **a** significa que la tabla es correcta ya que ( $IR \leq 0.10$ ) en caso contrario, **b** indica que no es válida ( $IR \geq 0.10$ ) en ese caso se puede aplastar el botón (**Borrar tabla**) para reiniciar el sistema de juicios, realizar el mismo proceso hasta que la tabla sea válida.<sup>12</sup>

<sup>12</sup> La tabla es correcta cuando el radio de inconsistencia esta dentro del rango que determinó **Thomas L. Saaty** en el análisis AHP de 1000 matrices y cuando no está dentro de ese rango no es válido los valores de la matriz de comparación apareada.

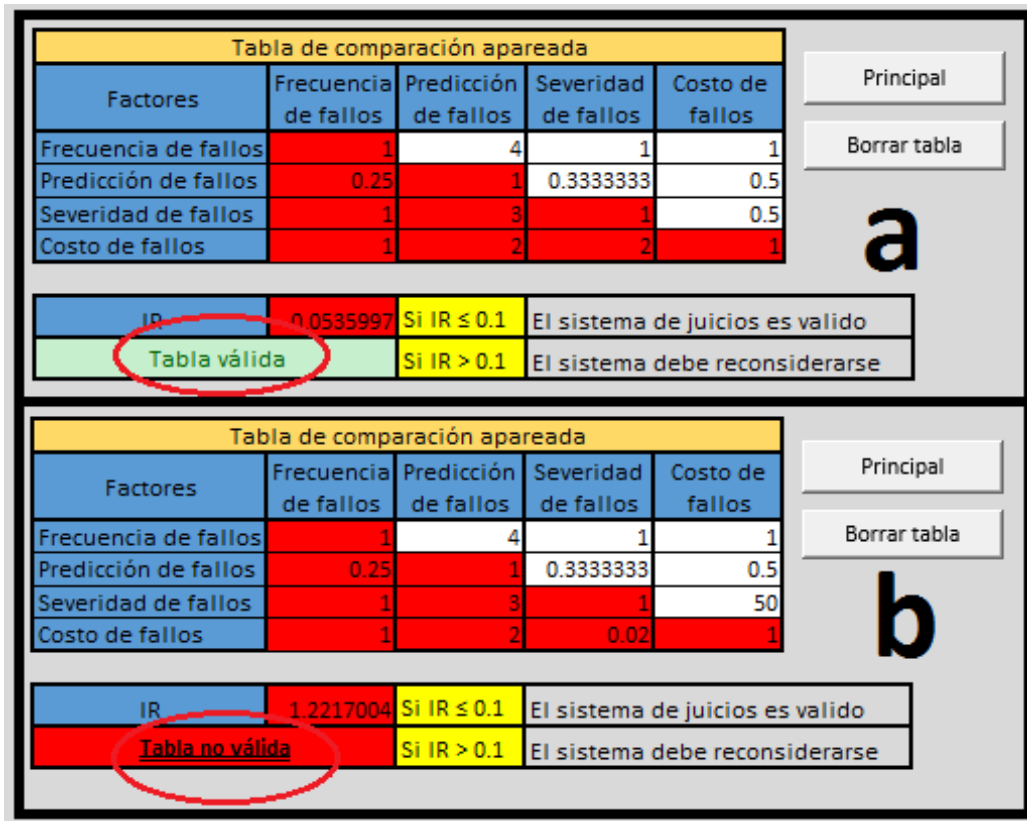


Figura 4.9: Verificación de tabla apareada cuantitativa

- Colocar los valores de los factores cuantitativos a ser analizados por la empresa (frecuencia de fallos, predicción de fallos, severidad de fallos y costo de fallos), determinados para cada equipo o sistema a ser jerarquizado (Figura 4.10). En la parte inferior de cada tabla se tiene como referencia la escala del respectivo factor (Figura 4.11). Todas las tablas deberán ser llenadas basándose en la escala de cada factor respectivamente.
- Una vez llenado, todas las tablas de los factores cuantitativos respecto a cada equipo o sistema, se da clic en el botón (**Principal**) (Figura 4.8) para retornar a la ventana **Ingresar datos** (Figura 4.1).

Factor frecuencia de fallos			Factor Predicción de fallos		
Criterio	FF	Criticidad (FF/total)	Criterio	DF	Criticidad (DFI/total)
Sistema			Sistema		
Carrocería y Cristalería	2	0.04545455	Carrocería y Cristalería	5	0.1136364
Comunicación	4	0.0909091	Comunicación	5	0.1136364
Accesorios y equipos de	4	0.0909091	Accesorios y equipos de	5	0.1136364
Sistema de puertas	5	0.1136364	Sistema de puertas	5	0.1136364
Equipo de frenado	7	0.1590909	Equipo de frenado	5	0.1136364
Alimentación	5	0.1136364	Alimentación	3	0.0681818
Suspensión	5	0.1136364	Suspensión	5	0.1136364
Equipo de Tracción-Frenado	7	0.1590909	Equipo de Tracción-Frenado	5	0.1136364
Climatización	5	0.1136364	Climatización	6	0.1363636

Figura 4.10: Valores cuantitativos de los equipos

Escala del criterio Frecuencia de Fallos			
FF	Escala	Nivel de frecuencia de ocurrencia de fallos	Definición del nivel de frecuencia de ocurrencia de fallos
1	Bajo	Casi no es probable que ocurra	Una falla en más de diez años
2			Una falla entre siete y nueve años
3	Medio	Ocurre muy poco	Una falla entre tres y seis años
4			Una falla entre dos y cuatro años
5	Alto	se produce ocasionalmente	Una falla cada año
6			Una falla cada nueve meses
7	Muy alto	se produce continuamente	Una falla cada seis meses
8			Una falla cada tres meses
9	Extremo	Fallo que es casi inevitable	Una falla por mes
10			Una falla por semana

Figura 4.11: Escala de valores cuantitativos de las variables



## 4.5 Jerarquización Final

### 4.5.1 Jerarquización de equipos cualitativo y cuantitativo

- Hacer clic en el botón **Jerarquizar** (figura 4.1) y nos traslada a la ventana jerarquizar (figura 4.12).

The screenshot shows a software window titled 'Jerarquizar'. It has a yellow header bar with 'Principal' on the left and 'Jerarquizar' in the center. Below the header, there are two main sections: 'Cualitativo' on the left and 'Cuantitativo' on the right. Each section contains a table with three columns: 'Sistema', 'Criticidad', and 'Ranking'. Above each table is a 'Tabla de jerarquización' label. To the right of each table are two buttons: 'Actualizar' and 'Borrar todo'. At the bottom of the window, there is a navigation bar with buttons for 'Insertar datos', 'Cualitativo', 'Cuantitativo', and a large 'Jerarquizar' button. There are also some small icons and a scroll bar on the right side of the bottom bar.

Figura 4.12: Ventana Jerarquizar

- En esta ventana se debe verificar si la jerarquización es exitosa (Figura 4.13) **a** y en caso de que la jerarquización no sea exitosa (Figura 4.13) **b**.
- Si la jerarquización no fue exitosa se deberá volver a realizar la evaluación de juicios tanto de los factores cualitativos (Figura 4.4). como cuantitativos (Figura 4.8).

The figure shows two versions of the 'Jerarquizar' window. Screenshot 'a' shows the window with a green background and the text 'JERARQUIZACIÓN EXITOSA' circled in red. Screenshot 'b' shows the window with a red background and the text 'JERARQUIZACIÓN NO EXITOSA' circled in red. Both screenshots show the same layout as Figure 4.12, but with the background color and the status text changed to indicate the result of the hierarchy process.

Figura 4.13: Comprobación de la jerarquización

- Una vez aprobado los requisitos del programa, hacer clic en los botones **Actualizar** respectivamente en la ventana jerarquizar (Figura 4.12), con esto se determina la jerarquización de los sistema o equipos (Figura 4.14).

JERARQUIZACIÓN EXITOSA				JERARQUIZACIÓN EXITOSA			
Cualitativo			Actualizar	Cuantitativo			Actualizar
Tabla de jerarquización			Borrar todo	Tabla de jerarquización			Borrar todo
Sistema	Criticidad	Ranking		Sistema	Criticidad	Ranking	
Alimentación	0.174307	1		Equipo de frenado	0.1530345	1	
Equipo de frenado	0.151895	2		Equipo de Tracción-Frenado	0.1530345	2	
Equipo de Tracción-Frenado	0.1309437	3		Alimentación	0.1423732	3	
Carrocería y Cristalería	0.117926	4		Sistema de puertas	0.1158592	4	
Sistema de puertas	0.1142162	5		Suspensión	0.1046911	5	
Accesorios y equipos de seguridad	0.0889094	6		Climatización	0.1040949	6	
Suspensión	0.0871338	7		Comunicación	0.091881	7	
Climatización	0.0771909	8		Accesorios y equipos de seguridad	0.091881	8	
Comunicación	0.0574781	9		Carrocería y Cristalería	0.0431507	9	

Insertar datos | Cualitativo | Cuantitativo | **Jerarquizar** (+) | 1

Figura 4.14: Jerarquización Cualitativa y Cuantitativa

- Para realizar una nueva jerarquización se realiza clic en **Borrar todo** para que el sistema se reinicie.
- Se da clic en el botón **Principal** esto nos envía a la ventana **Ingresar datos** (Figura 4.1).

#### 4.6 Resultados del proceso de jerarquización de los sistemas principales

Se podrá verificar que los resultados son iguales tanto en los análisis analíticos como los realizados por el software.

### 4.6.1 Análisis Cuantitativo

#### Análisis Cuantitativo analítico

Tabla4.1: Ranking con factores cuantitativos

Sistemas	Jerarquización Final	Ranking
Sistema del material rodante	0,272	1
Sistema de comunicación y señalización	0,218	2
Sistema de mantenimiento	0.185	3
Sistema de alimentación	0.176	4
Sistema de obra civil	0.138	5

#### Análisis Cuantitativo con el software

JERARQUIZACIÓN EXITOSA			
Cuantitativo			Actualizar
Tabla de jerarquización			Borrar todo
Sistema	Criticidad	Ranking	
Sistema de material rodante	0.2728394	1	
Sistema de comunicación y señalización	0.2184887	2	
Sistema de mantenimiento	0.195166	3	
Sistema de alimentación	0.1755523	4	
Sistema de obra civil	0.1379536	5	

Figura 4.15: Análisis cuantitativo software

### Análisis Cualitativo analítico

Tabla4.2: Ranking con factores cualitativos

Sistemas	Jerarquización Final	Ranking
Sistema del material rodante	0,236	1
Sistema de alimentación	0,221	2
Sistema de mantenimiento	0,195	3
Sistema de comunicación y señalización	0,184	4
Sistema de obra civil	0,162	5

### Análisis Cualitativo con el software

JERARQUIZACIÓN EXITOSA			
Cualitativo			Actualizar
Tabla de jerarquización			Borrar todo
Sistema	Criticidad	Ranking	
Sistema de material rodante	0.236891	1	
Sistema de alimentación	0.2219419	2	
Sistema de mantenimiento	0.1948447	3	
Sistema de comunicación y señalización	0.1843612	4	
Sistema de obra civil	0.1619611	5	

Figura 4.16: Análisis cualitativo software

## 4.7 Conclusiones

- Se analizó que el programa funciona correctamente y es válido ya que entrega los mismos resultados que el análisis AHP híbrido de forma analítica descrito en el Capítulo III; optimizando significativamente los tiempos de análisis. Además esta herramienta se puede aplicar en cualquier empresa que desee jerarquizar sistemas o equipos adaptándolo a sus necesidades.
- Con esta herramienta computacional se detallan los pasos a seguir para la jerarquización de los sistemas y equipos del tranvía de los cuatro ríos; de una manera cualitativa y cuantitativa, permitiendo observar ambas jerarquizaciones. Con los resultados obtenidos se puede tomar decisiones para la planificación del mantenimiento.
- Dentro del sistema material rodante y mediante el análisis cualitativo se estableció que el subsistema más crítico es el de alimentación (Figura 4.14) y en el análisis cuantitativo el subsistema más crítico es el equipo de frenado (Figura 4.14).
- Se comprobó que la jerarquización final de los sistemas, necesariamente no deben ser iguales, al comparar el análisis cualitativo respecto al cuantitativo, ya que el análisis cuantitativo podrá ser implementado cuando exista un registro del historial de fallos y novedades, así como reportes de mantenimiento.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones:

- Mediante el estudio de la información relacionada a la jerarquización de equipos y sistemas, así como también el análisis de diferentes publicaciones, se ha podido identificar diferentes métodos de jerarquización de procesos, sistemas y equipos de un sistema de producción y mantenimiento; además la jerarquización permite conocer el impacto y los riesgos a los que están expuestos los equipos o sistemas en base a diferentes factores tanto cualitativos como cuantitativos: Seguridad, medio ambiente, calidad, disponibilidad, fallos, mantenimientos, etc; que se pueden presentar durante su funcionamiento y con ello planificar y tomar decisiones que conllevan a mejorar la confiabilidad, disponibilidad y la eficiencia de los mismos, sin contratiempos que puedan elevar los costos de producción y operación o comprometer la seguridad de las personas y de los equipos.
- Se desarrolló un modelo de jerarquización AHP híbrido, que es la unión del modelo AHP (Proceso Analítico Jerárquico), con el MCR (Matriz de criticidad por riesgo (semi cuantitativo)) y CTR (Criticidad total por riesgo (semi cuantitativo)). El AHP híbrido se sugiere sea aplicado para realizar la jerarquización de equipos, componentes y sistemas del sistema tranviario de los cuatro ríos; ya que se adapta a las variables y necesidades que tiene el sistema tranviario, además este modelo realiza un análisis tanto cuantitativo como cualitativo. El análisis cuantitativo se lo puede realizar cuando el sistema tranviario entre en funcionamiento y se lleve un historial de fallos, consecuencias y mantenimientos; el análisis cuantitativo se lo realiza con cuatro factores: frecuencia de fallos, costos de fallos, severidad de fallos, detección de fallos. Por otro lado el análisis cualitativo analiza seis factores: seguridad, disponibilidad, medio ambiente, calidad, servicio prestado y mantenibilidad; el cual se realiza en sistemas o equipos que aún están en una etapa de construcción o aun no entran en funcionamiento como es el caso del sistema tranviario de la ciudad de Cuenca, los valores de cada factor se asignan en función de criterios como: El tipo de equipo, requerimientos de

mantenimiento y de las personas que asignan su juicio como expertos del sistema o equipo que se analiza. Tanto el análisis cuantitativo como el cualitativo permiten conocer a profundidad los requerimientos de mantenimiento de los diferentes equipos o sistemas, además esta metodología es válida para cualquier empresa indistintamente de su propósito; para ello únicamente tendría que aumentar, disminuir o modificar los factores que esta requiera utilizar para su jerarquización.

- Al aplicar el modelo AHP híbrido para la jerarquización de los sistemas del tranvía, se determinó que el sistema material rodante es el más crítico tanto en los análisis cuantitativo y cualitativo, sin embargo el resto de sistemas varían su ranking de jerarquización tanto en el análisis cuantitativo como en el cualitativo; con ello se concluye que no siempre la jerarquización cualitativa y cuantitativa son iguales. (Los valores antes descritos están basados en criterios de los autores, los cuales fueron tomados de diferentes análisis de distintos estudios de los sistemas principales de un vehículo).
- Se desarrolló una aplicación computacional del modelo AHP híbrido, esta herramienta permite aplicar la jerarquización de los sistemas o equipos de una manera ágil y sencilla. Además se puede utilizar para la jerarquización de sistemas, máquinas o componentes en otras empresas que usen los mismos factores cualitativos y cuantitativos o basándose en este modelo pueden variar sus factores según sus necesidades. No existe un software comercial que pueda emplearse, porque la metodología del modelo AHP híbrido es propia.
- Mediante la aplicación del software AHP híbrido se realizó la jerarquización del sistema material rodante, se obtuvo los siguientes resultados: en el análisis cualitativo se estableció que el subsistema más crítico es el de alimentación (Figura 4.14) y en el análisis cuantitativo el subsistema más crítico es de frenado (Figura 4.14). Esta información debe servir para gestionar eficientemente los recursos de la unidad de mantenimiento, así como para planificar acciones y planes ante las reparaciones no programadas que se pudieran afrontar.

- Se comprobó que los resultados de la jerarquización analítica descrito en el capítulo III son iguales a los obtenidos mediante la aplicación del software para los sistemas principales del Tranvía de los cuatro ríos tanto con el análisis cuantitativo (Tabla 4.1 y Figura 4.15) como en el análisis cualitativo (Tabla 4.2 y Figura 4.16).
- Finalmente, es relevante mencionar que al emplear un modelo de jerarquización de equipos; se mejoran significativamente los indicadores de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, por otro lado se facilita y optimiza el proceso de toma de decisiones, así se direccionan eficientemente los recursos (humanos, económicos y técnicos – operacionales), simplifica la gestión del “stock” de repuestos, insumos y consumibles que requiere la unidad de mantenimiento; los resultados además facilitan las decisiones para realizar la capacitación del personal, orientándolas a los sistemas más importantes de una empresa y/o si es el caso optimiza el proceso de tercerización de algunas tareas o servicios en la unidad de mantenimiento. A partir de este análisis se recomienda que este proceso se lo considere indispensable en todo plan de gestión y se lo llegue a implementar en el sistema Tranvía de los cuatro ríos; no obstante, esta metodología y sus beneficios se pueden aplicar a diferentes empresas e industrias.



**Recomendaciones:**

- El departamento de la unidad de mantenimiento deberá implementar políticas organizacionales enfocados a la gestión eficiente de los activos del departamento, con la aplicación de técnicas y metodologías que han sido validadas a través de estudios como son: Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales, mantenimiento y gestión de activos: Futuro de las empresas, la contribución de los sistemas de control de gestión para el éxito empresarial, metodología para auditar la asignación de recursos a las actividades críticas de mantenimiento, propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento, técnicas de ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicadas en el proceso de gestión de activos y finalmente se puede aplicar la metodología de jerarquización descrito en el documento.
- Actualizar periódicamente la jerarquización de los equipos y sistemas; de esta manera reestructurar adecuadamente el plan de mantenimiento de todo el sistema tranviario según sus necesidades y requerimientos.
- Implementar la jerarquización en todos los departamentos de la empresa, de esta manera lograr una mejor organización y planificación en cada departamento.
- Paralelamente se debería implementar un sistema de gestión de calidad, para evitar fallos o inconvenientes en el servicio prestado y de esta manera satisfacer las necesidades de la población.

## **TRABAJO A FUTURO**

Luego de haber determinado la metodología de jerarquización para los sistemas y equipos del sistema tranviario; se contará con información que facilite el modelo de gestión de mantenimiento, el cual deberá atender las necesidades inherentes al mantenimiento de los sistemas que componen el tranvía. Por ello es necesario realizar trabajos a futuro que ayudarán considerablemente al equipo de mantenimiento, organización y planificación en general en todas las áreas de trabajo.

A continuación se describe algunos criterios de estudio a futuro más relevantes:

1. Análisis de las consecuencias que podría generar un fallo en distintos factores (seguridad, medio ambiente, mantenibilidad, servicio prestado, mantenibilidad, etc.)
2. Analizar cuantitativamente la jerarquización de los sistemas y equipos luego de seis meses que el tranvía de los cuatro ríos entre en funcionamiento y se tenga un historial de fallos, consecuencias que estos generen, costos y mantenimientos realizados.
3. Determinar cualitativamente la jerarquización de los sistemas y equipos del tranvía luego de un año de haber funcionado y establecer las diferencias con la jerarquización cualitativa.
4. Adaptar el modelo de jerarquización AHP híbrido a otra empresa que desee jerarquizar sus sistemas o equipos, indistintamente a que se dedique.
5. Jerarquizar los equipos principales de cada sistema del tranvía en función de las variables de funcionamiento de cada equipo, que más afecten a los fallos que experimentan, como pueden ser: temperatura, mecanismos de desgaste, voltaje, humedad, daños producidos por el ambiente, etc.
6. Realizar un análisis de jerarquización de los componentes del equipo o sistema que más fallos tenga en un año, en función de sus variables de funcionamiento y de construcción: voltajes temperaturas, materiales.

## BIBLIOGRAFÍA

- AITECO. (2013). AITECO. Obtenido de AITECO: <http://www.aiteco.com/diagrama-de-matriz/>
- Arata, A. A. (2009). Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales: aplicación de la plataforma R-MES. Chile: RIL editores. Recuperado el 11 de Octubre de 2015, de <http://www.ebrary.com>
- Borboa, S. A. (Marzo de 2010). DESARROLLO DE UNA MATRIZ DE EVALUACIÓN DE RIESGOS. Universidad De Oriente. Recuperado el 14 de Febrero de 2016, de <http://ri.bib.udo.edu.ve>: <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/1051/1/Tesis.DESARROLLO%20DE%20UNA%20MATRIZ%20DE%20EVALUACION%20DE%20RIESGOS%20OPERACIONALES.pdf>
- CESGIR. (16 de Mayo de 2015). Mantenimiento y gestión de activos: Futuro de las empresas. Mantenimiento y gestión de activos: Futuro de las empresas. Obtenido de <http://search.proquest.com/docview/1681082227?accountid=36552>
- Delicado, T. N. (2015). La contribución de los sistemas de control de gestión para el éxito empresarial. Cuadernos De Contabilidad, 15(39), 853-881. doi:10.11144
- GAD Municipal de Cuenca. (30 de Julio de 2013). Contratos de construcción del travía de los cuatro ríos de Cuenca. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Hourné, M., Brito, M., Castillo, A., Frag, E., & Díaz, A. (2012). Análisis de criticidad de grupos electrógenos. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 21(3), 55-61. Obtenido de <http://web.b.ebscohost.com/>
- Joseba Esteban López, J. J. (2006). Estudio de los métodos de estimación: AHP y redes Bayesianas. Universidad del país Vasco U.P.V/ E.H.U. Obtenido de <http://www.sc.ehu.es/jiwdocoj/remis/docs/adis-07-esteban-estimar.pdf>
- López, M., Viveros, P., Crespo, A., Kristjanpoller, F., & Raul, S. (2014). Metodología para auditar la asignación de recursos a las actividades críticas de mantenimiento. DYNA - Ingeniería E Industria, 89(1), 89-97. doi:10.6036/5819
- Macura, D., Bošković, B., Bojović, N., & Milenković, M. (Octubre de 2011). A Model for Prioritization of Rail Infrastructure Projects. ResearchGate. Recuperado el 2 de Febrero de 2016, de <http://www.researchgate.net/publication/235993969>
- Moreno, J. (2015). El proceso analítico jerárquico. Fundamentos, metodología y aplicaciones. Recuperado el 2016, de [http://www.uv.es/asepuma/recta/extraordinarios/Vol\\_01/02t.pdf](http://www.uv.es/asepuma/recta/extraordinarios/Vol_01/02t.pdf)
- Ochoa, K. (23 de Diciembre de 2015). Metro Ecuador. Obtenido de Metro Ecuador: <http://www.metroecuador.com.ec/noticias/en-un-mes-iniciara-la-colocacion-de-las-rieles-del-tranvia-de-cuenca/AzUoap---c5iq9sTd6jois/>

- Parra, M. C., & Crespo, M. A. (Septiembre de 2012). Técnicas de Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicadas en el proceso de Gestión de Activos. Asesoría Integral en Ingeniería de Confiabilidad, V. Obtenido de <http://www.mantenimientomundial.com/>
- Roche, H., & Vego, C. (2005). Analisis multicriterio de toma de decisiones. Uruguay: Facultad de Ciencias Económicas y de Administración Universidad republica de Uruguay. Recuperado el 15 de Febrero de 2016, de <http://www.ccee.edu.uy/ensenian/catmetad/material/MdA-Scoring-AHP.pdf>
- Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, 26(7). Obtenido de <http://yunus.hacettepe.edu.tr/~aulucan/pdf/Marketing.pdf>
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, 48, 9-26. Obtenido de [http://sci-hub.io/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](http://sci-hub.io/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Toskano, G. (2010). Proceso de análisis jerárquico (AHP). Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Recuperado el 15 de Enero de 2016, de [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano\\_hg/cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano_hg/cap3.pdf)
- Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento. Revista chilena de ingeniería, 125-138. Obtenido de <http://www.scielo.cl>

## **ANEXOS**

### **Anexo 1: Software modelo AHP “híbrido”**