

**MODELO DE MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA CON DETERIORO Y
REPARACIONES LIMITADAS PARA LA DIVISION DE MANTENIMIENTO
TECNOLOGICO DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER CON
BASE EN CADENAS DE MARKOV**

**RAFAEL EUGENIO GUTIÉRREZ MENESES
DAVID EDUARDO RINCÓN HINESTROZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2011

**MODELO DE MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA CON DETERIORO Y
REPARACIONES LIMITADAS PARA LA DIVISION DE MANTENIMIENTO
TECNOLOGICO DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER CON
BASE EN CADENAS DE MARKOV**

**RAFAEL EUGENIO GUTIÉRREZ MENESES
DAVID EDUARDO RINCÓN HINESTROZA**

**Proyecto de Grado para optar el
Título de Ingeniero Industrial**

Director

CARLOS EDUARDO DÍAZ BOHÓRQUEZ

Ingeniero Industrial

Codirectora

ING. LEYDA GÓMEZ BAYONA

Especialista Gerencia de Mantenimiento

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2011

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos los instrumentos y las herramientas para poder llegar a donde hoy día hemos logrado estar.

Agradecemos de manera muy especial al Ingeniero José Alejandro Amaya Palacio, a la Ingeniera Leyda Gómez Bayona y al Ingeniero Carlos Eduardo Díaz Bohórquez, quienes dirigieron este trabajo de grado, por su incondicional colaboración y el apoyo en todo lo que estuvo a al alcance. Por ayudarnos en el enriquecimiento continuo de nuestro aprendizaje, mediante sus valiosos conocimientos y experiencias, contribuyendo con nuestro proceso de formación tanto integral como intelectual, para nuestro futuro desarrollo profesional.

A todas las personas de la División de Mantenimiento Tecnológico en los diferentes campos, que de una u otra forma facilitaron los trámites y las acciones para la realización de este proyecto.

DEDICATORIA

A Dios que me acompaña en cada instante de mi vida, y me guía por el camino del éxito, que me da las fuerzas para siempre buscar mis sueños.

A mis papas y a mis abuelos, que incondicionalmente me han acompañado durante todo mi proceso académico y han sido un apoyo importante en mi vida.

Y a mis compañeros, amigos y maestros que me acompañaron durante los cinco años de universidad.

David Eduardo Rincón Hinestroza

Doy gracias a Dios por permitirme hacer realidad este sueño de alcanzar una etapa más en mi vida.

A mi Madre que siempre creyó en mí y con su dedicación y esfuerzo logró que este sueño se hiciera realidad,

A mis amigos muchas gracias por estar ahí en todo momento.

Rafael Eugenio Gutiérrez Meneses.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
1. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS	19
2. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO	21
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
2.2 JUSTIFICACIÓN.....	22
2.3 OBJETIVOS	23
2.3.1 Objetivo General.....	23
2.3.2 Objetivos Específicos.....	23
2.4 ALCANCE	24
2.5 VIABILIDAD	25
2.6 LIMITACIONES.....	25
3. MARCO DE REFERENCIA	26
3.1 MARCO CONTEXTUAL.....	26
3.1.1 Universidad Industrial de Santander	26
3.1.1.1 Misión	27
3.1.1.2 Visión.....	27
3.1.2 División de Mantenimiento Tecnológico (DMT)	29
3.1.2.1 Misión	29
3.1.2.2 Visión.....	30
3.1.2.3 Portafolio de Servicios	31
3.2 MARCO TEÓRICO	34
3.2.1 Mantenimiento	34
3.2.1.1 Modelos de Mantenimiento	34
3.2.1.2. Costos de Mantenimiento	44
3.2.1.3 Procesos Estocásticos	45
4. IDENTIFICACIÓN DE LA CLASE DE EQUIPO QUE REPRESENTA MAYOR COSTO PARA LA DIVISIÓN DE MANTENIMIENTO TECNOLÓGICO	52

5. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS MODOS DE FALLA Y LOS NIVELES DE DETERIORO	56
5.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO	56
5.1.1 Aire acondicionado tipo CENTRAL	56
5.1.2 Aire acondicionado tipo CHILLER.....	57
5.1.3 Aire acondicionado tipo MINI-SPLIT	57
5.1.4 Aire acondicionado tipo VENTANA	58
5.2 CARACTERIZACIÓN DEL AIRE ACONDICIONADO TIPO MINI-SPLIT	62
5.3 COMPONENTES DEL AIRE ACONDICIONADO TIPO MINI-SPLIT	67
6 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL MODELO Y METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE PROBABILIDADES	73
6.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE	73
6.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI.....	77
6.3 CAPACITACIONES	81
6.4 PROBABILIDADES DE LA MATRIZ DE TRANSICIÓN.....	83
6.5 SIMBOLOGÍA	83
7. DEFINICIÓN Y METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS DEL MODELO DE MANTENIMIENTO	89
7.1 DEFINICIONES	89
7.2 PARÁMETROS.....	91
7.3 SIMBOLOGÍA	92
7.4 MODELO Y FUNCIONES DE COSTO	93
7.4.1 Costo de esperar.	95
7.4.2 Costo de reparar.....	97
7.4.3 Costo de reemplazar.....	100
7.5 BENCHMARKING PARA EL MANTENIMIENTO DE AIRES ACONDICIONADOS TIPO MINI-SPLIT	102
7.6 EXPLICACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL COSTO DE FUNCIONAMIENTO..	103
8. DEFINICIÓN DE LA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO	105

8.1 ITERACIÓN DE PROBABILIDADES Y COSTOS EN EL SOFTWARE WINQSB.....	105
8.2 RESULTADOS DE LA ITERACIÓN EN EL SOFTWARE WINQSB.....	107
8.3 INSPECCIONES PARA LA CLASE DE EQUIPO.....	110
8.3.1 Inspecciones e intervenciones programadas	110
9. INDICADORES DE SEGUIMIENTO PARA LA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO	112
9.1 INDICADORES.....	113
9.2 DEFINICIÓN DE LOS COMPONENTES DEL FORMATO DE INDICADORES.....	114
10. CONCLUSIONES.....	118
11. RECOMENDACIONES.....	120
12. BIBLIOGRAFÍA.....	122

Lista de Figuras

Figura 1. Comparación de costos para mantenimiento preventivo y correctivo.	36
Figura 2. Costo mensual de operación de un activo.	48
Figura 3. Política de mantenimiento y reemplazo óptimo.	49
Figura 4. Presentación del programa MANTHER 1.0 para el caso de mantenimiento correctivo.	51
Figura 5. Esquema del plan de trabajo anual de mantenimiento preventivo 2010.	60
Figura 6. Unidad interior del aire acondicionado.	63
Figura 7. Unidad exterior del aire acondicionado.	64
Figura 8. Cableado interconector del aire acondicionado.	64
Figura 9. Solicitudes de mantenimiento reparativo para los equipos de aire acondicionado del SIMAT.	74
Figura 10. Porcentaje de información encontrada según tipo de registro de la DMT.	76
Figura 11. Respuestas a la pregunta 1 de la encuesta preliminar.	78
Figura 12. Respuestas a la pregunta 2 de la encuesta preliminar.	79
Figura 13. Distribuciones de probabilidad de falla con respecto a su vida útil. ...	80
Figura 14. Respuestas a la pregunta 3 de la encuesta preliminar.	80
Figura 15. Representación de las situaciones para la matriz de probabilidad de transición.	83
Figura 16. Comportamiento de la distribución de probabilidad para todos los niveles de deterioro.	87
Figura 17. Estructura de costos para el modelo de decisión de mantenimiento.	95
Figura 18. Comportamiento según las ecuaciones (1a), (2b), (3c) y (4d).	103
Figura 19. Variación de los costos para las políticas propuestas.	108
Figura 20. Política de mantenimiento (8,11).	109
Figura 21. Formato de indicadores.	117

Lista de Fotos

Foto 1. Entrada Universidad Industrial de Santander.....	26
Foto 2. Talleres División de Mantenimiento Tecnológico	29
Foto 3. Aire Tipo Central, DMT.	56
Foto 4. Aire tipo central, Biblioteca central UIS.	56
Foto 5. Aire Tipo Chiller, FAVUIS.	57
Foto 6. Aire Tipo Chiller, Ingeniería de Sistemas.	57
Foto 7. Aire Tipo Mini-Split, Escuela de Ingeniería de Petróleos.....	58
Foto 8. Aire Tipo Ventana, Escuela de Ingeniería Química.....	58

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Cumplimiento de objetivos.	19
Tabla 2. Solicitudes y costos de mantenimiento para el periodo 2007 a primer semestre 2010.	52
Tabla 3. Proporción de servicios y costos de mantenimiento respecto a sus totales.	54
Tabla 4. Fallas comunes para los tipos de aires acondicionados analizados. ...	66
Tabla 5. Componentes del aire acondicionado.	67
Tabla 6. Niveles de deterioro para los aires acondicionados.	68
Tabla 7. Total de parejas para la combinación de niveles de deterioro y cantidad de reparaciones.	71
Tabla 8. Tamaño abreviado de la matriz de probabilidad para los niveles de deterioro y número de reparaciones establecidos.	72
Tabla 9. Definición de la nomenclatura utilizada. (Parte A).	84
Tabla 10. Matriz de probabilidad abreviada con los estados que presentan posibilidad de ocurrencia.	85
Tabla 11. Comportamiento según nivel de deterioro y número de reparaciones entre inspecciones.	85
Tabla 12. Definición de la nomenclatura utilizada. (Parte B).	92
Tabla 13. Variación y comparación de la política de costos.	106
Tabla 14. Valores de los costos para las políticas propuestas.	108

Lista de Anexos

ANEXO 1. Costos de los mantenimientos preventivos y correctivos para el periodo 2007 a primer semestre de 2010 y Análisis Pareto de los costos.

ANEXO 2. Formato de encuesta para la determinación de los tipos de falla en los equipos de aire acondicionado.

ANEXO 3. Formatos

- FRT.03, Control de reparaciones de equipos no reportados en el SIMAT.
- FRT.08, Hoja de vida de equipos para control de mantenimiento/calibración.
- FRT.11, Informe técnico de mantenimiento.

ANEXO 4. Formato de encuesta preliminar para la determinación de las probabilidades de los tipos de falla más frecuente en los equipos de aire acondicionado.

ANEXO 5. Ejercicio práctico para la evaluación de la capacitación y registro de las capacitaciones realizadas.

ANEXO 6. Actas de asistencia y orden del día de las capacitaciones.

ANEXO 7. Capacitaciones realizadas al personal técnico de la DMT.

ANEXO 8. Formato del ejercicio práctico realizado con los técnicos de refrigeración.

ANEXO 9. Distribución de probabilidad para cada nivel de deterioro.

ANEXO 10. Matriz de probabilidades para el modelo de mantenimiento desarrollado en Excel.

ANEXO 11. Tabla de costos para el modelo de mantenimiento y cotizaciones.

ANEXO 12. Registro de las probabilidades de la cadena de Markov y probabilidades de estado estable en el programa WINQSB.

ANEXO 13. Grafica de la variación de la política de mantenimiento.

ANEXO 14. Indicadores de desempeño.

RESUMEN

TITULO: MODELO DE MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA CON DETERIORO Y REPARACIONES LIMITADAS PARA LA DIVISION DE MANTENIMIENTO TECNOLOGICO DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER CON BASE EN CADENAS DE MARKOV. ¹

AUTOR: RAFAEL EUGENIO GUTIÉRREZ MENESES, DAVID EDUARDO RINCÓN HINESTROZA. ²

PALABRAS CLAVES: Modelos de mantenimiento, Modelo de costos, Sistema con deterioro, Reparaciones limitadas, Cadenas de Markov.

DESCRIPCION:

El presente proyecto de grado muestra el diseño de una política de mantenimiento para una clase de equipo con un número limitado de reparaciones y un nivel de deterioro establecido. El desarrollo de este proyecto contó con el apoyo de la DMT (División de Mantenimiento Tecnológico) de la Universidad Industrial de Santander.

Primero se establecen las generalidades del proyecto, y se justifica su realización. Posteriormente establece el marco de referencia del proyecto (marco contextual y marco teórico). En tercera instancia se encuentra la clasificación de los equipos a los cuales se les realiza mantenimiento, con el fin de establecer la clase de equipo que mayor importancia tiene en cuanto a su costo de mantenimiento tanto preventivo como correctivo.

También se realiza la caracterización de la clase de equipo a estudiar, la cual se llevo a cabo mediante la investigación en manuales de operación y fichas técnicas del equipo. Se definen las condiciones de operación y la metodología para la obtención de las probabilidades de transición del modelo. Posteriormente se define la metodología para la obtención de los costos del modelo de mantenimiento.

Adicionalmente se define la política de mantenimiento por medio de las probabilidades en la matriz de transición de la cadena de Markov y los costos para la decisión de reparar, reemplazar o dejar funcionando el equipo. Finalmente se plantean los indicadores que permiten evaluar la eficiencia de la política de mantenimiento para el equipo objeto de estudio.

¹ Proyecto de grado.

² Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director Ing. Carlos Eduardo Díaz B. Codirectora Ing. Leyda Gómez Bayona.

ABSTRACT

TITLE: MODEL OF MAINTENANCE FOR A SYSTEM WITH DETERIORATION AND LIMITED REPAIRS FOR THE DIVISION OF TECHNOLOGICAL MAINTENANCE OF THE "UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER" BASED ON MARKOV'S CHAINS.

AUTHOR: RAFAEL EUGENIO GUTIÉRREZ MENESES, DAVID EDUARDO RINCÓN HINESTROZA.³

KEY WORDS: Maintenance Models, Model of Costs, System with deterioration, Limited Repairs, Markov's Chains.

DESCRIPTION:

This degree project shows the design of maintenance politic for a type of equipment that has a limited numbers of repairs and an established level of deterioration. The progress of this project counted with the support of the TMD (Technological Maintenance Division) of the "Universidad Industrial de Santander".

First, there are defined the generalities of the project and its accomplishment is justified. Next, there is established the reference frame of the project (contextual and theoretical). In the third step there is a classification of the equipments which are going to be involved during the maintenance. This classification is made in order to define the type of equipment that has more relevance according to its costs of maintenance, both preventive and corrective.

Too there is a characterization of the type of equipment that is going to be studied. This characterization was done based on a research of operation manuals and specification sheets of the equipment. Next, there are defined the conditions of operation and the methodology in order to obtain the probabilities of transition for the equipment. Subsequent, there are defined the method used to obtain the costs of the maintenance model.

Additionally, there is the definition of the maintenance politic according to the probabilities of the matrix of Markov's Chain and the costs of repairing, replacing, or keeping the equipment working. Finally, the last chapter explains the indicators that allow the evaluation of the maintenance politic and its efficiency for the equipment that was chosen as the study object.

³ Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director Ing. Carlos Eduardo Díaz B. Codirectora Ing. Leyda Gómez Bayona.

INTRODUCCIÓN

Este proyecto considera las estrategias de sustitución y reparación de una clase de equipo que se deteriora estocásticamente y que puede ser reparado un número limitado de veces antes de ser reemplazado.

Para analizar las estrategias de sustitución y reparación es necesario considerar que el estado del equipo en deterioro evoluciona como una cadena de Markov en un espacio de estados finitos, cuya probabilidad de transición de la matriz está influenciada por cada reparación, con la que el sistema se vuelve más susceptible al deterioro conforme el número acumulado de reparaciones aumenta.

La formulación de una política de mantenimiento que minimice los costos de mantenimiento y garantice el funcionamiento de la clase de equipo objeto de estudio, se realizó con el objetivo de brindar una herramienta que permita controlar y administrar eficientemente los recursos de la División de Mantenimiento Tecnológico. De la misma manera, se establecieron los indicadores de desempeño que permiten al responsable de llevar a cabo la aplicación de la política de mantenimiento verificar la eficacia del modelo desarrollado.

Indagar en el mantenimiento de equipos desde la perspectiva de los procesos estocásticos fue un interés académico. En el ámbito profesional, como Ingenieros Industriales, el interés se basó en conocer el contexto administrativo y de gestión, como variables fundamentales de las actividades que realiza la División de Mantenimiento Tecnológico dentro de la Universidad Industrial de Santander.

1. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

Con el fin de mostrar el cumplimiento de los objetivos planteados para el desarrollo de este proyecto, se realizó el diseño de la siguiente tabla, la cual facilita identificar la ubicación dentro del libro, mostrando así el objetivo y la forma como este se cumplió.

Tabla 1. Cumplimiento de objetivos.

OBJETIVO GENERAL	CUMPLIMIENTO
Definir el modelo de mantenimiento, para la evaluación de las decisiones con respecto a la inspección, reparación y reemplazo, en relación con el plan de mantenimiento de la DMT con el objetivo de minimizar costos y mejorar las condiciones de operatividad, mejorar el rendimiento y aumentar el periodo de vida útil para una clase de equipo, para la DMT en la Universidad Industrial de Santander con base en Cadenas de Markov.	El cumplimiento de este objetivo se evidencia mediante el cumplimiento de los objetivos específicos
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	CUMPLIMIENTO
Identificar la clase de equipo que representa el mayor costo para la División de Mantenimiento Tecnológico de la Universidad Industrial de Santander.	La evidencia del cumplimiento de este objetivo se encuentra en el capítulo 3.
Analizar la información relacionada con los modos de falla y niveles de deterioro, proveniente de manuales y fichas técnicas de la clase de equipo que representa mayor costo para la División de Mantenimiento Tecnológico de la Universidad Industrial de Santander, buscando de esta	La descripción del cumplimiento de este objetivo se puede evidenciar en el capítulo 4.

manera definir las bases para la construcción del modelo.	
Definir las condiciones de operación en cuanto a Cadenas de Markov, del sistema que corresponde a la clase de equipo seleccionado.	La descripción del cumplimiento de este objetivo se puede evidenciar en el capítulo 5.
Definir un modelo de costos para el mantenimiento de los equipos.	La descripción del cumplimiento de este objetivo se puede evidenciar en el capítulo 6.
Definir la política de mantenimiento a partir de los resultados del modelo, que apoye la política general de la División de Mantenimiento Tecnológico.	La descripción del cumplimiento de este objetivo se puede evidenciar en el capítulo 7.
Establecer un sistema de indicadores que permita valorar el modelo de mantenimiento.	La descripción del cumplimiento de este objetivo se puede evidenciar en el capítulo 8.

Fuente: Autores del proyecto.

2. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La División de Mantenimiento Tecnológico (DMT) es la encargada de gestionar la reconstrucción, reparación y conservación adecuada de los equipos y maquinaria de las unidades académico administrativas, laboratorios y demás dependencias de la Universidad. Igualmente es la encargada de recibir, instalar y controlar el uso de los equipos y conceptuar técnicamente sobre nuevas adquisiciones

La DMT tiene asignado un presupuesto anual para llevar a cabo el mantenimiento preventivo, correctivo y las calibraciones de los equipos de infraestructura tanto de la sede central de la universidad como de las demás sedes que la conforman.

Para la ejecución del presupuesto asignado y por tanto de las funciones de la división se cuenta con personal técnico de la universidad, así como con personal por orden de prestación de servicios, utilizado en la mayoría de casos para el mantenimiento de equipos especializados. Cabe resaltar que las funciones de la división de mantenimiento tecnológico son programadas anualmente por el jefe de la división, el cual se formula con base en la experiencia adquirida en las labores de su cargo y del comportamiento que tuvo el mantenimiento y la calibración el año anterior, situación que no permite una programación proactiva de mantenimiento y ha conllevado a que el mantenimiento correctivo que se realiza sea mucho mayor que el mantenimiento preventivo programado anualmente (el mantenimiento correctivo para el año 2009 fue del 72,12% y el mantenimiento preventivo fue de 24.88%), lo cual significa un mayor costo operacional y una disminución del tiempo de operación y vida útil de los equipos.

2.2 JUSTIFICACIÓN

Para el normal desarrollo de las actividades misionales de la Universidad Industrial de Santander se hace uso de equipos como computadores, impresoras, microscopios, balanzas, centrifugas, UPS y hornos, entre otros equipos, necesarios para la formación de profesionales íntegros y competitivos que el país necesita, para la realización de los proyectos de investigación y extensión, y las actividades administrativas propias de la universidad.

Los conocimientos que son adquiridos a diario en el normal desarrollo de las actividades de docencia, investigación y extensión de la universidad, han sido la base para generar progreso y desarrollo no solo en el departamento sino en el país, dejando en alto el nombre de la UIS.

Sin embargo para el logro de estos objetivos se requiere el compromiso de la universidad, garantizando el funcionamiento de los equipos que son utilizados en el desarrollo de las actividades, y que forman parte de la infraestructura de la UIS. Para el normal funcionamiento de los equipos es necesario contar con actividades de mantenimiento y/o calibración de estos, las cuales son realizadas por la DMT por medio de la ejecución de recursos del presupuesto anual de la División, pero en los últimos años este presupuesto se ha ido incrementando debido al aumento en el número de solicitudes, el incremento del número de equipos y la complejidad de los mismos por parte de las Unidades Académico Administrativas, lo cual dificulta la administración eficiente de los recursos asignados.

Teniendo en cuenta lo anterior, surge la necesidad de crear un modelo de mantenimiento basado en la minimización de costos, por medio del cual se garantice la prestación del servicio de los equipos, y se mejoren las actividades de reemplazo, reparación, permanencia e inspección de los equipos, siendo

este modelo una herramienta de apoyo para la toma de decisiones para el personal encargado del cumplimiento del plan de mantenimiento y de la ejecución del presupuesto asignado por la universidad.

2.3 OBJETIVOS

2.3.1 Objetivo General

Definir el modelo de mantenimiento, para la evaluación de las decisiones con respecto a la inspección, reparación y reemplazo, en relación con el plan de mantenimiento de la DMT con el objetivo de minimizar costos y mejorar las condiciones de operatividad, mejorar el rendimiento y aumentar el periodo de vida útil para una clase de equipo, para la DMT en la Universidad Industrial de Santander con base en Cadenas de Markov.

2.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar la clase de equipo que representa el mayor costo para la División de Mantenimiento Tecnológico de la Universidad Industrial de Santander.
- Analizar la información relacionada con los modos de falla y niveles de deterioro, proveniente de manuales y fichas técnicas de la clase de equipo que representa mayor costo para la División de Mantenimiento Tecnológico de la Universidad Industrial de Santander, buscando de esta manera definir las bases para la construcción del modelo.
- Definir las condiciones de operación en cuanto a Cadenas de Markov, del sistema que corresponde a la clase de equipo seleccionado.
- Definir un modelo de costos para el mantenimiento de los equipos.
- Definir el plan de mantenimiento a partir de los resultados del modelo, que apoye la política general de la División de Mantenimiento Tecnológico.

- Establecer un sistema de indicadores que permita valorar el modelo de mantenimiento.

2.4 ALCANCE

El desarrollo de este proyecto de grado busca definir un modelo matemático óptimo el cual analiza dos restricciones, la variación del costo de funcionamiento a lo largo del tiempo asociado al nivel de deterioro, y el comportamiento de los equipos dependiendo del tipo de intervención que se le realice. Para esto se tiene en cuenta el nivel de deterioro de la clase de equipo, el número de reparaciones, los costos asociados de mantenimiento y el tiempo entre inspecciones. Siendo cada inspección la revisión llevada a cabo por los técnicos encargados de la DMT para establecer el estado del equipo en ese momento, teniendo como base la inspección realizada se plantean las actividades de mantenimiento necesarias para el equipo que garantice el servicio al cliente al mínimo costo con un nivel de eficiencia adecuado en el servicio prestado.

Este proyecto se aplica a la clase de equipo que representa el mayor impacto financiero seleccionado después de realizar el diagnóstico inicial de los costos de mantenimiento preventivo y los costos de mantenimiento correctivo incurridos por los equipos de la Infraestructura de la UIS.

Los siguientes son los resultados o productos a entregar, del proyecto a realizar:

- Diagnóstico inicial de la asignación del costo de mantenimiento llevado a cabo por la DMT a los equipos de infraestructura de la universidad.
- Documentación de las condiciones de operación del sistema, e indicadores que permitan monitorear el plan de mantenimiento óptimo.

- Plan de mantenimiento y modelo óptimo de costos con base en Cadenas de Markov para la clase de equipo estudiado.

2.5 VIABILIDAD

- El interés, colaboración y apoyo de la DMT de la Universidad Industrial de Santander.
- El proceso de acreditación en la Norma ISO IEC 17025:2005 en el que se encuentran los laboratorios de: Centro de Investigación en Tecnología de alimentos CICTA, Cromatografía, Consultas Industriales y Difracción de Rayos-X de la Facultad de Ciencias. Los laboratorios de: Genética, Inmunología y Clínico de la Facultad de Salud y el Laboratorio de Biohidrometalurgia de la Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas.
- El interés y apoyo por parte del Sistema de Gestión de Calidad.
- El interés y apoyo por parte de la Dirección de Control Interno y Evaluación de Gestión.

2.6 LIMITACIONES

- La falta de información específica sobre las fallas y el costo de la reparación de éstas en periodos anteriores.
- La falta de una planeación adecuada para llevar a cabo el mantenimiento preventivo de los equipos de la infraestructura de la Universidad.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 MARCO CONTEXTUAL

3.1.1 Universidad Industrial de Santander

Foto 1. Entrada Universidad Industrial de Santander.



Fuente: Información General Universidad Industrial de Santander⁴.

La Universidad Industrial de Santander es un establecimiento de educación superior público y autónomo, financiado por el Estado. La Sede Central de la Universidad Industrial de Santander (UIS) se encuentra ubicada en la carrera 27 calle 9ª en un área de 337.000 m², donde se encuentran los edificios de las Facultades de Ingenierías, Ciencias y Humanidades, Bienestar Universitario, Vicerrectoría de Investigaciones, Biblioteca Central y Oficinas Administrativas. Además de auditorios, talleres, laboratorios, museos, canchas deportivas y zonas verdes.

El funcionamiento de la Universidad Industrial de Santander se lleva a cabo por una población compuesta por estudiantes, empleados, directivos, asesores, ejecutivos, docentes, profesionales, técnicos, administrativos, operativos y visitantes.⁵

⁴ Tomado de la pág. <https://www.uis.edu.co/webUIS/es/index.jsp>

⁵ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTADER. Historia. Bucaramanga [en línea]. Disponible en: [<https://www.uis.edu.co/webUIS/es/index.jsp>, link Historia]

3.1.1.1 Misión

La Universidad Industrial de Santander es una organización que tiene como propósito la formación de personas de alta calidad ética, política y profesional; la generación y adecuación de conocimientos; la conservación y reinterpretación de la cultura y la participación activa liderando procesos de cambio por el progreso y mejor calidad de vida de la comunidad.

Orientan su misión los principios democráticos, la reflexión crítica, el ejercicio libre de la cátedra, el trabajo interdisciplinario y la relación con el mundo externo.

Sustenta su trabajo en las cualidades humanas de las personas que la integran, en la capacidad laboral de sus empleados, en la excelencia académica de sus profesores y en el compromiso de la comunidad universitaria con los propósitos institucionales y la construcción de una cultura de vida.⁶

3.1.1.2 Visión

Como visión general en el año 2018, la Universidad Industrial de Santander se habrá fortalecido en su carácter público, aportando al desarrollo político, cultural, social y económico del país, como resultado de un proceso de generación y adecuación de conocimiento en el cual la investigación constituye el eje articulador de sus funciones misionales.

La Universidad habrá desarrollado exitosamente una política de crecimiento vertical, mediante la cual se crearán y consolidarán programas de maestría y doctorado de alta calidad, sustentados en procesos de investigación pertinente para la región y el país.

⁶ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTADER. Misión. Bucaramanga [en línea]. Disponible en: [<https://www.uis.edu.co/webUIS/es/index.jsp>, link Principios]

La Institución habrá contribuido al desarrollo regional, mediante la formación del talento humano, la investigación y la extensión, reflejado en el mejoramiento de la calidad de vida, la competitividad internacional y el crecimiento económico. Como parte de este proceso, se ampliará la cobertura con la creación y consolidación de programas misionales pertinentes y soportes estratégicos en su sede central y en sus sedes regionales tanto a nivel profesional como a nivel tecnológico, atendiendo a la política de formación por ciclos aprobada por el Consejo Superior.

La Universidad habrá consolidado una política de articulación global que le ha permitido incrementar de manera significativa los resultados de sus procesos misionales mediante la cooperación con instituciones educativas y de investigación de alto prestigio, empresas, entidades gubernamentales, egresados y otros entes públicos y privados nacionales e internacionales.

La Universidad habrá fortalecido en toda su organización una cultura de gestión de alta calidad de los procesos misionales, estratégicos y de apoyo.

Como resultado de la actualización permanente de sus programas académicos, la Universidad forma personas con las competencias apropiadas para liderar el desarrollo económico y social y para realizar proyectos educativos e investigativos, que contribuyan al logro de las metas de desarrollo del país y a la consolidación de una sociedad del conocimiento a nivel regional, nacional e internacional.

La Institución habrá consolidado su estabilidad financiera y modernizado su infraestructura física y tecnológica.⁷

⁷ Ibíd.

3.1.2 División de Mantenimiento Tecnológico (DMT)

Foto 2. Talleres División de Mantenimiento Tecnológico



Fuente: Información General Universidad Industrial de Santander⁸.

División adscrita a la Vicerrectoría Administrativa encargada de gestionar la reconstrucción, reparación y conservación adecuada de los equipos y maquinaria de las unidades académico administrativas, laboratorios y demás dependencias de la Universidad. Igualmente es la encargada de recibir, instalar y controlar el uso de los equipos y conceptuar técnicamente sobre nuevas adquisiciones.⁹

La DMT cuenta con tres subprocesos desarrollados dentro de los talleres de la división para la prestación de servicios a la comunidad universitaria los cuales son:

- Mantenimiento Preventivo
- Mantenimiento Correctivo
- Metrología

3.1.2.1 Misión

La División de Mantenimiento Tecnológico de la Universidad Industrial de Santander tiene como propósito servir de apoyo a las Unidades Académicas y Administrativas de la Universidad en los procesos de adquisición de equipos, su

⁸ Tomado de la pág. <https://www.uis.edu.co/webUIS/es/index.jsp>

⁹ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTADER. División de Mantenimiento Tecnológico. Bucaramanga. Disponible en: [<https://www.uis.edu.co/webUIS/es/administracion/mantenimientoTecnologico/presentacion.jsp>]

instalación, operación y mantenimiento preventivo y correctivo, a fin de garantizar la continuidad en la prestación de los servicios, con la mayor calidad y eficiencia a toda la comunidad, y el cumplimiento de sus objetivos.

Para el logro de su Misión, la División de Mantenimiento Tecnológico pone a disposición de la comunidad universitaria todos sus recursos disponibles, humanos, técnicos y equipos, para que en concordancia con las políticas institucionales, y contando con el concurso de todas las dependencias, pueda desarrollar todos sus programas.

En la búsqueda permanente de la excelencia en la prestación de los servicios y por una apertura constante hacia la plena utilización de los recursos con que cuenta la Universidad, dispone para estudiantes, profesores y empleados, la información técnica relacionada con equipos y proveedores de servicios, manteniéndola cada día debidamente catalogada y clasificada.¹⁰

3.1.2.2 Visión

Nuestra Visión es ser una Unidad Administrativa participativa y líder en la calidad y excelencia en la gestión de servicios técnicos, con “Talento Humano con Espíritu de Servicio”, comprometido a alcanzar una posición de vanguardia en el logro de los objetivos institucionales. Pero, más que una visión de futuro, queremos convertir nuestro sueño en realidad: La imagen de la División de Mantenimiento Tecnológico, va a resurgir con el concurso de gente con un amplio sentido de pertenencia y con una explicación clara a nuestros clientes de que nuestros propósitos se identifican plenamente con los suyos.¹¹

¹⁰ Ibíd.

¹¹ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTADER. División de Mantenimiento Tecnológico. Bucaramanga. Disponible en: [
<https://www.uis.edu.co/webUIS/es/administracion/mantenimientoTecnologico/presentacion.jsp>]

3.1.2.3 Portafolio de Servicios

La DMT para responder a las necesidades de la institución cuenta con un portafolio de servicios establecido de la siguiente manera:

- **Electrónica**

Mantenimiento preventivo y correctivo de instrumental electrónico, equipo de cómputo, instrumental analítico, equipo audiovisual, equipo electro-médico, e instrumentos para control de procesos.

- **Electricidad**

Mantenimiento preventivo y correctivo de sistemas centrales de aire acondicionado Mini-Split, aires acondicionados de ventana, extractores de aire, equipos de calefacción, equipos de refrigeración, motores y ventiladores, centrífugas y ultra-centrífugas, y equipo eléctrico en general.

- **Óptica y Mecánica Fina**

Mantenimiento preventivo y correctivo de microscopios, equipos de artes gráficas, equipos de proyección, balanzas y maquinado de piezas pequeñas.

- **Mecánica Industrial**

Mantenimiento preventivo y correctivo de compresores de aire, calderas, equipos de cocina a gas, equipos de cocina a vapor, reconstrucción de mecanismos, maquinado de piezas para equipo electromecánico, autoclaves, elaboración de probetas para ensayos y equipo mecánico en general.

- **Telecomunicaciones**

Mantenimiento de la Central Telefónica Digital y subcentrales, mantenimiento de la red telefónica, Programación y asignación de extensiones internas, instalación de líneas directas y extensiones, servicio de correo de voz, programaciones especiales en extensiones internas y líneas externas.

- **Montaje de Equipos e Instalaciones**

Puestas a tierra, montaje de controles eléctricos y electrónicos, adecuación de servicios eléctricos y generales para montaje de equipos, diseño de

controles eléctricos, préstamo de herramienta pesada, recibo y entrega de equipos en reparación, almacenaje de equipos para baja.

- **Metrología**

Servicio de verificación y calibración de equipos para medición de Temperatura, se cuenta con Medidores Digitales de Temperatura y Termocuplas con certificado de calibración y personal Técnico Certificado para la realización de actividades en la variable Temperatura.

- **Metrología – Medición de Peso y Balanzas**

Servicio de Verificación y Calibración de Balanzas y Medidores de Peso. Se cuenta con juego de Pesas Certificado categoría E2 y Personal Técnico con pasantía certificada en el área de Masas y Balanzas.

Como apoyo para el cumplimiento de los servicios ofrecidos en su portafolio la DMT cuenta con el SIMAT, Sistema de Información proporcionado por la Universidad, para llevar a cabo la programación del mantenimiento preventivo de los equipos de infraestructura de la Universidad Industrial de Santander, y la distribución de los mantenimientos correctivos para los equipos que cuentan con un número de inventario.

Los equipos de infraestructura de la Universidad Industrial de Santander son aquellos que representan una mayor criticidad e impacto en caso de falla para la prestación del servicio en las Unidades Académico Administrativas (UAA) dentro de las que se encuentran. La criticidad es tomada como un indicador de la magnitud del problema basado en la evaluación del efecto que implicaría la falla del equipo en servicio, la velocidad de reparación de la falla y la frecuencia de ocurrencia de esta.

Teniendo en cuenta que el SIMAT debe almacenar toda la información referente a fallas, reparaciones, programación de mantenimiento y personal técnico encargado, entre otros, y que a su vez debe realizar un análisis de criticidad para los equipos de infraestructura de la Universidad, el SIMAT hace uso de

una herramienta de gestión que permite combinar el almacenamiento de datos y el registro de eventos y experiencias.

Para el caso de la DMT se utilizan los lineamientos establecidos en la Norma ISO 14224:2006¹², cuyos criterios son utilizados para las áreas de producción de petróleo y gas natural, se han extendido a otras actividades en industrias relacionadas con el mantenimiento.

Esta norma presenta los lineamientos para la especificación, recolección y aseguramiento de la calidad de los datos que permitan cuantificar y comparar los datos a través del tiempo, estructurando el análisis de la maquina en sus partes componentes y dividiéndola de mayor a menor jerarquía o grado de detalle:

- Clase: Esta definida por la función, es decir, razón por la cual un equipo existe dentro del proceso.
- Sistema: Es un conjunto que realiza una función dentro del proceso, pudiéndose identificar una entrada y una salida. Estos se pueden clasificar en tipos de equipo y aplicación.
- Subsistema: Son aquellos equipos que posibilitan que el sistema realice su función operativa.
- Componentes: Es la unidad final de la división, entendiéndose como tal las partes de los equipos sobre las cuales es necesario realizar acciones de mantenimiento.

Esta división es primordial ya que permite definir como se tratan los equipos y la información para una posterior interpretación de los resultados.

¹² Norma internacional ISO 14224:2006, Para el Petróleo, Petroquímica e Industria de Gas natural - Recogida e Intercambio de datos de fiabilidad y mantenimiento para el equipo.

3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 Mantenimiento

El Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED) en 1995, define al mantenimiento como: “El conjunto de acciones orientadas a conservar o restablecer un sistema y/o equipo a su estado normal de operación, para cumplir un servicio determinado en condiciones económicamente favorable y de acuerdo a las normas de protección integral.” Para Moubray¹³ (1997), el mantenimiento significaba “Acciones dirigidas a asegurar que todo elemento físico continúe desempeñando las funciones deseadas”. Por su parte Anzola¹⁴ (1992), lo describe como "Aquél que permite alcanzar una reducción de los costos totales y mejorar la efectividad de los equipos y sistemas”.

A partir de los criterios formulados por los autores citados, en relación al concepto de mantenimiento, se puede definir como el conjunto de actividades que se realizan a un sistema, equipo o componente para asegurar que continúe desempeñando las funciones deseadas dentro de un contexto operacional determinado. Su objetivo primordial es preservar el equipo y las buenas condiciones de operatividad; optimizar el rendimiento y aumentar el período de vida útil de los activos, procurando una inversión óptima de recursos.

3.2.1.1 Modelos de Mantenimiento

A continuación se describen los modelos de mantenimiento más usados actualmente a nivel mundial con el fin de establecer los lineamientos y parámetros básicos necesarios para la creación de un modelo de

¹³ Moubray, J. (1997, Febrero 01). Applying and Implementing Risk-based Inspection Programs. Maintenance & Reliability. Hydrocarbon Processing, p.43.

¹⁴ Anzola, F. and Pradhan, S. (1994, Febrero 28). Maintenance Strategies for Greater Availability. Maintenance & Retrofitting, p.39.

mantenimiento basado en la minimización de costos ajustado a las necesidades de la Universidad Industrial de Santander.

- **Mantenimiento Preventivo**

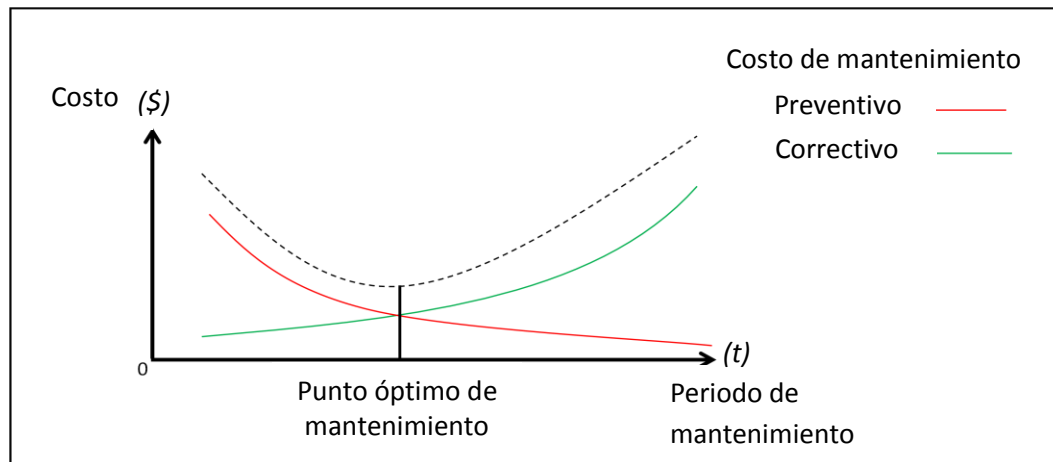
Es aquel que se lleva a cabo en periodos establecidos de tiempo, en operaciones de un componente determinado o criterios preestablecidos con el fin de reducir la posibilidad de falla en un equipo o instalación.

Los periodos de mantenimiento se programan teniendo en cuenta las necesidades del equipo, las recomendaciones del fabricante, así como el tipo, importancia y antecedentes de cada equipo en particular, sin importar el nivel de funcionamiento actual. En este tipo de mantenimiento se debe establecer de manera óptima buscando los periodos de mantenimiento que conlleven al equilibrio costo-beneficio.

En el momento de realizar el mantenimiento preventivo, según el Ingeniero Adolfo Arata Andreani¹⁵ se debe tener en cuenta el costo incurrido, ya que si el mantenimiento preventivo es nulo, las averías y por tanto el mantenimiento correctivo es máximo, a medida que aumenta el mantenimiento preventivo aumenta el costo del mismo y disminuye el costo del mantenimiento correctivo. Cuando la suma de estos (costo total de mantenimiento) es mínima se obtiene el mantenimiento preventivo óptimo. Ver Figura 1.

¹⁵ Arata Andreani, Adolfo, Ingeniería y Gestión de la Confiabilidad Operacional en Plantas Industriales, Primera Edición 2009, RIL Editores, Pág. 199.

Figura 1. Comparación de costos para mantenimiento preventivo y correctivo.



Fuente: Autores del proyecto.

De acuerdo con el concepto manejado en la Organización y Gestión Integral del Mantenimiento de Santiago García Garrido¹⁶, el mantenimiento preventivo presenta ventajas y desventajas las cuales se mencionan a continuación:

Ventajas del Mantenimiento Preventivo:

- Planificación y programación de los trabajos de forma racional
- Mayor calidad en las revisiones y reparaciones realizadas
- Reducción del número de averías, emergencias y siniestros
- Mejor organización y rentabilidad del personal encargado de las labores de mantenimiento.
- Mayor y mejor conocimiento, previsión y presupuestación de los gastos de mantenimiento.
- Aumento de la vida útil del equipo.

Desventajas del Mantenimiento Preventivo:

¹⁶ García Garrido, Santiago, Organización y gestión Integral del Mantenimiento, Editorial Díaz Santos, 2003, Pág. 99.

- Requiere de muchas revisiones en las cuales los equipos no han presentado falla aumentando los costos y disminuyendo el tiempo de operación de estas.
- Cuando se realiza mantenimiento preventivo se efectúan reparaciones y sustituciones de elementos que están en condiciones de seguir operando.
- Aumento el inventario de repuestos al no tener certeza sobre cuáles y cuantos serán necesarios para llevar a cabo el mantenimiento preventivo.
- No existen métodos rigurosos que determinen la periodicidad con que debe revisarse o repararse un equipo.

- **Mantenimiento Correctivo:**

También explicado por Santiago García Garrido¹⁷ como el mantenimiento que consiste en reparar una maquina o pieza averiada de un sistema o equipo. Dichas reparaciones son realizadas después de una falla, las cuales pueden presentarse de manera aleatoria o inesperada involucrando una cantidad indeterminada de tareas reparativas no programadas con el objetivo de reparar la función del equipo o pieza averiada.

Cuando se presentan fallas en el equipo y es necesario realizar reparaciones, se pueden presentar los siguientes escenarios:

- Reparación parcial o provisional: dada por la urgencia del uso de la maquina o pieza, la falta de presupuesto para realizar la reparación. Realizando reparaciones de baja calidad y poca fiabilidad.
- Reparación definitiva: sucede cuando se cuenta con el tiempo y los recursos necesarios para llevar a cabo la reparación.

El mantenimiento correctivo es causado por:

- Desperfectos no detectados durante las inspecciones preventivas.

¹⁷ Ibid.

- Errores operacionales.
- Ausencia de tareas de mantenimiento.

Desventajas del mantenimiento correctivo:

- Aumento del consumo de repuestos.
- Reducción de la vida útil de las piezas de la maquina.
- Aumento del número de piezas dañadas de una maquina.
- Las averías de los equipos pueden generar grandes perjuicios a la producción, al medio ambiente y/o a los operarios.
- Debido a que no permite planificar ni programar los trabajos, con frecuencia es necesario recurrir a turnos y jornadas extraordinarias para realizar trabajos de reparación.
- Los costos en los que se incurre en este tipo de mantenimiento son mayores que los generados cuando se realiza mantenimiento preventivo.

- **Mantenimiento Predictivo:**

Este tipo de mantenimiento es descrito por el Ingeniero Edwin Garavito¹⁸ como un mantenimiento planificado y programado fundamentado en el análisis técnico, programas de inspección y reparación de equipos, el cual se adelanta al suceso de fallas, al detectar las fallas potenciales cuando el sistema se encuentra en funcionamiento por medio de una medición periódica o continua de algún parámetro significativo, basado en la idea de que la mayoría de los componentes de una maquina avisan de alguna manera la falla antes de que ocurra. El objetivo de este mantenimiento es asegurar el correcto funcionamiento de los equipos en todo momento.

Las verificaciones periódicas o continuas permiten obtener los datos necesarios para poder dictaminar a la vista de estos el tipo de anomalía que se

¹⁸ Garavito H. Edwin Alberto, Mantenimiento y conservación industrial, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales – Ingeniería Industrial – UIS Diseño de Plantas. Pág. 4.

presenta y su alcance, y con esto diagnosticar sobre su normal o incorrecto servicio o funcionamiento con el fin de recomendar la acción a tomar.

Las exigencias del mantenimiento predictivo son:

- Es necesario realizar previo a su implementación un estudio del programa de inspecciones a efectuar.
- Requiere de inversiones de utilería e instrumentación para poder realizar los trabajos.
- El personal encargado del mismo debe contar con una formación adecuada.

Ventajas del mantenimiento predictivo:

- Reduce los costos de mano de obra y repuestos.
- Permite detectar averías que pudieran ser de gran magnitud, sin necesidad de parar la maquina y sin abrirla.
- Facilita preveer los repuestos que se van a utilizar en las reparaciones.
- Permite programar la parada para realizar la reparación.
- Permite contar con un completo historial del equipo y de su operación.
- Evita que se produzcan averías graves y costosas.
- Permite realizar seguimiento a la evolución del daño ya que el equipo es intervenido en el momento más adecuado.
- Requiere de poco personal para la ejecución de los programas de verificación en marcha de los equipos.

Desventajas del mantenimiento predictivo:

- La anomalía podría no detectarse en la verificación efectuada, ya sea porque no se percibió el síntoma o por producirse durante el periodo comprendido entre dos inspecciones.
- Siendo detectada la anomalía, podría no hacerse el diagnostico correcto o no se perciba la gravedad del mismo.

- Que no se permita por motivos de producción la reparación en el momento oportuno.

Actualmente con los avances tecnológicos se cuenta con sistemas de vibraciones mecánicas, análisis de aceite y análisis de termografía infrarrojo, los cuales hacen más fácil la detección de las fallas.

- **Mantenimiento Productivo Total (TPM):**

Es definido por Francisco Rey Sacristán¹⁹ como aquel mantenimiento que tiene como objeto conocer en cada momento la condición del equipo con el fin de predecir y evitar los fallos. Cuenta con el hecho de que el deterioro de los equipos se acelera por el funcionamiento excesivo de estos y la falta de cuidado primario, los cuales podrían ser evitados por el operario.

Las caídas importantes en la frecuencia de falla aumentan conforme se incrementa el cuidado del equipo o sistema, actuando como monitor de la condición de este, disminuyendo la duración de los periodos de tiempo de parada.

Dentro de este se usan las técnicas de monitorización para establecer la condición actual del equipo durante la operación identificando las señales de deterioro o de fallo inminente. Así mismo, éste tipo de mantenimiento intenta cubrir un problema mayor al propuesto por la filosofía JIT²⁰ al permitir la planificación del mantenimiento que implique desmontaje de los equipos,

¹⁹ Rey Sacristán, Francisco, TPM, Mantenimiento Total de la Producción, proceso de Implantación y Desarrollo, Editorial Fundación Confemetal 2001.

²⁰ JIT (Just In Time) Método Justo a Tiempo, Sistema de organización de la producción iniciado para las fabricas de origen japonés.

cuando los próximos KANBAN²¹ suceden de manera aleatoria. Este tipo de mantenimiento no tiene en cuenta costos ni ganancias.

Las tres características importantes del Mantenimiento Productivo Total (PTM) son:

1. La búsqueda de la eficiencia económica, asegurando que el mantenimiento preventivo realizado sea rentable.
2. Mejora de la programación del mantenimiento preventivo, enfocado en la mejora continua.
3. La autonomía de los operarios y grupos de trabajo en cada nivel para realizar el mantenimiento a los equipos.

El “Japan Institute of Plan Maintenance”, JIPM implementó en 1989 una nueva definición de TPM, estableciendo componentes estratégicos así:

- Crear una organización corporativa que maximice la eficacia de los sistemas de producción.
- Administrar las empresas como organizaciones que eviten todo tipo de pérdidas (cero accidentes, cero defectos y cero averías).
- Involucrar todos los departamentos de la empresa en la implementación del TPM.
- Orientar a la organización hacia las “cero-perdidas” por medio de actividades en pequeños grupos de trabajo.

• **Modelo de la terotecnología:**

La Terotecnología²² como término es la combinación de administración, finanzas, ingeniería y otros modelos de mantenimiento que tienen como fin de alcanzar el costo económico del ciclo de vida del equipo. La Terotecnología tiene como fin “El estudio y gestión de la vida de un activo, desde el comienzo

²¹ KANBA (KAN = Visual, BAN = Tarjeta), Subsistema del JIT que controla la información para la fabricación de productos.

²² TEROTECNOLOGÍA, resultante de la contracción de dos palabras griegas (Teros y Logos), es decir, la tecnología de conservación, definido en 1970 por el Instituto de Normas Británico.

hasta su propio final”. En otras palabras es el seguimiento de la vida de los recursos desde su adquisición hasta su destino final, incluyendo las formas de disponer del activo, desmantelarlo, reciclarlo entre otros. Tiene sus orígenes en la gestión de la calidad y la mejora continua pero se complementa con la retroalimentación de la información en varios puntos del ciclo de vida del equipo.

El objetivo principal de la Terotecnología es mantener y mejorar la efectividad técnica y económica de un equipo o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida. Combina la experiencia y el conocimiento técnico para lograr una visión integral del impacto del mantenimiento sobre la calidad de los elementos que constituyen un proceso de producción de mejora continua, tanto técnica como económica.

El beneficio de éste modelo se observa al reconocer las dependencias y conexiones que no son tratadas en los cálculos de la política de mantenimiento ni en la planificación del mismo. Algunos resultados de los beneficios se pueden observar en el mantenimiento de los equipos que afectan la calidad del producto y la entrega rápida que a su vez afectan el mercado, los márgenes de ganancias globales, los precios y la posibilidad de rediseñar el equipo o sistema para hacerlo más eficiente, consolidando así la ventaja comercial de una organización.

- **Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM)**

Según John Moubray²³ el RCM (Reability Centred Maintenance) es aquel mantenimiento en el que se determina lo que se debe hacer para asegurar que un equipo o sistema continúe cumpliendo con las funciones para las cuales fue diseñado en su contexto operacional actual. El RCM como modelo de

²³ Moubray John, Editorial Aladon Ltda., Edición en español 2004, Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.

mantenimiento se basa en la presunción de que la mayoría de los equipos operan confiablemente por un periodo de tiempo y luego se desgastan con una probabilidad condicional de falla con relación a la edad operacional para una variedad de elementos mecánicos y eléctricos.

Dentro de los logros que se obtienen al implementar el mantenimiento centrado en la confiabilidad están:

- Mayor seguridad e integridad ambiental.
- Mejor funcionamiento operacional (cantidad, calidad de producto y servicio al cliente).
- Mayor costo-beneficio del mantenimiento.
- Mayor vida útil de los componentes.

El RCM actúa con base a la fiabilidad y el mantenimiento aisladamente de los costos y ganancias por lo que es muy aplicado ya que reduce la cantidad de trabajo de rutina así como la carga de trabajo resultante en comparación con los métodos tradicionales de mantenimiento.

Inicialmente se desarrolló el RCM para ayudar a las aerolíneas a diseñar programas de mantenimiento para nuevos tipos de aeronaves, es decir, para nuevos activos físicos, en especial equipos complejos para los cuales no existían información histórica disponible, ahorrando de esta forma tiempo y dinero.

- **Análisis de Modos de Fallos y Efectos Críticos (FMECA)**

Es un método inductivo y cualitativo, utilizado para analizar la fiabilidad²⁴ de los sistemas y la criticidad de las fallas durante la vida útil del equipo definiendo los tipos de falla reales o potenciales, las causas posibles de las fallas, las

²⁴ Creus Sole, Antonio, Fiabilidad y Seguridad, Editorial Marcombo S.A. 2005, Segunda Edición, Pág. 303.

consecuencias sobre la producción y los medios para eliminar o evitar esas consecuencias.

El objetivo de este mantenimiento es identificar las causas iniciales y encontrar aquellas que no se han producido todavía, evaluando su criticidad, es decir, teniendo en cuenta la frecuencia de aparición de los fallos y su gravedad. La frecuencia de fallas se determina mediante datos estadísticos obteniendo así una mayor precisión para detallar las condiciones particulares del equipo facilitando el emprendimiento de las acciones preventivas y correctivas que se deben realizar.

3.2.1.2. Costos de Mantenimiento

Como afirma John Moubray²⁵ el mantenimiento como un elemento indispensable en la conformación de cualquier proceso productivo genera un costo que es reflejado directamente en el valor del producto o servicio, para lo cual el autor Duffuaa Raouf²⁶ propone la racionalización objetiva de los costos permitiendo ubicar a una empresa dentro de un marco competitivo. Los costos de mantenimiento tenidos en cuenta para la realización de este proyecto son los siguientes:

- **Mano de obra**

Es el personal contratado para realizar las diferentes actividades de mantenimiento preventivo, correctivo y de metrología. El cual debe ser el idóneo y competente para ejecutar correctamente las funciones y servicios de mantenimiento para los cuales son solicitados.

- **Costos indirectos**

Se refiere a los materiales fungibles requeridos para la intervención, los cuales son consumidos en la realización de las labores de mantenimiento. Y

²⁵ Moubray John, Edición en español 2004, Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, pág. 133-201.

²⁶ Raouf Dixon, Duffuaa, Sistemas de Mantenimiento Planeación y Control, Editorial Limusa S.A. 2009, Pág. 66, Pág. 295.

adicionalmente considera las actividades administrativas y/o de logística (como transporte), necesarias para la ejecución del mantenimiento.

- **Materiales**

Se refiere al equipo o parte del equipo que va a reemplazar el anterior debido a su falla u obsolescencia. Los materiales, repuestos y equipos tienen asociados un costo en el mantenimiento el cual varía de las políticas establecidos por la organización.

- **Costos de funcionamiento**

Se refiere al costo de mantener un equipo o sistema cumpliendo las funciones esperadas, en las condiciones de estado en las que se encuentre.

- **Costos de penalización por falla**

Hace referencia al tiempo de indisponibilidad operacional, dentro del cual se encuentra cualquier ingreso perdido por la ausencia de producción o prestación del servicio debido al paro del equipo.

3.2.1.3 Procesos Estocásticos

Un proceso estocástico es definido por Gerald Lieberman desde el punto de vista de investigación de operaciones,²⁷ como una colección indexada de variables aleatorias $\{X_t\}$, donde el índice t toma valores de un conjunto T dado. Con frecuencia T se toma como el conjunto de enteros no negativos y X_t representa una característica de interés measurable en el tiempo t . El interés de los procesos estocásticos es describir el comportamiento de un sistema en operación durante algunos periodos. Un proceso estocástico tiene la siguiente estructura.

El estado actual del sistema puede estar en una en una $M+1$ categorías mutuamente excluyentes llamados estados. Por conveniencia en la notación, estos estados se etiquetan $1, 2, \dots, M$. La variable aleatoria X_t representa el

²⁷ LIEBERMAN, Gerald J. Investigación de operaciones, séptima edición, McGRAW – HILL, 2002. p. 802 – 833.

estado del sistema en el tiempo t , de manera que sus únicos valores posibles son $0, 1, \dots, M$. El sistema se observa en puntos del tiempo dados, etiquetados $t = 0, 1, 2, \dots$. Así, los procesos estocásticos $\{X_t\} = \{X_0, X_1, X_2, \dots\}$ proporcionan una representación matemática de cómo evoluciona el estado del sistema físico.

Este tipo de procesos se conocen como procesos estocásticos de tiempo discreto con espacio de estados finito.

- **Cadenas de Markov**

Es necesario hacer algunas suposiciones sobre la distribución conjunta de X_0, X_1, \dots para obtener resultados analíticos. Una suposición que conduce al manejo analítico es que el proceso estocástico es una cadena de Markov, que tiene la siguiente propiedad esencial:

Se dice que un proceso estocástico $\{X_t\}$ tiene la propiedad markoviana si $P\{X_{t+1} = j \mid X_0 = k_0, X_1 = k_1, \dots, X_{t-1} = k_{t-1}, X_t = i\} = P\{X_{t+1} = j \mid X_t = i\}$, para todo $t = 0, 1, \dots$ y toda sucesión $j, i, k_0, k_1, \dots, k_{t-1}$.

En palabras, esta propiedad markoviana establece que la propiedad condicional de cualquier evento futuro dados cualquier evento pasado y el estado actual $X_t = i$, es independiente del evento pasado y solo depende del estado actual del proceso.²⁸

Un proceso estocástico $\{X_t\}$ ($t = 0, 1, \dots$) es un proceso de Markov si tiene la propiedad markoviana. Las probabilidades condicionales $P = P\{X_{t+1} = j \mid X_t = i\}$ para una cadena de Markov se llaman probabilidades de transición (de un paso). Si para i y j , $P\{X_{t+1} = j \mid X_t = i\} = P\{X_1 = j \mid X_0 = i\}$, para toda $t = 1, 2, \dots$.

²⁸ *Ibid.*

Entonces se dice que las probabilidades de transición (de un paso) son estacionarias. Así, tener probabilidades de transición estacionarias implica que las probabilidades de transición no cambian por el tiempo. La existencia de probabilidades de transición (de un paso) estacionarias también implica que, para cada i, j y n , ($n = 0, 1, 2, \dots$),

$P\{X_{t+n} = j | X_t = i\} = P\{X_n = j | X_0 = i\}$ Para todo $t = 0, 1, 2, \dots$. Estas probabilidades condicionales se llaman probabilidades de transición de n pasos.

- **Teoría de reemplazo**

La teoría de reemplazo en investigación de operaciones²⁹ se ocupa de situaciones en las que la eficiencia tiende a deteriorarse con el tiempo, y que puede restablecerse hasta alcanzar un nivel previo mediante algún tipo de acción correctiva. El problema consiste en determinar los tiempos en los cuales dicha acción correctiva debe llevarse a cabo, para optimizar cierta medida apropiada de efectividad.

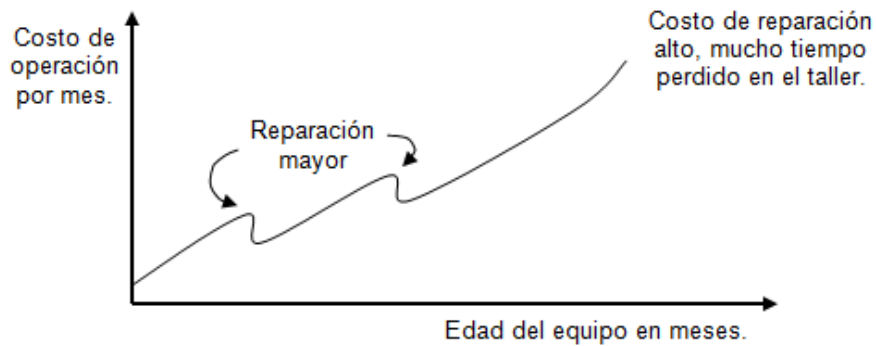
La utilidad de esta teoría es la generación de una política de adquisición de equipos del mismo tipo, que permite evaluar la variación de los costos asociados a la adquisición y al mantenimiento correctivo en un mismo periodo de tiempo, considerando como valor actual el capital necesario para ejecutar la decisión de esperar o reemplazar.

La teoría del reemplazo utiliza los costos de operación y los costos de capital por la compra del activo para determinar los tiempos para la toma de decisiones. Así, el costo promedio por unidad de tiempo disminuirá mientras más se posponga el reemplazo. Sin embargo, llega un punto en el que la

²⁹ Sassieni M., Yaspan A., Friedman L., Investigaciones de Operaciones, Editorial Limusa S.A., Mexico 1978.

rapidez del aumento de los costos de operación compensa con creces los ahorros en costos promedio de capital. En este punto se justifica el reemplazo.

Figura 2. Costo mensual de operación de un activo.



Fuente: *Teoría del reemplazo*³⁰.

• Procesos estocásticos aplicados al mantenimiento de equipos

El problema del mantenimiento visto como un proceso estocástico ha sido tratado por varios autores reconocidos anteriormente. A continuación analizaremos brevemente algunos aspectos de dos trabajos realizados acerca del tema.

Murat Kurt³¹ y Jeffrey P. Kharoufeh de la Universidad de Pittsburgh consideran que el deterioro de una clase de equipo, en función del tiempo se comporta como un proceso estocástico de cadenas de Markov de tiempo discreto, con espacio de estados finitos.

Lo interesante del estudio es la definición de tres decisiones (esperar, reparar y reemplazar), con respecto al estado actual del equipo (normal funcionamiento, funcionamiento por debajo de lo normal y no funcionamiento del equipo).

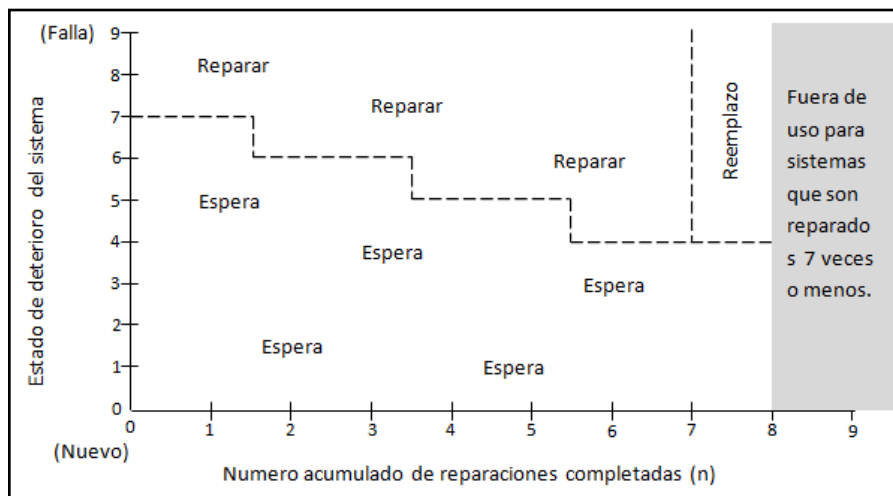
³⁰ Ibid.

³¹ Murat Kurt, Jeffrey P. Kharoufeh, Optimally maintaining a Markovian deteriorating system with limited, imperfect repairs, Department of Industrial Engineering, University of Pittsburgh, European Journal of Operational Research 205 (2010) 368–380.

La toma de decisión se basa en dos factores el primero es la probabilidad de ocurrencia de los estados y el segundo es la determinación de los costos que conllevarían efectuar dichas decisiones. Al conjugarse estos dos factores se comparan los resultados permitiendo escoger entre cada combinación de estados la que menor costo obtenga, asegurando el normal funcionamiento del equipo en cuestión con la inversión mínima posible.

Los estados para el equipo analizado en este caso, están compuestos por una pareja ordenada (s,n) donde s es el nivel de deterioro que presenta el equipo y n es el número de reparaciones realizadas al equipo. Además, los niveles de deterioro para el equipo se enumeran en orden ascendente hasta llegar a la falla del equipo, y el número de reparaciones es limitado.

Figura 3. Política de mantenimiento y reemplazo óptimo.



Fuente: *Mantenimiento óptimo de un sistema con deterioro y reparaciones limitadas*³².

Este modelo concluye con una grafica del comportamiento de las opciones a tomar según las condiciones numéricas establecidas en el caso práctico, como se muestra en la figura anterior.

³² Ibid.

Por otro lado el Dr. Antonio Sánchez del Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas de la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad de Sevilla considera en su tesis doctoral en el año 2001, las siguientes condiciones para determinar un modelo matemático para la obtención de políticas óptimas de mantenimiento aplicado a vehículos para la explotación minera.

- Las tasas de fallo de los equipos así como las tasas de reparación no se consideran constantes, es decir, hay que contemplar la utilización de funciones de distribución de fallo y de tiempo de permanencia en cada uno de los distintos estados posibles, con el objetivo de facilitar al modelo adaptarse a los cambios producidos en el sistema como consecuencia de variaciones de la política de mantenimiento.
- El equipo puede prestar un servicio que puede verse afectado en el tiempo produciendo por una parte una disminución en la calidad del mismo y por otra parte una variación en las distribuciones de los tiempos de permanencia en cada estado.
- El equipo puede estar sometido a distintos tipos de operaciones de mantenimiento, correctivo o preventivo, resultado de las cuales el equipo evolucionara a distintos posibles estados en función de las características de la operación de mantenimiento realizada.

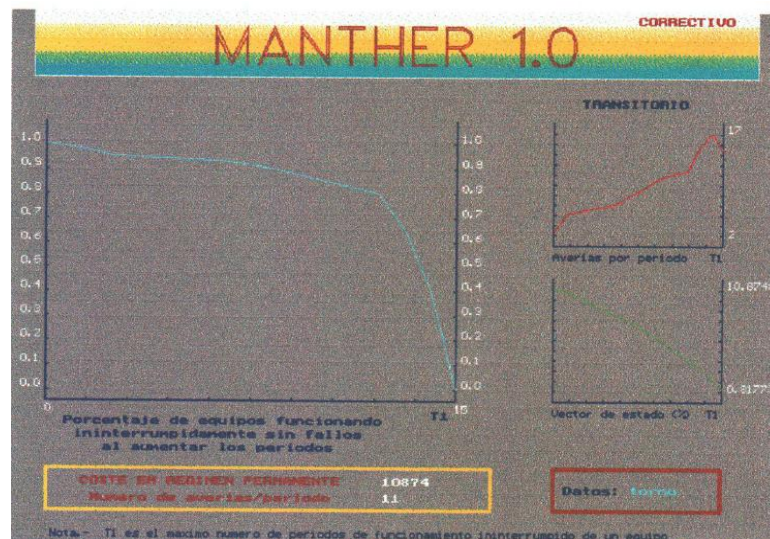
Para la formulación del modelo establece un protocolo compuesto por los siguientes puntos:

1. Definición de todos los estados (de funcionamiento y fallo) en que se puede encontrar el equipo objeto de estudio y grafico de las posibles evoluciones hacia otros estados.

2. Acciones de mantenimiento a que está sometido el proceso y sobre las que se puede tomar decisiones. Por lo tanto constituyen las posibles estrategias a tomar.
3. Datos que requiere el modelo.
4. Costos en ingresos de permanencia en cada estado y de paso a otro estado.
5. Formulación de la matriz de probabilidades de transición entre estados y formulación de la matriz de funciones de distribución de tiempo de permanencia en un estado antes de pasar al siguiente.

De esta manera este segundo autor formula diferentes combinaciones entre mantenimiento preventivo y correctivo, teniendo en cuenta una, dos o más reparaciones para el equipo en estudio, además diseña una herramienta informática para la recogida de datos estadísticos llamado MANTHER 1.0, que permite realizar los análisis estadísticos propuestos en su tesis doctoral. Una imagen del programa diseñado se muestra a continuación:

Figura 4. Presentación del programa MANTHER 1.0 para el caso de mantenimiento correctivo.



Fuente: Tesis doctoral.³³

³³ Tesis doctoral 219, 2001, Dr. Antonio Sánchez del Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas de la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad de Sevilla.

4. IDENTIFICACIÓN DE LA CLASE DE EQUIPO QUE REPRESENTA MAYOR COSTO PARA LA DIVISIÓN DE MANTENIMIENTO TECNOLÓGICO

Esta actividad se llevó a cabo analizando la información de las inspecciones realizadas a los equipos, los conceptos técnicos y los costos de mantenimiento, recopilados de los registros de las ordenes de prestación de servicios archivados, así como el número de solicitudes y la ocurrencia de fallas que se encuentran en el Sistema de Información de Mantenimiento Tecnológico – SIMAT.

Con esta información se analizó la proporción y el monto de los costos en los que incurre la DMT por mantenimiento preventivo y correctivo, que por medio del análisis Pareto se determinó cuál es la clase de equipo a las cuales se le realiza los dos tipos de mantenimiento y tienen una mayor frecuencia e impacto en términos de costos para la DMT.

A continuación se muestran las solicitudes y costos de las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo realizados a los equipos de infraestructura de la Universidad Industrial de Santander en el periodo 2007 a primer semestre de 2010.

Tabla 2. Solicitudes y costos de mantenimiento para el periodo 2007 a primer semestre 2010.

AÑO	SOLICITUDES MANTENIMIENTO		COSTOS DE MANTENIMIENTO		TOTAL COSTOS	TOTAL SOLICITUDES
	CORRECTIVO	PREVENTIVO	CORRECTIVO	PREVENTIVO		
2007	18	48	39.735.868	52.630.463	92.366.331	66
2008	44	87	91.451.890	92.560.776	184.012.666	131
2009	34	152	49.346.800	174.587.884	223.934.684	186
2010	24	40	74.044.430	103.069.038	177.113.468	64

Fuente: Archivo de registro de costos de servicios DMT.

Las solicitudes y costos de mantenimiento, tanto para preventivos como para correctivos varían debido a:

- El aumento en el número, clase y complejidad de los equipos de infraestructura de la Universidad Industrial de Santander.
- La disminución del personal técnico de la DMT.
- El cumplimiento de los requisitos establecidos por las Normas NTC ISO 9001:2008, NTC GP: 1000 y NTC ISO 17025:2005.
- El incremento de las expectativas de funcionamiento y disponibilidad frente a los activos por parte de la comunidad universitaria.
- Los servicios de mantenimiento son realizados en algunos casos por medio de contrataciones externas (outsourcing) para cumplir con el plan anual de mantenimiento.

El análisis de los costos del mantenimiento correctivo y preventivo que se muestran en el Anexo 1 (Costos de los mantenimientos preventivos y correctivos para el periodo 2007 a primer semestre de 2010), tuvo en cuenta todas las clases de equipos a las que se les realizaron estos tipos de mantenimiento, con el fin de identificar las clases de equipos representativas en cada tipo de mantenimiento.

Los costos para mantenimiento correctivo y preventivo se clasificaron con el objetivo de realizar un análisis de Pareto, esta herramienta estadística busca encontrar los pocos vitales y centrar los esfuerzos en estos equipos, brindando el argumento suficiente para centrar este proyecto de grado en una clase de equipo.

En el caso del mantenimiento correctivo, existieron 50 clases de equipo, de las cuales 6 representan el 77,62% de los costos incurridos, siendo estos los equipos más significativos para este tipo de mantenimiento en la DMT. Las clases de equipo representativas fueron en orden de jerarquía: Aire

acondicionado, Montacargas, Cabinas extractoras, Red de televisión, Tableros de baloncesto e Instalaciones de telefonía, representan el 12% del total de equipos a los cuales se les realiza mantenimiento correctivo.

Del mismo modo, para el mantenimiento preventivo existieron 53 clases de equipo, de las cuales 6 representan el 79,52% de los costos incurridos. Las clases de equipo representativas fueron en orden de jerarquía: Aire acondicionado, Ascensores, Sistema radial UIS, Plantas eléctricas, Equipos de laboratorio y Cabinas extractoras, representando el 11% del total de equipos a los cuales se les realiza manteniendo preventivo siendo estos los equipos más significativos con relación al costo en el que se incurre.

A continuación se muestra el porcentaje de costos y solicitudes por concepto de aires acondicionados.

Tabla 3. Proporción de servicios y costos de mantenimiento respecto a sus totales.

Año	Costo Mantenimiento	Costo Aire Acondicionado	%	Servicios	Servicios de Aire Acondicionado	%
2007	\$ 102.828.656,76	\$ 27.705.708,00	27%	1254	189	15%
2008	\$ 188.871.323,40	\$ 43.189.301,76	23%	1714	170	10%
2009	\$ 228.890.077,18	\$ 73.737.178,12	32%	1601	284	18%
2010	\$ 178.786.269,19	\$ 101.188.224,00	57%	1504	385	26%

Fuente: Archivo de registro de costos de servicios DMT, servicios del Sistema de Información de Mantenimiento Tecnológico, SIMAT.

En cada año estudiado, el porcentaje (%) de solicitud de servicios realizado fue igual o mayor al 10% del total por concepto de aires acondicionados y el porcentaje de los costos de mantenimiento para esta misma clase de equipo fue mayor o igual al 23%.

Dentro de los dos tipos de mantenimiento, la clase de equipo más representativa desde el punto de vista de costos fue el aire acondicionado, y aunque existen otras clases de equipos representativas, tanto para el mantenimiento preventivo como para el correctivo, estas no serán tratadas en el presente proyecto de grado.

5. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS MODOS DE FALLA Y LOS NIVELES DE DETERIORO

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS EQUIPOS DE AIRE ACONDICIONADO

Tras realizar el análisis de Pareto para los costos de las actividades de mantenimiento se obtuvo que la clase de equipo más representativo es el aire acondicionado, pero la UIS cuenta en la actualidad con varios tipos de equipos de aire acondicionado que serán explicados brevemente a continuación con el fin de dar claridad acerca de estos equipos y determinar a cuál de ellos se le aplicara el modelo propuesto en este proyecto.

5.1.1 Aire acondicionado tipo CENTRAL

Es utilizado para áreas grandes como edificios, tiene una capacidad de 36.000, 48.000 y 60.000 BTU, debido al tamaño de los compresores y condensadores que se encuentran en una sola ubicación, generalmente en el sótano o en una de las partes externas del edificio (como en el caso de la Biblioteca Central), utiliza ductos para transportar el aire acondicionado al espacio a refrigerar. Su costo de funcionamiento es bajo en relación con la cantidad de espacio a refrigerar. Este tipo de aire se muestra en la Foto 3 y 4.

Foto 3. Aire Tipo Central, DMT.



Fuente: Autores.

Foto 4. Aire tipo central, Biblioteca central UIS.



Fuente: Autores.

5.1.2 Aire acondicionado tipo CHILLER

Es el tipo de aire acondicionado con mayor capacidad de enfriamiento el cual no utiliza CFC sino agua aplicando el mismo principio de funcionamiento que los tipos de aire mencionados anteriormente. Su tamaño es grande en comparación con los otros tipos de equipos de aire acondicionado, y es usado para volúmenes grandes (CENTIC, Auditorio Luis A. Calvo, Ciencias Humanas). Funciona por medio de ductos, los controles de operación son más complejos y de mayor cuidado que los anteriores y su costo de funcionamiento y de mantenimiento es alto debido al tamaño del volumen a refrigerar. Este tipo de aire se muestra en las Fotos 5 y 6.

Foto 5. Aire Tipo Chiller, FAVUIS.



Fuente: Autores.

Foto 6. Aire Tipo Chiller, Ingeniería de Sistemas.



Fuente: Autores.

5.1.3 Aire acondicionado tipo MINI-SPLIT

Es el tipo de aire acondicionado más utilizado en las unidades académico administrativo debido a que sus capacidades de 9.000, 12.000 y 18.000 BTU son acorde para espacios pequeños, son auto-regulables, tienen control remoto y no necesitan realizar mayores cambios a la infraestructura. Este tipo de aire se muestra en la Foto 7.

Foto 7. Aire Tipo Mini-Split, Escuela de Ingeniería de Petróleos.



Fuente: Autores.

5.1.4 Aire acondicionado tipo VENTANA

Es el tipo de aire acondicionado más antiguos con los que cuenta la Universidad, con un costo de funcionamiento alto para su capacidad de enfriamiento. Son análogos y no presentan complejidad en su tablero de control. Tienen los inconvenientes que para su uso es necesario realizar una adecuación estructural al lugar en el cual será instalado y que los gases refrigerantes usados para su funcionamiento (CFC) representan un riesgo tanto para el técnico de mantenimiento como para los usuarios del mismo. Este tipo de aire acondicionado se muestra en la Foto 7.

Foto 8. Aire Tipo Ventana, Escuela de Ingeniería Química.



Fuente: Autores.

Los tipos de aires acondicionados anteriormente mencionados, tienen un periodo de inspección dependiente de la Unidad Académico Administrativa a la cual pertenecen, dentro del programa anual de mantenimiento de la DMT. Esta información se encuentra disponible en la Intranet de la UIS, como se observa en la figura 5.

Una vez conocidos los tipos de airea condicionado y algunas generalidades y características de ellos, se consultó con los técnicos del taller de refrigeración a través de la encuesta mostrada en el anexo 2, con el fin de establecer los componentes de la clase de equipo de aire acondicionado y las fallas más frecuentes de los tipos de airea condicionado.

La encuesta del anexo 2 plantea cuatro preguntas para lograr el objetivo establecido, que se explican a continuación:

Pregunta 1:

¿Cuáles son los componentes básicos de los tipos de aire acondicionado que existen en la UIS?

Debido a que los técnicos cuentan con la experiencia suficiente y el conocimiento de los diferentes tipos de aire acondicionado, constituyen una fuente de información válida para la caracterización y clasificación de los componentes del equipo.

Pregunta 2:

¿Cuál es el periodo de inspección de los aires acondicionados?

Con esta pregunta se busca conocer en promedio el tiempo entre inspecciones para la clase de equipo estudiado, de manera que se determine el tiempo de inspección para el modelo propuesto.

Pregunta 3:

¿Cuál de los tipos de aire acondicionado representa el mayor porcentaje de la ocupación del personal técnico de la DMT? ¿Por qué?

Esta pregunta es interesante y de mucha ayuda, ya que nos da una idea de la cantidad de solicitudes de mantenimiento asignadas por tipo de equipo de aire acondicionado, información que no se observa de manera clara en los documentos y archivos existentes.

Pregunta 4:

¿Cuáles son los tipos de falla más frecuentes para cada uno de los tipos de aire acondicionado?

Con esta pregunta llegamos a indagar qué tipos de fallas se presentan en los aires acondicionados, mostrando las diferentes razones por las cuales falla cada uno de los tipos de equipo.

Teniendo como base los lineamientos establecidos en la norma ISO 14224:2006, en la cual es necesario definir los sistemas, subsistemas y componentes de los equipos a analizar. Además, de los cuatro tipos de aire acondicionado encontrados en la UIS, se evaluaron únicamente tres de estos, ya que el mantenimiento del Tipo Central es realizado por outsourcing y no por personal de la DMT.

Una vez realizada la encuesta y según las respuestas de los técnicos, el tipo de aire acondicionado que mayor cantidad de solicitudes genera es el MINI-SPLIT, debido a la cantidad de equipos existentes en las diferentes UAA de la UIS.

Por lo anterior se estableció que el tipo de aire acondicionado para esta clase de equipo a estudiar será el tipo MINI-SPLIT. A continuación se realiza una explicación más profunda de este equipo de aire acondicionado y posteriormente se continuara con el análisis de la encuesta realizada del anexo 2.

5.2 CARACTERIZACIÓN DEL AIRE ACONDICIONADO TIPO MINI-SPLIT

La descripción de la clase de equipo se realiza con el fin de conocer sus características, con base en la información suministrada por la DMT encontrada en manuales y fichas técnicas. Inicialmente el aire acondicionado se divide en tres partes así:

- La unidad interior.
- La unidad exterior.
- La instalación de tubería y cableado de interconexión.

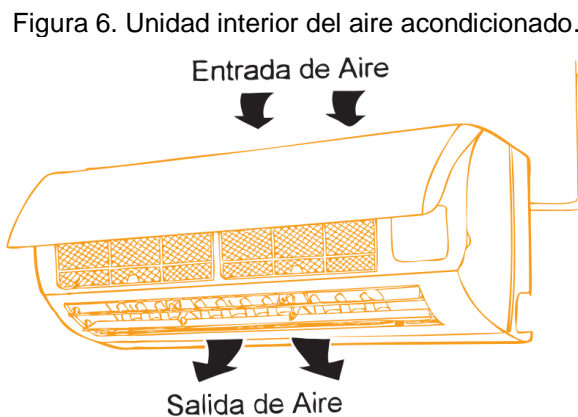
Así mismo, el aire acondicionado cuenta con un principio de operación y funcionamiento tanto para el modo de enfriamiento, como para el modo de calefacción. En el primero la unidad interior absorbe el calor contenido en el aire del espacio a acondicionar, lo transmite a la unidad exterior, y lo desecha a la atmosfera, logrando que la temperatura en el espacio acondicionado baje y la capacidad de enfriamiento disminuye o aumenta según la variación de la temperatura exterior.

Dentro de este primer modo de enfriamiento, se encuentra también la función anti-congelamiento, que se lleva a cabo cuando el acondicionador opera en el modo de enfriamiento estando la temperatura exterior muy baja y ocasiona la formación de hielo en el intercambiador de calor o serpentín de la unidad anterior. Cuando esto sucede, el procesador del sistema responde apagando el compresor en la unidad exterior, para proteger el acondicionador.

El segundo modo corresponde a la calefacción, aquí la unidad exterior absorbe el calor contenido en el ambiente externo, lo transmite a la unidad interior, y lo descarga en el espacio ya acondicionado, logrando que la temperatura suba y la capacidad de calefacción aumente o disminuya según la variación de la

temperatura exterior. Al igual que el modo de enfriamiento, el modo de calefacción cuenta con la función anti-congelamiento, a través de la cual el motor ventilador deja de trabajar para evitar el flujo de aire frío hacia el espacio acondicionado, en el caso en que el serpentín de la unidad interior no logre llevar a cabo la función de calefacción.

Como se dijo anteriormente, los aires acondicionados se pueden dividir en tres partes. La unidad interior que cuenta con las tarjetas electrónicas, los filtros de aire, las pestañas guías para la salida de aire, el panel frontal cuya función es proteger los filtros y la tubería de gas refrigerante. (Ver figura 6.)



Fuente: Manual del usuario, acondicionador de aire TEMPSTAR³⁴.

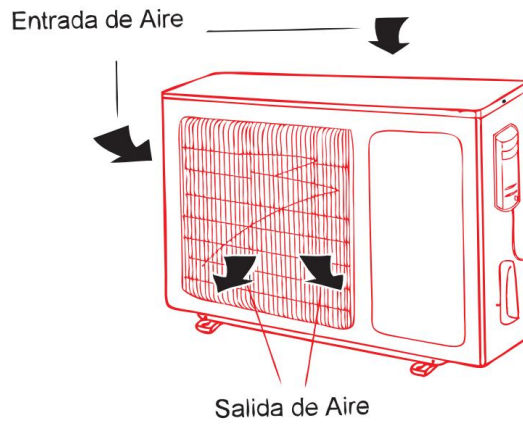
La unidad exterior cuenta con el compresor, los motores de ventilación, los serpentines, la regleta evaporadora, la regleta condensadora, los capacitores, el dispositivo de arranque y la tubería de gas refrigerante. (Ver figura 7.)

El cableado interconector está conformado por el cableado eléctrico y la tubería de gas refrigerante. La función del cableado eléctrico es conectar las unidades interior y exterior, y la de la tubería de gas refrigerante, es permitir que

³⁴ Manual del usuario, Acondicionador de aire, TEMPSTAR, Modelos: 38TCT – 40TCT, FORM: MAGF07M1.

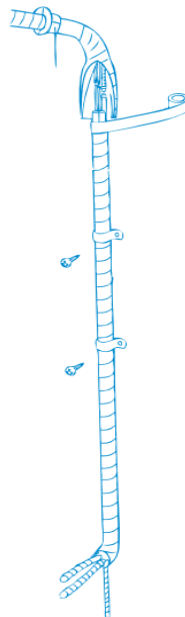
el gas circule entre las unidades exterior e interior con el fin de acondicionar el aire en el espacio deseado. (Ver figura 8.)

Figura 7. Unidad exterior del aire acondicionado.



Fuente: Manual del usuario, acondicionador de aire TEMPSTAR³⁵.

Figura 8. Cableado interconector del aire acondicionado.



Fuente: Manual del usuario, acondicionador de aire TEMPSTAR³⁶.

³⁵ Ibid.

Cada uno de las tres partes del aire acondicionado tiene un funcionamiento conforme a las especificaciones técnicas solicitadas por el cliente en el momento de la adquisición del equipo, pero dependiendo de la ubicación asignada dentro de las Unidades Académico Administrativa de la UIS, el equipo presenta una serie de fallas y deterioros durante su vida útil y a su vez tiene establecido un periodo de revisión e inspección con el fin de asegurar el correcto funcionamiento de este.

Debido a su normal funcionamiento, el aire acondicionado comienza a presentar fallas frecuentes las cuales se mencionan a continuación:

- Los filtros comienzan a acumular partículas de polvo que disminuyen su funcionalidad generando un deterioro progresivo en el motor de los ventiladores.
- Los soportes y enclaves de la estructura que sostienen las unidades exteriores presenta corrosión debido al factor medio ambiental al que está expuesto.
- Las tuberías de los líquidos pueden presentar fugas causando incomodidad al usuario al filtrarse líquidos de la condensación del ambiente.
- Las tuberías de los gases refrigerantes puede presentar fugas causando daños en el ambiente al filtrarse los gases refrigerantes. Algunas de las clases de gases refrigerante que existen son: R22 (el más utilizado tanto para aplicaciones industriales como domesticas), R134a (utilizado normalmente en grandes equipos de enfriamiento de aire), R407C (utilizado en enfriadores de agua de mediana y pequeña potencia, y en Mini-Splits), R417A (ISCEON 59, sustituto directo del R22 en todas sus aplicaciones), R410A (utilizado actualmente en Mini-Splits), y R422D (ISCEON 29, sustituto directo del R22 en enfriadoras de agua).

³⁶ Ibid.

- Se pueden presentar daños de tipo eléctrico (cableado, dispositivos de arranque, tarjetas electrónicas) o mecánico (motores, capacitores), que afectan el funcionamiento del equipo ocasionando su falla lo que conlleva a realizar un mantenimiento correctivo.

En este punto se conocen algunas de las razones que suponen posibles fallas de los aires acondicionados y a continuación se muestran las fallas más comunes para los diferentes tipos de aire acondicionado:

Tabla 4. Fallas comunes para los tipos de aires acondicionados analizados.

TIPO DE AIRE ACONDICIONADO		
MINI-SPLIT	VENTANA	CHILLER
Congelación de evaporador.	Corrosión.	Corrosión.
Daño en circuito eléctrico.	Daño de los bujes.	Daño eléctrico en circuito de control.
Daño en circuito electrónico.	Daño eléctrico de la instalación.	Daño eléctrico en circuito de potencia.
Daño en compresor.	Daño eléctrico en el compresor.	Daño eléctrico en compresores.
Daño en el motor del ventilador de enfriamiento.	Daño eléctrico en el ventilador.	Daño eléctrico en unidades manejadoras.
Daño en instalación eléctrica y de control.	Daño en condensador.	Daño eléctrico en ventiladores.
Daño en ventilador de condensador.	Daño en control de temperatura.	Daño en aislamiento de tuberías.
Desajustes estructurales.	Daño en evaporador.	Daño en controles de acondicionamiento y seguridad.
Falla en aislamiento de tubería.	Daño en las balineras.	Daño en los condensadores.
Goteo de agua.	Desajustes.	Desajustes estructurales.
Malos olores en unidad evaporadora.	Goteo de agua interno – externo.	Goteo de agua.
Perdida de refrigerante.	Perdida de refrigerante.	Incrustaciones en Chiller.
Ruido en unidad condensadora.	Ruidos internos.	Incrustaciones en condensadores.
Ruido en unidad evaporadora.	Ruidos por vibración en ventanales.	Perdida de refrigerante.
Suciedad en filtros.	Suciedad del equipo en general.	Ruido en correas.
Suciedad en unidad condensadora.		Ruido en poleas.
Suciedad en unidad evaporadora.		Ruido en unidades manejadoras.
Taponamiento de los filtros.		Suciedad en filtros.
		Suciedad en unidades condensadoras.
		Suciedad en unidades manejadoras.

Fuente: Encuesta a técnicos y profesionales de la DMT.

5.3 COMPONENTES DEL AIRE ACONDICIONADO TIPO MINI-SPLIT

Como se observa en la tabla anterior la información no permite establecer un orden jerárquico que pueda ser utilizado para la formulación de los niveles de deterioro. Es aquí donde se utiliza la estructura establecida por la Norma ISO 14224:2006 para el mantenimiento de equipos, que se observa en la siguiente tabla, donde se ubican los componentes que pueden fallar en un equipo de aire acondicionado tipo Mini-Split.

Tabla 5. Componentes del aire acondicionado.

CLASE DE EQUIPO	AIRE ACONDICIONADO						
Sistema	Mecánico				Eléctrico		
Subsistema	Evaporador	Condensador		Tubería	Compresor	Eléctrico	Electrónico
Componentes	Tubería de gas refrigerante Filtros	Tubería de gas refrigerante	Tubería de drenaje	Gas Líquido	Motor Ventiladores y serpentines	Cableado Dispositivo de arranque Regleta evaporadora Regleta condensadora	Tarjeta electrónica Capacitores

Fuente: Encuesta a técnicos y profesionales de la DMT.

Como se puede ver en la tabla anterior el aire acondicionado está conformado por el sistema mecánico y eléctrico. El sistema mecánico cuenta con cuatro subsistemas y el sistema eléctrico con dos subsistemas, los cuales a su vez, están conformados por componentes, cuyo número varía según el subsistema al cual pertenece.

En este punto se definieron con los técnicos los niveles de deterioro, siendo estos la disminución del estado óptimo del equipo, afectando su funcionamiento hasta llegar a ocasionar la falla del mismo, de manera que con base en lo anterior y en la tabla de componentes del aire acondicionado se ordenaron de menor a mayor los tipos de falla, según la complejidad del deterioro progresivo que representa y los costos de reparación creciente conforme aumenta el nivel de deterioro.

Tabla 6. Niveles de deterioro para los aires acondicionados.

NIVEL DE DETERIORO	S
Funcionamiento en condiciones optimas del aire acondicionado	0
Suciedad en filtros, ventilas y serpentines	1
Corrosión en soportes y enclaves	2
Suciedad en filtros, ventilas, serpentines y corrosión en soportes y enclaves	3
Fuga en tuberías de líquidos o gases refrigerantes	4
Suciedad en filtros, ventilas, serpentines y fuga en tuberías de liquido o gases refrigerantes	5
Corrosión en soportes y enclaves y fuga en tuberías de liquido o gases refrigerantes	6
Suciedad en filtros, ventilas, serpentines, corrosión en soportes y enclaves y fuga en tuberías de liquido o gases refrigerantes	7
Daño en el cableado eléctrico	8
Daño en los dispositivos de arranque	
Daño en la tarjeta electrónica	
Daño en los capacitores	
Daño en la regleta condensadora / evaporadora	
Daño en el motor	
Suciedad en filtros, ventilas, serpentines y daño en los componentes	

Corrosión en soportes y enclaves y daño en los componentes	
Fuga en tuberías de liquido o gases refrigerantes y daño en los componentes	
Suciedad en filtros, ventilas, serpentines y corrosión en soportes y enclaves y daño en los componentes	
Suciedad en filtros, ventilas, serpentines y fuga en tuberías de liquido o gases refrigerantes y daño en los componentes	
Corrosión en soportes y enclaves y fuga en tuberías de liquido o gases refrigerantes y daño en los componentes	
Suciedad en filtros, ventilas, serpentines, corrosión en soportes y enclaves y fuga en tuberías de liquido o gases refrigerantes y daño en los componentes	

Fuente: Autores del proyecto.

Los niveles de deterioro, como se observan en la anterior tabla, muestran los posibles escenarios en los que se puede encontrar el equipo en función de las fallas o deterioros, de manera que puede presentar un tipo de falla o la combinación de varias.

Del mismo modo, la numeración de los niveles comienza desde cero, representando éste el nivel de funcionamiento óptimo, esta numeración aumenta para un tipo de falla con única causa (suciedad en filtros), y continúa aumentando conforme se combinan las causas de falla, mostrando un deterioro progresivo (suciedad en filtros y corrosión), y este comportamiento sigue hasta que llega al máximo nivel de deterioro en el cual el equipo en estudio no funciona y se produce el paro del proceso.

Después de establecer los niveles de deterioro se pudo delimitar que para la clase de equipo de aire acondicionado, entre una inspección y otra sucesiva, el equipo puede repararse hasta dos veces, y después de estas dos reparaciones, la situación es considerada una evento extraño, razón por la cual el equipo debe ser analizado para conocer la causa de la falla y realizar el respectivo servicio de mantenimiento.

Considerando que este proyecto utilizará las cadenas de Markov para establecer la política de mantenimiento en una clase de equipo, se parte del supuesto de que los aires acondicionados representan un sistema con comportamiento estocástico en el cual, por ejemplo, un equipo se encuentra en un estado inicial funcionando correctamente en un momento t , y el mismo equipo en el periodo posterior podría variar su condición inicial pasando a otro estado o permaneciendo en el mismo. Esta afirmación es explicada en el capítulo 5 donde se definen las probabilidades para el modelo.

Bajo la anterior afirmación, el estado en el que se encuentra el equipo estará definido como la pareja ordenada (s,n) , que son los dos factores que afectan el funcionamiento de un equipo, siendo s el nivel de deterioro (definido anteriormente) y n el número de reparaciones que se explica a continuación.

De esta manera se propuso un número de reparaciones límite de 12, cantidad que tiene en cuenta las inspecciones anuales y las posibles acciones de mantenimiento correctivo a realizar, definido con los técnicos de la DMT en la encuesta del anexo 2. Entonces con 9 niveles de deterioro (0 a 8), y 13 número de reparaciones permitidas antes de decidir reemplazar el equipo, el total de estados (s,n) para la matriz de probabilidades (estudiada en el siguiente capítulo), es de 117. ($9 \times 13 = 117$). Esto se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 7. Total de parejas para la combinación de niveles de deterioro y cantidad de reparaciones.

Pareja	Estado	Pareja	Estado	Pareja	Estado	Pareja	Estado	Pareja	Estado	Pareja	Estado	Pareja	Estado	Pareja	Estado	Pareja	Estado
1	0,0	14	1,0	27	2,0	40	3,0	53	4,0	66	5,0	79	6,0	92	7,0	105	8,0
2	0,1	15	1,1	28	2,1	41	3,1	54	4,1	67	5,1	80	6,1	93	7,1	106	8,1
3	0,2	16	1,2	29	2,2	42	3,2	55	4,2	68	5,2	81	6,2	94	7,2	107	8,2
4	0,3	17	1,3	30	2,3	43	3,3	56	4,3	69	5,3	82	6,3	95	7,3	108	8,3
5	0,4	18	1,4	31	2,4	44	3,4	57	4,4	70	5,4	83	6,4	96	7,4	109	8,4
6	0,5	19	1,5	32	2,5	45	3,5	58	4,5	71	5,5	84	6,5	97	7,5	110	8,5
7	0,6	20	1,6	33	2,6	46	3,6	59	4,6	72	5,6	85	6,6	98	7,6	111	8,6
8	0,7	21	1,7	34	2,7	47	3,7	60	4,7	73	5,7	86	6,7	99	7,7	112	8,7
9	0,8	22	1,8	35	2,8	48	3,8	61	4,8	74	5,8	87	6,8	100	7,8	113	8,8
10	0,9	23	1,9	36	2,9	49	3,9	62	4,9	75	5,9	88	6,9	101	7,9	114	8,9
11	0,10	24	1,10	37	2,10	50	3,10	63	4,10	76	5,10	89	6,10	102	7,10	115	8,10
12	0,11	25	1,11	38	2,11	51	3,11	64	4,11	77	5,11	90	6,11	103	7,11	116	8,11
13	0,12	26	1,12	39	2,12	52	3,12	65	4,12	78	5,12	91	6,12	104	7,12	117	8,12

Fuente: Autores del proyecto.

Teniendo como base los niveles de deterioro que presenta el aire acondicionado, y conociendo el número límite de reparaciones, se planteó el tamaño de la matriz de probabilidades como se muestra abreviadamente en la tabla 7.

Tabla 8. Tamaño abreviado de la matriz de probabilidad para los niveles de deterioro y número de reparaciones establecidos.

	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	4,0	8,11	8,12
0,0												
0,1												
0,2												
0,3												
0,4												
0,5												
0,6												
....												
4,0												
8,11												
8,12												

Fuente: Autores del proyecto.

6 DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL MODELO Y METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE PROBABILIDADES

Para establecer las probabilidades, se siguió la metodología que se describe a continuación, que tiene como fin asegurar la confiabilidad de los resultados, permitiendo establecer el plan de mantenimiento para la clase de equipo de aire acondicionado tipo Mini-Split.

6.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

Las fuentes de información con las que se contaba fueron:

- El SIMAT (mantenimiento correctivo).
- El control de reparación de equipos no reportados en el SIMAT FRT.03 (mantenimiento correctivo).
- Las hojas de vida e informe de mantenimiento de los equipos (mantenimiento preventivo) FRT.08 y FRT.11.
- Las solicitudes de mantenimiento vía memorando (mantenimiento correctivo y preventivo).

Estos formatos se muestran en el anexo 3, y son explicados brevemente a continuación:

La primera fuente de información con la que se contaba fueron los registros encontrados en el SIMAT se contaba con información sobre la fecha de solicitud del mantenimiento, la fecha de cumplimiento, la descripción del trabajo realizado, el número de inventario y la ubicación del equipo (dentro de las instalaciones de la UIS), entre otros, como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Solicitudes de mantenimiento reparativo para los equipos de aire acondicionado del SIMAT.

The screenshot shows a window titled "Sistema de Informacion" with a dark green background. At the top, there are fields for "U.I.S." (U.I.S.), "Sistema Mantenimiento Tecnologico", and "Dic/03/2010". Below this, it says "<legarfra> Modulo de Cumplimiento - tecnico del Servicio" and "< cum_a002 >". A navigation bar includes "CONSULTAR:", "Primero", "Avanzar", "Retroceder", "Ultimo", "Costos", "Modificar ...", and "Ir a la Anterior Solicitud.". The main content is titled "CUMPLIMIENTO DE UN SERVICIO" and contains the following data:

Numero Solicitud :	7929	Codigo UAA :	113 ESCUELA DE QUIMICA
Fecha Solicitud :	09/08/2010	Tipo Servicio:	2 REPARATIVO
Numero Inventario:	78312	AIRE ACONDICIONADO MARCA YORK, TIPO MINI-	
Iden. Tec. Asig :	2	ADALBERTO POLO	
Estado Servicio :	C CUMPLIDA	Fecha Cumplimiento :	09/13/2010

Below this is the "DETALLES DEL REPORTE" section with a text box containing: "Reporte Tecnico : DESARME DE PARTE FRONTAL Y LIMPIEZA GENERAL, CAMBIO DE CAPACITOR DE ARRANQUE, CARGA DE REFRIGERANTE PUESTO EN FUNCIONAMIENTO." At the bottom, it shows "Cod. Demora : 10 CUMPLIENDO SERVICIO ASIGNADO" and "Registro 18 de 277".

Fuente: Registros de mantenimiento del SIMAT 2010.

El inconveniente encontrado en los registros del SIMAT, consistió en la poca información aportada sobre las condiciones en las cuales se encontraba el equipo en las anteriores inspeccionadas realizadas, imposibilitando la determinación de la función de las probabilidad de transición entre estados, en estos tampoco se mostraba los datos acerca de los costos incurridos de manera que permitiera diferenciar los costos incurridos en el mantenimiento.

La segunda fuente de información fueron los registros del control de reparación de equipos no reportados en el SIMAT, que se realizan para los equipos que no necesariamente cuentan con un número de inventario, pero son importantes y/o críticos en las Unidades Académico Administrativas en las que encuentran. Estos registros muestran el nombre y ubicación del equipo así como el responsable a contactar para llevar a cabo la actividad de mantenimiento.

Dentro de este formato se brinda información sobre el nombre del equipo, la marca, el modelo, entre otros, y tiene como ventaja que reporta información sobre

los elementos utilizados como repuestos, lo cual permite conocer los elementos que fallaron y de esta manera el nivel de deterioro en el que se encontraba el equipo, pero al igual que los registros del SIMAT no informan sobre los costos necesarios para llevar a cabo el mantenimiento y al no contar con un número de inventario no es posible asegurar el número de reparaciones o mantenimientos realizados en un mismo equipo.

La tercera fuente de información fueron las hojas de vida de los equipos para control de mantenimiento y calibración, que muestra la información necesaria para asegurar la identificación única e inequívoca de los equipos, así como, la última fecha de mantenimiento y/o calibración del equipo, pero no brinda información sobre las condiciones en que se encontraba el equipo anteriormente ya que no tiene en cuenta el mantenimiento correctivo realizado, ni los costos incurridos para herramientas y/o equipos utilizados.

La cuarta fuente de información fueron las solicitudes de mantenimiento vía memorando, que son una carta dirigida al Jefe de la DMT solicitando el mantenimiento de algún o algunos equipos de infraestructura de la Universidad, que estén dentro del alcance de la DMT. En esta se describe la razón por la cual se requiere el mantenimiento, la ubicación y demás datos que se consideren necesarios para llevar a cabo la programación del mismo.

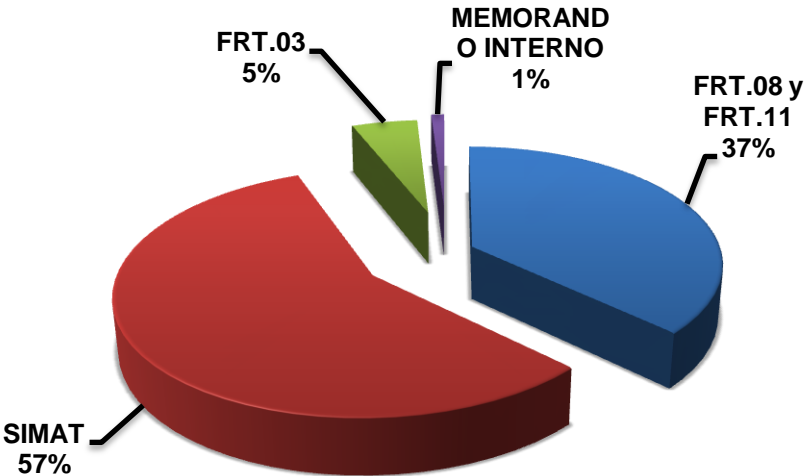
Este documento aunque brinda información sobre las razones de falla del equipo no permite determinar probabilidades, ni condiciones en las que se encontraba en periodos anteriores. Así mismo en algunos casos, los equipos no cuentan con número de inventario o se hace solicitud para varios equipos en la misma carta lo que dificulta la medición de los costos asociados a cada uno.

Adicional al análisis de la conformación de los tipos de registros generados a partir de las actividades de mantenimiento, se determinó cual es el tipo de procedimiento más utilizado a través de la clasificación y recopilación del total de

los registros hallados en los archivos de la DMT y la cantidad de solicitudes cumplidas registradas en el SIMAT, desde el 14 de Enero del 2010 hasta Septiembre del 2010.

Dando como resultado que el registro más utilizado es el de solicitudes de mantenimiento por medio del SIMAT, el cual representa el 57% del total de los mantenimientos. En la figura 10 se puede ver la distribución porcentual de los tipos de registro utilizado.

Figura 10. Porcentaje de información encontrada según tipo de registro de la DMT.



Fuente: Registros de mantenimiento realizados por la DMT 2010 en la UIS.

Debido a que los registros existentes no se aseguran la confiabilidad de la obtención de las probabilidades, ni proporciona información suficiente para establecer dichas probabilidades para los estados de la matriz de transición, se recurrió a la experiencia de los técnicos y profesionales de la DMT, como fuente de información para llevar a cabo este proceso, esto se explica en la siguiente metodología.

6.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DELPHI³⁷.

La DMT cuenta con personal capacitado e idóneo para la realización del mantenimiento de los equipos de infraestructura de la UIS. Partiendo de esta premisa se procedió a determinar las probabilidades de los estados de transición para la Cadena de Markov mediante el método Delphi con el personal de la DMT.

Para llevar a cabo este método, se realizó la encuesta preliminar al personal técnico de la DMT, anexo 4, con el objetivo de determinar la probabilidad de transición y los costos asociados a la actividad de mantenimiento.

Antes de realizar la encuesta preliminar, se explicó en qué consiste el método Delphi a los asistentes. La encuesta preliminar constó de tres preguntas, fue realizada el día 1 de Junio del 2010 a 20 técnicos y profesionales de la DMT, y cuyo análisis se muestra a continuación:

Pregunta 1:

¿Qué costos asociados a la actividad de mantenimiento podrían afectar los criterios de la decisión a tomar de reparar, reemplazar o dejar funcionando un periodo más?

El objetivo de esta pregunta es conocer los costos controlados actualmente por la DMT y conocer la influencia de estos costos en la toma de decisiones para los mantenimientos a realizar.

Los resultados de esta pregunta muestran que, los costos que mayor influencia registran, con base en el conocimiento técnico, son los costos de mantenimiento correctivo y preventivo, lo cual es coherente ya que todos los esfuerzos actuales de la DMT están enfocados a garantizar el funcionamiento de los equipos de infraestructura de la UIS. Los resultados evidencian que según los técnicos los costos si afectan las decisiones a tomar y por tanto las probabilidades de reparar, inspeccionar o reemplazar, pero estas no son las probabilidades que se buscan,

³⁷ Krajewski, Lee J., Ritzman, Larry P., Administración de Operaciones, Estrategia y Análisis, Editorial Pearson Educación, 2000, Quinta Edición, Pág. 502.

debido a que las cadenas de Markov para este proyecto, considera la probabilidad de que un equipo pueda pasar de un estado (s,n) en un tiempo t, a otro estado (s',n) o el mismo en un tiempo t+1.

Figura 11. Respuestas a la pregunta 1 de la encuesta preliminar.



Fuente: Resultados encuesta preliminar - Anexo 4.

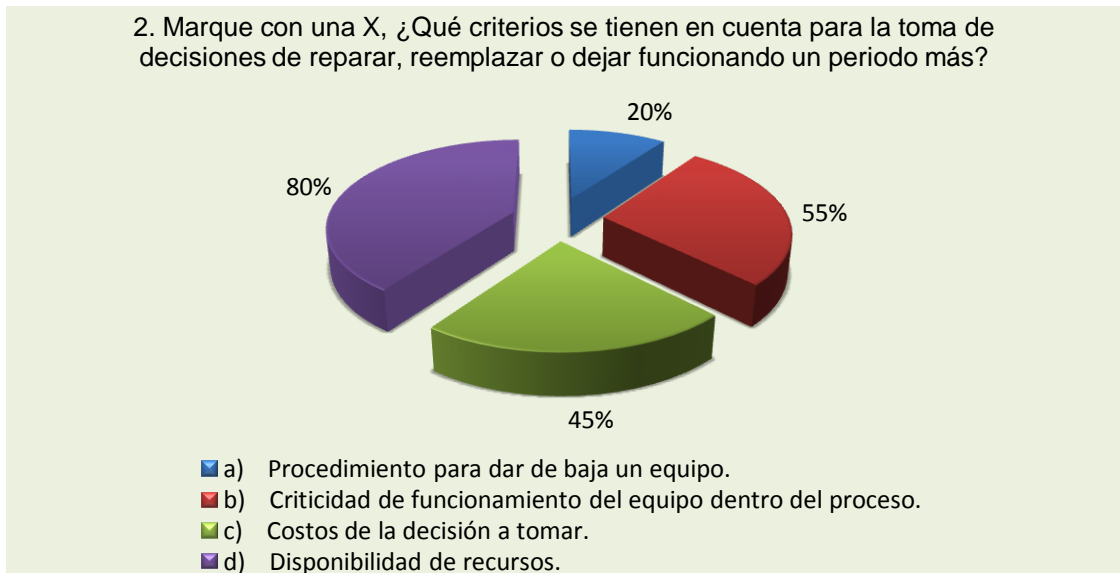
Pregunta 2:

¿Qué criterios se tienen en cuenta para la toma de decisiones de reparar, reemplazar o dejar funcionando un periodo más?

Con esta pregunta se busca determinar si estos criterios podrían afectar las decisiones de mantenimiento e inspecciones para los equipos de aire acondicionado.

De acuerdo a los resultados los criterios si afectan las decisiones a tomar, lo que demuestra que las probabilidades se van a ver afectadas por estos criterios.

Figura 12. Respuestas a la pregunta 2 de la encuesta preliminar.



Fuente: Resultados encuesta preliminar - Anexo 4.

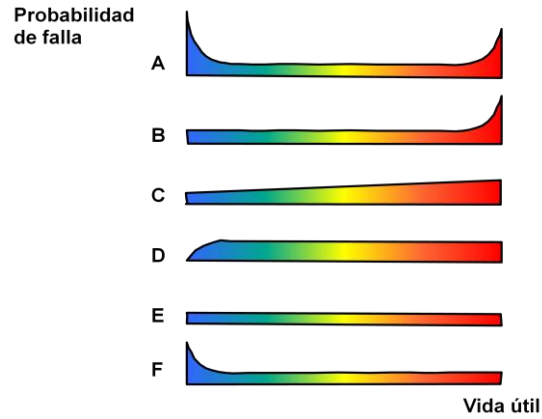
Pregunta 3:

¿Cuál es el comportamiento de probabilidad de falla de un aire acondicionado tipo Mini-Split?

Con esta pregunta se busca determinar que comportamiento grafico presentan las probabilidades de falla, como se observa en la figura 14, para los equipos de aire acondicionado según el conocimiento y experiencia de los técnicos de la DMT.

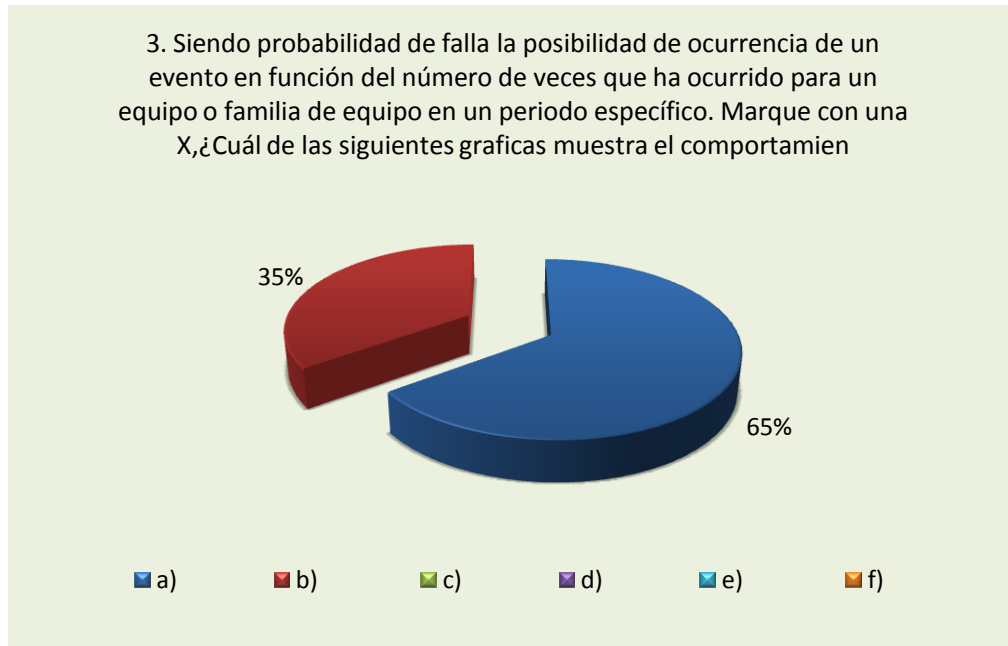
Se encontró que los técnicos difieren en la determinación de la distribución de probabilidad para los equipos de aire acondicionado, debido al desconocimiento en este tema.

Figura 13. Distribuciones de probabilidad de falla con respecto a su vida útil.



Fuente: *Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad. Moubay John.*

Figura 14. Respuestas a la pregunta 3 de la encuesta preliminar.



Fuente: *Resultados encuesta preliminar - Anexo 4.*

Después del análisis realizado a la encuesta preliminar se pudo concluir que el conocimiento que poseen los técnicos de la DMT para la determinación de las probabilidades de transición no es claro, por lo tanto es necesario esclarecer los conocimientos acerca de probabilidades, costo de mantenimiento y los factores que influyen en la toma de decisiones con respecto al estado del equipo, ya que

existe ambigüedad en cuanto a la diferenciación de estos por parte del personal encuestado.

Lo anterior generó la necesidad de utilizar una metodología que permitiera al personal técnico y profesional de la DMT definir las probabilidades según las propiedades de cadenas de Markov.

La metodología utilizada consistió en cuatro capacitaciones, las cuales permitieron aclarar la terminología usada en cadenas de Markov y unificar los criterios de decisión para determinar las probabilidades de la matriz de transición.

6.3 CAPACITACIONES

Las tres primeras capacitaciones tuvieron lugar en la sala de juntas de la DMT, y la cuarta se realizó en los talleres de refrigeración de la DMT. Las capacitaciones se realizaron los días 9 de Junio, 22 de Julio y 18 de Agosto y estuvieron avaladas por el Jefe de la División.

Así mismo, como sugerencia del Jefe de la División, las tres primeras capacitaciones no fueron realizadas únicamente para los técnicos del taller de refrigeración sino para todos los técnicos, los profesionales y el jefe de la DMT. La última capacitación contó con la participación de los técnicos de refrigeración y los autores del proyecto.

La primera capacitación consistió en la contextualización del tema del proyecto a realizar y la presentación formal del mismo, para que el personal de la DMT comprendiera la terminología manejada y la importancia de este para la División. Esta capacitación tuvo una duración de una hora, y los temas tratados fueron los siguientes:

1. Generalidades del mantenimiento.
2. Falla y probabilidades de falla.

3. Objetivo y justificación del proyecto a realizar.
4. Descripción y formulación del trabajo a realizar.
5. Etapas de las actividades a realizar.

La segunda capacitación tuvo una duración de una hora y tuvo como fin explicar lo concerniente a Cadenas de Markov. Los temas tratados dentro de esta capacitación fueron:

1. Introducción a las Cadenas de Markov.
2. Cadenas de Markov Discretas.
3. Ejemplos de Cadenas de Markov.
4. Representaciones grafica y matricial.

La tercera capacitación tuvo una duración de una hora, y tuvo como fin explicar los costos en los que se incurre al llevar a cabo las actividades de mantenimiento. Los temas tratados fueron:

1. Definiciones de costos.
2. Costos asociados al mantenimiento.
3. Comparación del plan anual de trabajo 2009 vs 2010 y su relevancia en costos para la DMT.
4. Comparativos anuales de costos de mantenimiento de los años 2007 a 2010.

Tras realizar la tercera capacitación, se evaluaron los conocimientos del personal técnico mediante un ejercicio práctico mostrado en el anexo 5, de cadenas de Markov resolviendo las dudas que había sobre el modelo y la forma como operarán las Cadenas de Markov.

En las tres primeras capacitaciones realizadas se tomó asistencia según el formato FRT.33 y se levantó el respectivo orden del día. Tales registros se

muestran en el anexo 6 y las diapositivas de las presentaciones de cada capacitación se encuentran en el anexo 7.

Posteriormente la cuarta capacitación estuvo a cargo de los técnicos de refrigeración de la DMT, y consistió en la explicación de los principios básicos de funcionamiento de los sistemas de refrigeración, sus componentes y generalidades de esta clase de equipo.

6.4 PROBABILIDADES DE LA MATRIZ DE TRANSICIÓN

Esta actividad se realizó con los técnicos de refrigeración por medio de una prueba grupal con el fin de dar a entender a los técnicos de mantenimiento los estados de la matriz, y el diligenciamiento de la misma en el modelo del proyecto. La prueba grupal realizada se muestra en el anexo 8.

Teniendo en cuenta lo anterior, la matriz que se usará para la realización del modelo de este proyecto para el tipo de aire acondicionado MINI-SPLIT, en la cual los estados que tienen una probabilidad asociada se encuentran en color verde, en caso contrario (no existe una probabilidad asociada) el espacio es de color blanco y su valor es cero. Lo anterior se observa en la Figura 15.

Figura 15. Representación de las situaciones para la matriz de probabilidad de transición.

	No se puede dar el caso, dadas las condiciones del problema en estudio. La posibilidad asociada es 0 (cero)
	Tiene una probabilidad asociada.

Fuente: Autores del proyecto.

6.5 SIMBOLOGÍA

La simbología utilizada en el desarrollo del modelo planteado se explica a continuación:

Tabla 9. Definición de la nomenclatura utilizada. (Parte A).

t	=	Periodo entre inspecciones.
n	=	Número de reparaciones del sistema antes de su última reparación.
N	=	Número limite de reparaciones del sistema.
s	=	Nivel de deterioro del sistema en funcionamiento en el tiempo t .
s'	=	Nivel de deterioro del sistema en funcionamiento en el tiempo $t+1$.
S	=	Nivel de deterioro final o fallo del sistema.
0	=	Nivel de funcionamiento ideal del sistema y/o sistema sin reparaciones.
(s, n)	=	Estado en el que se encuentra el sistema en funcionamiento, con un nivel de deterioro s y un número de reparaciones n , en un tiempo t .
(S, n)	=	Estado en el que se encuentra el sistema en fallo con un número n de reparaciones en un tiempo t .
(s, N)	=	Estado en el que se encuentra el sistema funcionando con el número limite de reparaciones en un tiempo t .
(S, N)	=	Estado en el que se encuentra el sistema en fallo con un número limite de reparaciones.
$P(s', n + 1 s, n)$	=	Probabilidad de la transición del sistema en un estado s' en un tiempo $t+1$, dado que estaba operando en un estado s en un tiempo t , con 1 reparación adicional.
$P(s', n s, n)$	=	Probabilidad de la transición del sistema de estar en un estado s' en un tiempo $t+1$, dado que estaba operando en un estado s en un tiempo t , con un mismo número de reparaciones n .

Fuente: Autores del proyecto.

Según lo anterior las posibles situaciones en las que se pueden encontrar probabilidades dentro de la matriz para el equipo se muestran en la Tabla 10, de manera abreviada, ya que la totalidad de la misma es demasiado extensa, por esta razón se utilizó el software de programación operacional y estadística

WINQSB³⁸ en el modulo de MARKOV PROCESS como ayuda para el registro y operación de las probabilidades.

Tabla 10. Matriz de probabilidad abreviada con los estados que presentan posibilidad de ocurrencia.

	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	8,11	8,12
0,0										
0,1										
0,2										
0,3										
0,4										
0,5										
0,6										
....										
8,11										
8,12										

Fuente: Autores del proyecto.

Tabla 11. Comportamiento según nivel de deterioro y número de reparaciones entre inspecciones.

Estado en el momento t	Estado en el momento $t+1$
Dado el estado (s,n) podemos tener	(s,n)
	$(s,n+1)$
	$(0,0)$
	(s',n)
	$(s',n+1)$

Fuente: Autores del proyecto.

³⁸ Programa: WINQSB, Modulo: MARKOV PROCESS, Version 1.0, Copyright © Yih – Long Chang.

Las probabilidades asociadas dentro de la matriz, presentan un comportamiento que depende de las condiciones de optimalidad según la decisión que se tome (Wait, Maintenance y Remplace) en el estado (s,n) en que se encuentre el equipo, como se puede ver en la tabla 11.

6.6 ESTABLECIMIENTO DE LAS PROBABILIDADES

Como lo describe Duffuaa Raouf³⁹ en su libro de sistema de mantenimiento planeación y control, las distribuciones de probabilidad son esenciales para la inferencia estadística y para el modelado de variables aleatorias que surgen en los problemas de mantenimiento, como el tiempo para la falla de los equipos y el tiempo para completar una tarea una tarea de reparación.

Por lo anterior y conociendo el tamaño de la matriz para los 117 estados (13.689 = 117 x 117), la cual no tiene probabilidad de ocurrencia en cada uno de los estados de transición como pudimos ver en la tabla 10, y aun así cuenta con un elevado número de estados con probabilidad de ocurrencia, se decidió junto con los técnicos del taller de refrigeración de la DMT, la formulación del comportamiento de las probabilidades de manera gráfica.

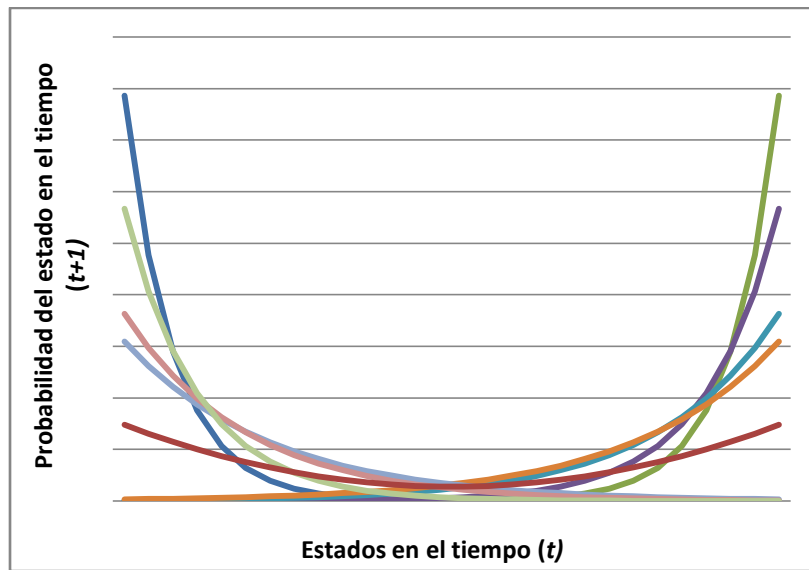
De esta manera se obtuvo que si analizáramos cada nivel de deterioro de manera constante, considerándolo como el estado actual del equipo. La probabilidad de estar en el mismo estado o en otro, sigue el comportamiento de una curva exponencial, donde la probabilidad de estar en su óptimo nivel de funcionamiento en el momento t y en el momento $t+1$ es alta, pero decrece conforme aumentan las reparaciones y posteriormente los niveles de deterioro.

Del mismo modo se puede observar como la probabilidad de ir a estados mejores en el tiempo $t+1$ disminuye conforme aumenta el nivel de deterioro y el número de reparaciones del estado en el tiempo t .

³⁹ Raouf Dixon, Duffuaa, Sistemas de Mantenimiento Planeación y Control, Editorial Limusa S.A. 2009, Pág. 389.

En el anexo 9 se muestran las distribuciones de probabilidad para cada nivel de deterioro y a continuación se muestra el comportamiento general de lo explicado anteriormente para todos los niveles de deterioro.

Figura 16. Comportamiento de la distribución de probabilidad para todos los niveles de deterioro.



Fuente: Autores del proyecto.

Una vez graficado y entendido el comportamiento se emprendió la tarea de registrar los valores dentro de la matriz de probabilidades que correspondieran a este comportamiento, y teniendo en cuenta que al sumar las probabilidades de la fila debe ser igual a uno. Esta matriz se realizó en la herramienta ofimática Excel como se muestra en el anexo 10.

El comportamiento de los valores descritos en la matriz de probabilidades se muestra en la figura 16.

Como se observó durante la determinación de las probabilidades de falla los equipos de aire acondicionado fallan con una distribución de probabilidad asociada, y se encontró que el par ordenado que conforma los estados de este modelo de Markov, en conformidad con el conocimiento de los técnicos, existe una

tendencia de encajar los datos de probabilidades con distribuciones como la exponencial.

La distribución exponencial representa los datos de tiempo para la falla cuando ésta es realmente aleatoria o cuando la tasa de fallas es constante. Tales fallas generalmente son resultado de una carga excesiva. Esta distribución es útil para modelar el tiempo para la falla de muchos componentes electrónicos y equipos industriales, que tienen tasas de fallas constantes.

Para calcular los valores de los estados de la matriz de transición se utilizó la transformación de funciones, tomando como base la ecuación de la función exponencial, $f(x) = \frac{1}{\lambda} e^{-x/\lambda}$ para $t \geq 0$, donde la media y la varianza son $\mu = \lambda$, $\sigma^2 = \lambda$. Los valores de x son igual al número de estados en el cual hay probabilidad de llegar, de acuerdo con las condiciones del modelo, y la sumatoria de probabilidades para todos los posibles estados debe ser igual a uno.

7. DEFINICIÓN Y METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS DEL MODELO DE MANTENIMIENTO

Con el fin de determinar los costos de mantenimiento se estableció la siguiente metodología:

- Definiciones.
- Parámetros.
- Simbología.
- Modelo y funciones de costo (W-R-M).
- Benchmarking para el mantenimiento de aires acondicionados tipo Mini-Split.

Las premisas necesarias para establecer el marco en el cual se desarrollara el modelo de costos cuenta con las variables: tiempo, niveles de deterioro, número de reparaciones y costos de mantenimiento.

7.1 DEFINICIONES

- **Periodo:** Es el intervalo de tiempo entre el instante de inspección t y el instante $t+1$.
- **Inspección:** Es la revisión llevada a cabo por los técnicos de mantenimiento para examinar el estado en que se encuentra el equipo en ese momento.
- **Nivel de funcionamiento normal:** Es la condición de operación del equipo dentro de los parámetros establecidos por el fabricante.
- **Nivel de deterioro:** Es la condición intermedia ente el nivel óptimo de funcionamiento y el nivel de falla del equipo. Durante esta condición el equipo funciona en condiciones diferentes a las normales.
- **Nivel de falla:** Es la condición final de un equipo en la cual este no funciona. Es el límite al que puede llegar un equipo en deterioro.
- **Estado del sistema:** Es la condición en la que se encuentra el equipo en un instante de tiempo dado, el cual está conformado por el nivel de deterioro y el número de reparaciones (s,n).

- **Probabilidad de transición:** Es la probabilidad de ir del estado i al estado j en n unidades de tiempo.
- **Decisión óptima:** Es la mejor decisión a tomar entre: reparar, reemplazar o dejar funcionando el equipo bajo las condiciones en las que se encuentra. Teniendo en cuenta que la mejor decisión es la que representa el menor costo dentro de los parámetros establecidos. Esta decisión es tomada por el responsable del proceso dentro del que se encuentra el equipo.
- **Ecuación de optimalidad:** Es la combinación de variables y parámetros que proporcionan un resultado óptimo en función del costo y las probabilidades de falla para la clase de equipo estudiado.
- **Costo de mantenimiento o reparación:** Es la suma de los factores (mano de obra, materiales, repuestos y costos indirectos) que intervienen para llevar a cabo esta tarea.
- **Costo de penalización por falla:** Es el costo en el que se incurre por el tiempo de indisponibilidad operativa del equipo generada a causa de la falla presentada en el mismo.
- **Costos de inspección:** Es el costo generado en la revisión de la condición del equipo por parte del personal técnico.
- **Costo de mantener funcionando:** Es el costo de mantener un equipo cumpliendo con su función, en la condición en que se encuentre.
- **Costos de reemplazo:** Es el costo incurrido cuando se da de baja un equipo en funcionamiento y se adquiere uno nuevo que lo sustituya.
- **Costos de mano de obra:** Es el costo generado por el personal encargado de realizar el mantenimiento.
- **Costos de materiales:** Son los costos causados por los materiales necesarios para poner en funcionamiento un equipo.
- **Costo de repuesto:** Es el costo de los nuevos componentes del equipo necesarios, para reemplazar los averiados y poner en funcionamiento nuevamente el equipo.

- **Costos indirectos:** Son aquellos costos necesarios para llevar a cabo el mantenimiento, que no forman parte de la mano de obra directa ni de los costos de materiales directos.

7.2 PARÁMETROS

- El estado del sistema está compuesto por el nivel de deterioro y el número de reparaciones. (s,n) .
- Los niveles de deterioro son crecientes, siendo cero el nivel ideal y S el nivel máximo de deterioro, estos niveles se dan en valores discretos.
- Existe una probabilidad de transición para los estados del sistema en un momento $t+1$ dado que estaba en un momento t .
- Cada nivel de deterioro puede suceder una o más veces durante la vida útil del equipo.
- La ocurrencia de los niveles de deterioro son independientes con una probabilidad asociada.
- Los niveles de deterioro no se presentan en un orden determinado.
- En los niveles de deterioro diferentes a uno (1), existen dos posibles opciones a tomar; realizar una reparación total o una parcial. Donde en la reparación parcial el nivel de deterioro del equipo disminuiría pero no sería igual a cero.
- Cada nivel de deterioro puede deberse a una o más causas de fallas, determinadas según los niveles de deterioro del equipo a estudiar.
- Existen tres decisiones posibles: esperar (W), reparar (M) y reemplazar (R), para cada los diferentes estados en los cuales se encuentre el equipo.
- Por cada inspección solo se puede tomar una decisión dentro de las tres posibles para cada estado en los que se encuentre el equipo.
- Solo se pueden realizar un número fijo de reparaciones entre inspecciones.
- Dados dos sistemas de funcionamiento con el mismo historial de reparaciones el sistema en el estado $s+1$ tiene más probabilidades de empeorar en el siguiente instante que el sistema en el estado s .
- Dados dos sistemas de funcionamiento con el mismo nivel de deterioro, el sistema con el mayor número de reparaciones efectuadas tiene más

probabilidad de empeorar en el siguiente instante que el mismo con un número menor de reparaciones durante su funcionamiento.

- Cada equipo tiene un tiempo de vida útil estimado.
- Una vez realizada una reparación el nivel de deterioro siguiente puede ser el mismo.
- Existen cuatro ecuaciones de optimalidad para los estados (s,n) , (S,N) , (s,N) y (S,n) respectivamente.
- Cuando se realizan mantenimientos el nivel de deterioro disminuye y el número de reparaciones aumenta en uno.
- Cada vez que el equipo falla se incurre en un costo de penalización por falla.
- Cada tarea de inspección tiene asociado un costo definido.
- Existe un costo de funcionamiento inmediato por dejar operar el sistema de un tiempo t a uno $t+1$.
- Reparar el sistema conlleva un costo dependiente del estado en el que se encuentre.
- El reemplazo del sistema conlleva un costo definido.
- Existe un costo asociado a la decisión de esperar.
- La decisión de reemplazar tiene en cuenta el número de reparaciones y el nivel de deterioro asociado a cada una de ellas, más el costo del nuevo equipo.
- La decisión de reparar tiene en cuenta, el número de reparaciones y el nivel de deterioro asociado a cada una de ellas, más el costo de la reparación para el nivel de deterioro actual.
- Es más costoso mantener operando el sistema conforme el nivel de deterioro aumenta.

7.3 SIMBOLOGÍA

Tabla 12. Definición de la nomenclatura utilizada. (Parte B).

Ψ	=	Niveles de deterioro del sistema.
Φ	=	Conjunto de niveles de funcionamiento del sistema.
Θ	=	Número de reparaciones del sistema.

$w(s, n)$	=	Total esperado de costos descontados correspondiente a la acción de esperar.
$\vartheta(s, n)$	=	Total mínimo esperado de costos descontados a partir del estado (s,n).
$\vartheta(0,0)$	=	Costo de poner en funcionamiento el equipo, después de reemplazarlo.
$\vartheta(0, n + 1)$	=	Costo de poner en funcionamiento de nuevo el equipo, después de repararlo.

Fuente: Autores del proyecto.

7.4 MODELO Y FUNCIONES DE COSTO

El modelo de costos se entiende como el método para analizar y explicar el entorno de los costos desde un punto de vista simplificado de la realidad, el cual se puede representar de forma verbal, matemática, gráfica o tabular.

De esta manera es necesario tener en cuenta el funcionamiento interno de la UIS en el cual las Unidades Académico Administrativas (UAA), pueden prestar servicios de extensión, docencia y/o investigación, según sea el caso. Donde la DMT brinda servicios de extensión a las demás UAA de la Universidad para el mantenimiento y verificación de los equipos, cuyo cobro es realizado de manera general y no particular. Así mismo, los cobros de los diferentes servicios que prestados no contabilizan la mano de obra, los materiales fungibles, ni los costos indirectos por órdenes de trabajo, realizando el costeo de los servicios de forma global.

Por otro lado se tiene en cuenta la formulación realizada por Murat Kurt, Jeffrey P. Kharoufeh⁴⁰ en su artículo publicado en la European Journal of Operational

⁴⁰ Murat Kurt, Jeffrey P. Kharoufeh, Optimally maintaining a Markovian deteriorating system with limited, imperfect repairs, Department of Industrial Engineering, University of Pittsburgh, European Journal of Operational Research 205 (2010) 368–380.

Research, que hace referencia a los costos de mantenimiento como componente de las Cadenas de Markov.

Este artículo indica que cada reparación devuelve el estado del sistema a las mejores condiciones de funcionamiento por una cantidad de tiempo, pero afecta la evolución del proceso de deterioro acelerando su movimiento hacia estados más degradados. Debido a la susceptibilidad de los sistemas al aumentar las degradaciones por causa de la reparación, solo está permitido realizar un número limitado de reparaciones N que para este proyecto se definió como $n = 12$, en el capítulo 5.

Así mismo, los autores plantean las siguientes ecuaciones de optimalidad, con sus respectivas demostraciones con el fin de caracterizar una política óptima.

$$\vartheta(s, n) = \min\{w(s, n), \vartheta(0, n + 1) + M, \vartheta(0,0) + R\} \quad \text{para } (s, n) \in \Phi \times \Theta' \quad (1a)$$

$$\vartheta(s, N) = \min\{w(s, N), \vartheta(0,0) + R\} \quad \text{para } s \in \Phi \quad (1b)$$

$$\vartheta(S, n) = \min\{ \vartheta(0, n + 1) + M, \vartheta(0,0) + R\} \quad \text{para } n \in \Theta' \quad (1c)$$

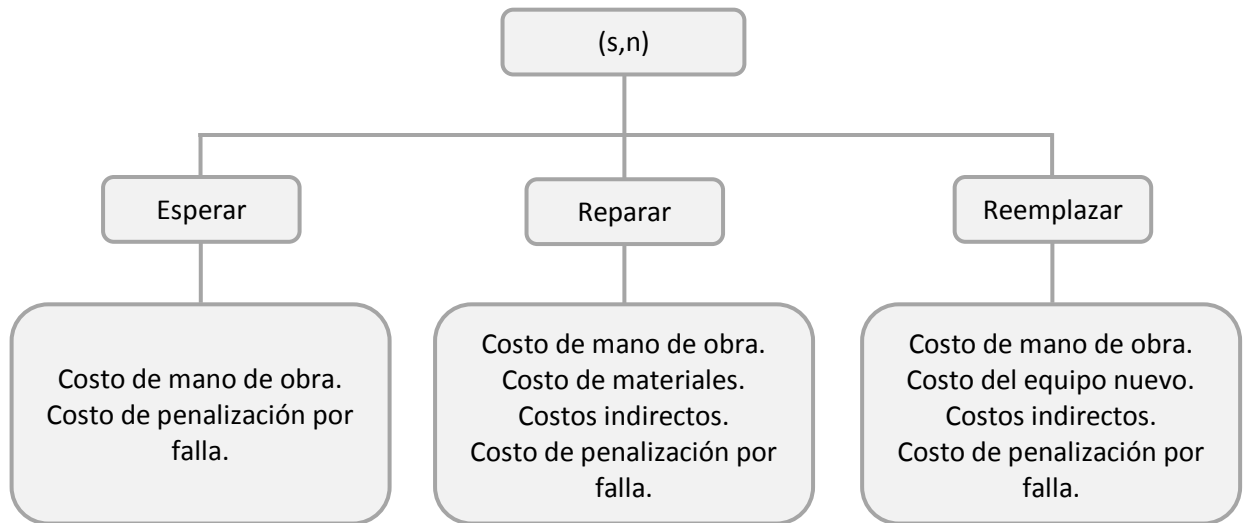
$$\vartheta(S, N) = \vartheta(0,0) + R \quad \text{para } (s, n) \in \Phi \times \Theta' \quad (1d)$$

De la misma manera aclaran que en el caso de que no se permitan reparaciones, es decir, $N = 0$, o $M = \infty$, las ecuaciones de optimalidad se reducen a las de un clásico problema de reemplazo óptimo de Cadenas de Markov, explicado brevemente en el capítulo 2 y que ha sido tratado anteriormente por varios autores en la Historia de la Investigación de Operaciones.

Las ecuaciones (1a), (1b), (1c) y (1d), representan los cuatro escenarios para la combinación de niveles de deterioro y número de reparaciones en cada estado, donde cada estado está conformado por la pareja ordenada (s,n) , al cual le corresponde un valor para la decisión de dejar funcionando, reparar o reemplazar, y estos valores a su vez están compuestos por el costo de la mano de obra, los

costos indirectos, los costos de materiales, los costos de funcionamiento y los costos de penalización por falla, como se observa a continuación.

Figura 17. Estructura de costos para el modelo de decisión de mantenimiento.



Fuente: Autores del proyecto.

Teniendo como base lo explicado anteriormente, se explican los tres ejes fundamentales de decisión, las definiciones y formulas de cálculo correspondientes.

7.4.1 Costo de esperar.

Este costo representa el valor en el que se incurre para que el equipo siga operando bajo las mismas condiciones, y esperar hasta la siguiente inspección para donde se determinará si es viable realizar o no, la reparación, el reemplazo, o si es el caso dejar funcionando otro periodo más.

Normalmente los equipos de aire acondicionado al comienzo de su tiempo estimado de vida útil, presentan una probabilidad de falla baja y los costos de funcionamiento en los que se incurre al comienzo de su tiempo estimado de vida son los especificados según el fabricante.

Por lo anterior, para la decisión de dejar funcionando un periodo más o esperar un periodo más, utilizaremos la notación $w(s,n)$ y gráficamente la representaremos con la palabra WAIT.

$$w(s,n) = (MO + CPF) \times APCF \quad (2a)$$

La ecuación (2a) agrupa los costos de la decisión de esperar, conformada por el costo de la mano de obra (MO), y el costo de penalización por falla (CPF). Cada uno de estos costos se encuentra en función del nivel de deterioro y el número de reparaciones según es el caso.

Las formulas de cálculo para resolver la ecuación (2a) son las siguientes:

- **Mano de obra**

Es valor del tiempo destinado por los técnicos para llevar a cabo la inspección del equipo para valorar la condición de estado actual. Para este cálculo es necesario conocer el salario de la persona encargada y el tiempo en horas utilizado en esta labor de inspección.

$$MO = TU \times PH \quad (2.1 a)$$

MO = Mano de Obra.

TU = Tiempo Utilizado.

PH = Precio de la Hora.

- **Costo de penalización por falla**

Es el valor en el que se incurre por la falla del equipo, teniendo en cuenta que durante el tiempo de espera hasta la próxima inspección el equipo puede fallar con una probabilidad dada que ocasionaría un costo no programado. Para el cálculo de este valor es necesario conocer el tiempo en horas, que demorará en realizar la reparación, el valor por concepto de perdidas en el proceso del cual

hace parte y el valor de los equipos o materiales que podrían verse afectados con el daño del equipo.

$$CPF = (CIO \times TIO) + CDC \quad (2.2 a)$$

CPF = Costo de Penalización por Falla.

CIO = Costo de Indisponibilidad Operativa.

TIO = Tiempo de Indisponibilidad Operativa.

CDC = Costo de Daño Colateral.

- **Aumento porcentual del costo de funcionamiento**

Este valor representa el incremento o decremento, generado por el costo de funcionamiento para continuar operando el equipo, conociendo su estado actual, de tal forma que si el equipo es el indicado para operar en el sitio instalado, el aumento será cero, pero si por el contrario no es el adecuado, entonces el aumento se dará en un porcentaje estimado junto con la ayuda de los técnicos del área de refrigeración.

El aumento porcentual de costo de funcionamiento (APCF) es un valor constante, que afecta el valor total de mantener el equipo funcionando bajo las condiciones actuales, en comparación con las condiciones ideales en las que podría funcionar.

7.4.2 Costo de reparar

Reparar un equipo implica dos situaciones, la primera corresponde a la reparación total del equipo para el nivel de deterioro en el que se encuentra, devolviéndolo a su nivel de funcionamiento óptimo. La segunda, corresponde a la reparación parcial de la clase del equipo para el nivel de deterioro en el que se encuentra, llevándolo a un nivel de deterioro menor pero no el óptimo.

En ambos casos se busca asegurar el funcionamiento del equipo, pero por la necesidad de poner en operación el equipo nuevamente, de evitar el tiempo de parada o por factores económicos se decide reparar parcialmente el equipo.

Los equipos de aire acondicionado una vez reparados vuelven a su estado de funcionamiento esperado, pero a medida que aumenta el número de reparaciones realizadas las averías comienzan a presentarse con mayor frecuencia, aumentando la periodicidad y el valor de los costos de reparación.

Teniendo en cuenta lo anterior, para la decisión de reparar, se utilizará la notación $\vartheta(0, n + 1) + M$ y gráficamente se representará con la palabra MAINTENANCE.

$$\vartheta(0, n + 1) + M = MO + CM + CI + CPF \quad (2b)$$

La ecuación (2b) agrupa los costos de la decisión de reparar, conformada por el costo de la mano de obra (MO), el costo de los materiales directos (CM), los costos indirectos (CI), y el costo de penalización por falla (CPF). Cada uno de los estos se encuentra en función del nivel de deterioro y del número de reparaciones según sea el caso.

Las formulas de cálculo para resolver la ecuación (2b) son las siguientes:

- **Mano de obra**

Es valor del tiempo destinado por los técnicos para llevar a cabo la inspección del equipo para valorar la condición de estado actual y la tarea de reparación necesaria. Para este cálculo es preciso conocer el salario de la persona encargada y el tiempo en horas utilizado en esta labor de inspección y reparación.

$$MO = TU \times PH \times APF \quad (2.1 b)$$

MO = Mano de Obra.

TU = Tiempo Utilizado.

PH = Precio de la Hora.

- **Costo de materiales**

En el caso de llevar a cabo la reparación, los repuestos necesarios serán tratados como aquellos materiales utilizados.

$$CM = CR \quad (2.2 b)$$

CM = Costo de Materiales.

CR = Costo del Repuesto.

- **Costos indirectos**

En el caso de llevarse a cabo la tarea de reparación, los elementos que se utilicen como grasas, desincrustantes, aceites u otros materiales fungibles se trataran como costos indirectos necesarios para llevar a cabo el mantenimiento.

$$CI = MF \quad (2.3 b)$$

CI = Costos Indirectos.

MF = Material Fungible.

- **Costo de penalización por falla**

Es el valor en el que incurre por la reparación del equipo, teniendo en cuenta que durante el tiempo de espera hasta poner el equipo en funcionamiento ocasiona una falta de producción o de prestación del servicio. Para el cálculo de este valor es necesario conocer el tiempo en horas, que demora realizar la reaparición y el valor por concepto de perdidas en el proceso del cual hace parte.

$$CPF = (CIO \times TIO) + CDC \quad (2.4 b)$$

CPF = Costo de Penalización por Falla.

CIO = Costo de Indisponibilidad Operativa.

TIO = Tiempo de Indisponibilidad Operativa.

CDC = Costo de Daño Colateral.

7.4.3 Costo de reemplazar

Reemplazar un equipo implica como su nombre lo indica, cambiar el equipo antiguo por uno nuevo. En algunos casos esta decisión conlleva un trabajo de desmontaje que varía según la complejidad del equipo a reemplazar, y a su vez en algunos casos implica un trabajo de puesta en marcha que varía según las especificaciones o necesidades de adecuación del nuevo equipo a instalar.

En el caso de los equipos de aire acondicionado estos valores de costo pueden variar de un tipo de equipo a otro dependiendo de la complejidad, capacidad y ubicación del mismo. Teniendo en cuenta lo anterior, para la decisión de reemplazar, se utilizará la notación $\vartheta(0,0) + R$ y gráficamente se representará con la palabra REEMPLACE.

$$\vartheta(0,0) + R = MO + CE + CI + CPF \quad (2c)$$

La ecuación (2c) agrupa los costos de la decisión de reemplazar, conformada por el costo de la mano de obra (MO), el costo del equipo nuevo (CE), los costos indirectos (CI), y el costo de penalización por falla (CPF), que varían en función del nivel de deterioro o el número de reparaciones según sea el caso.

Las formulas de cálculo para resolver la ecuación (2c) son las siguientes:

- **Mano de obra**

Es valor del tiempo destinado por los técnicos para llevar a cabo la inspección del equipo para valorar la condición de estado actual y la tarea de reemplazo necesaria. Para este cálculo es preciso conocer el salario de la persona

encargada y el tiempo en horas utilizado en esta labor de inspección y reemplazo.

$$MO = TU \times PH \times APF \quad (2.1 c)$$

MO = Mano de Obra.

TU = Tiempo Utilizado.

PH = Precio de la Hora.

- **Costo del equipo nuevo**

Cuando la decisión conlleve a reemplazar el equipo se tendrá en cuenta para este valor el costo del nuevo equipo a instalar para reemplazar el anterior.

$$CM = CE \quad (2.2 c)$$

CM = Costo de Materiales.

CR = Costo del Equipo nuevo.

- **Costos indirectos**

En el caso de llevarse a cabo la tarea de reemplazo, los elementos que se utilicen para la adecuación de la nueva instalación del equipo como partes metálicas, piezas eléctricas o pintura, entre otros materiales fungibles se trataran como costos indirectos necesarios para llevar a cabo el reemplazo del equipo.

$$CI = MF \quad (2.3 c)$$

CI = Costos Indirectos.

MF = Material Fungible.

- **Costo de penalización por falla**

Es el valor en el que incurre por el reemplazo del equipo, teniendo en cuenta que durante el tiempo de espera hasta poner el equipo en funcionamiento,

ocasiona una falta de producción o de prestación del servicio. Para el cálculo de este valor es necesario conocer el tiempo en horas, que demora realizar la nueva instalación y el valor por concepto de pérdidas en el proceso del cual hace parte.

$$CPF = (CIO \times TIO) + CDC \quad (2.4 c)$$

CPF = Costo de Penalización por Falla.

CIO = Costo de Indisponibilidad Operativa.

TIO = Tiempo de Indisponibilidad Operativa.

CDC = Costo de Daño Colateral.

7.5 BENCHMARKING PARA EL MANTENIMIENTO DE AIRES ACONDICIONADOS TIPO MINI-SPLIT

La determinación de los valores para establecer la política de mantenimiento, a través del uso de las ecuaciones de costo propuestas, utilizó el benchmarking, como un proceso sistemático continuo para evaluar productos, servicios y el proceso de trabajo de las organizaciones reconocidas por presentar las mejores prácticas, con fines de mejorar la organización, como lo define Duffuaa Raouf.⁴¹

Con la participación de los técnicos de la DMT, y la colaboración de empresas dedicadas a la reparación y mantenimiento de equipos de aire acondicionado como: Secar Ingenieros S.A., Aire acondicionado Servimontajes, Enfrío y Refrigeración del Sur, quienes a través de cotizaciones vía e-mail aportaron los valores necesarios para la definición del modelo de costos.

Dicha información se muestra en el anexo 11, donde se calculan adicionalmente los valores de costos. Por otro lado, la función de costos para cada una de las

⁴¹ Raouf Dixon, Duffuaa, Sistemas de Mantenimiento Planeación y Control, Editorial Limusa S.A. 2009, Pág. 368.

decisiones cuenta con un comportamiento monótono no decreciente, que varía en función de los estados (s,n).

Los estados como se describen para este proyecto (s,n) y la formulación de la política, están sujetos a las condiciones de las ecuaciones (1a), (1b), (1c) y (1d) establecidas por Murat Kurt⁴² y Jeffrey P. Kharoufeh, que a continuación se explica gráficamente:

Figura 18. Comportamiento según las ecuaciones (1a), (2b), (3c) y (4d).

(0,0)	(0,12)
(s,n)	(s,N)
(8,0)	(8,12)
(S,n)	(S,N)

Fuente: Autores del proyecto.

En las dos secciones superiores se encuentran los estados en los cuales los equipos a pesar de tener un nivel de deterioro y cierto número acumulado de reparaciones, el equipo aun puede funcionar un periodo mas pero no bajo los estándares para los cuales fue fabricado. En las dos secciones inferiores se muestran los estados en los cuales el equipo no funciona y por tanto requiere una reparación o reemplazo.

7.6 EXPLICACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL COSTO DE FUNCIONAMIENTO

Para la decisión de esperar inicialmente se tuvieron en cuenta los costos por mano de obra, costo de materiales, costos de penalización por falla y los costos

⁴² Murat Kurt, Jeffrey P. Kharoufeh, Optimally maintaining a Markovian deteriorating system with limited, imperfect repairs, Department of Industrial Engineering, University of Pittsburgh, European Journal of Operational Research 205 (2010) 368–380.

indirectos, y se determinaron a través de la metodología del benchmarking los costos asociados a estos componentes.

La representación gráfica de los costos para la política de mantenimiento no fue la esperada, ya que al validarla con los técnicos, ellos manifestaron que la gráfica según su criterio técnico no era una representación fiable de la realidad del comportamiento de las decisiones, para el tipo de equipo objeto de análisis. Por lo tanto, se hizo evidente que al modelo de costos que representaba la gráfica, le hacía falta un componente en una de las decisiones de costos, que permitiera obtener la representación gráfica esperada por los técnicos.

Mediante la socialización del trabajo realizado se encontró que el componente faltante estaba relacionado con el costo de la decisión de esperar, más exactamente con el costo de funcionamiento del equipo, debido a que, en la medida en que el equipo pasaba a estados peores, el costo de funcionamiento se incrementaba, pero no se conocía el porcentaje de aumento del mismo.

Conocer el porcentaje de aumento o disminución del costo de funcionamiento representó una limitación debido a que su cálculo requería una medición exacta equipo por equipo del consumo de energía, del tiempo utilizado y el costo por unidad de energía.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propuso junto con los técnicos del taller de refrigeración de la DMT el APCF, (Aumento Porcentual del Costo de Funcionamiento), el cual explica el aumento en costo de funcionamiento y representa el ajuste necesario para la política de mantenimiento.

El resultado de esta propuesta fueron valores para cada estado de la matriz, sin que la cantidad de estados influyeran en esta constante de ajuste, es decir el valor de la constante hallada es el mismo para cada fila de las diferentes tablas de costos. Lo anterior se puede ver en la tabla de costos del anexo 11.

8. DEFINICIÓN DE LA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO

La definición de la política de mantenimiento para una clase de equipo de aire acondicionado tipo Mini-Split, se compone de tres decisiones analizadas anteriormente desde el punto de vista de costos, a las cuales se les realizará el análisis de sensibilidad por medio de las probabilidades definidas en el capítulo 5. Dicho análisis permitió la obtención del modelo de decisión secuencial que busca la reducción de los costos de mantenimiento preventivo y correctivo del equipo, aportando las herramientas necesarias para las decisiones de reparar, reemplazar o dejar funcionando un período más esta clase de equipo.

La definición de la política se lleva a cabo a través de la siguiente metodología:

- Iteración de las probabilidades y costos en el software WINQSB.
- Resultados de la iteración.
- Definición de las inspecciones e intervenciones para la clase de equipo de aire acondicionado.

8.1 ITERACIÓN DE PROBABILIDADES Y COSTOS EN EL SOFTWARE WINQSB

El proyecto realizado determina una cantidad de estados compuestos por dos factores (s,n) , siendo estos valores los máximos permitidos para el nivel de deterioro s y el número de reparaciones n respectivamente ($s=8$ y $n=12$). Adicionalmente se conoce el costo total por cada estado posible dentro de la matriz de probabilidades y las probabilidades asociadas.

A través del uso del software WINQSB y el modulo correspondiente a *Markov Process* se determinaron las probabilidades de estado estable, que asociadas al costo del estado arrojan el valor total de la política aplicada, siendo este valor el esperado una vez aplicada dicha política de mantenimiento.

Así mismo, se realizó la variación de la cantidad de niveles de deterioro y cantidad de reparaciones, con el fin de determinar si la configuración para una política que establece ocho niveles de deterioro y doce reparaciones permitidas, para una clase de equipo antes de ser reemplazado es la óptima, y observar el comportamiento del costo total de las diferentes propuestas de política formuladas.

Por lo anterior se propuso variar el valor de los factores utilizados (s,n), manteniendo constante el nivel de deterioro s y variando el número de reparaciones n, y posteriormente se varió, el nivel de deterioro reduciéndolo hasta tres niveles, para un máximo de 8, 9, 10 y 11 en cada caso, de la siguiente manera:

Tabla 13. Variación y comparación de la política de costos.

Política propuesta	Nivel de deterioro	Número de reparación	Cantidad de estados
1	8	12	117
2		11	108
3		10	99
4		9	90
5		8	81
6	7	12	104
7		11	96
8		10	88
9		9	80
10		8	72
11	6	12	91
12		11	84
13		10	77
14		9	70
15		8	63

Fuente: Autores del proyecto.

Para llevar a cabo la variación de los niveles de deterioro se retiró de la distribución de niveles de deterioro, los niveles 1 y 2, incluyéndose estos mismos dentro del siguiente nivel como un conjunto, ya que estos dos niveles

mencionados permiten el funcionamiento del equipo sin que representen mayor costo, siendo coherente con el fin del modelo al contemplar los costos que afecten en mayor medida al mantenimiento del equipo.

Del mismo modo, fue necesario realizar la distribución de probabilidad a cada política propuesta dentro de las 15 posibles combinaciones contempladas como se muestra en el anexo 10 y los costos asociados a estas probabilidades como se mostradas en el anexo 11. Esta información permitió establecer las probabilidades de estado estable mencionadas en el anexo 12 y por consiguiente el costo total esperado de las políticas propuestas explicadas en el siguiente numeral.

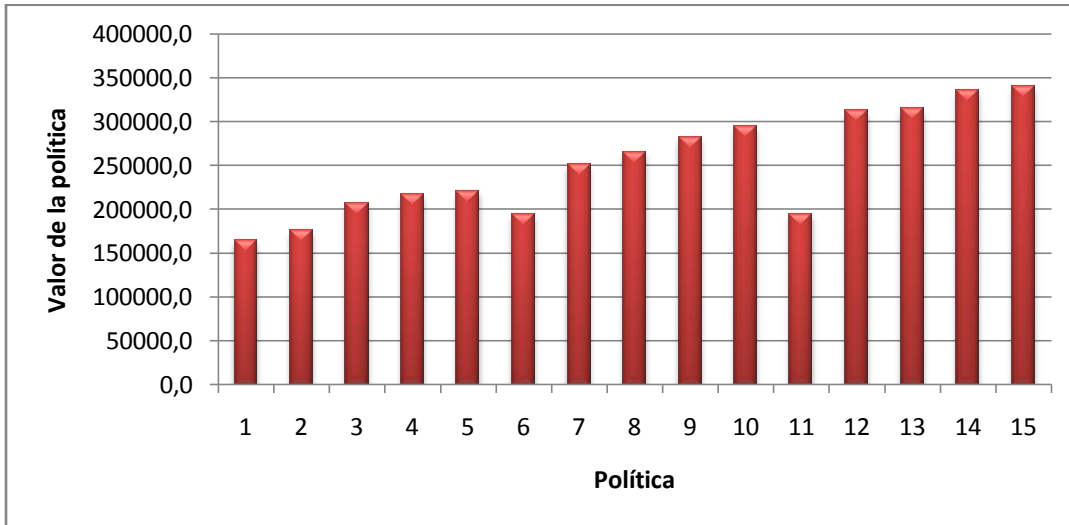
8.2 RESULTADOS DE LA ITERACIÓN EN EL SOFTWARE WINQSB.

La variación de las políticas de mantenimiento para el caso en el cual se mantuvo constante el nivel de deterioro muestra una variación creciente después de la cantidad de reparaciones $n = 11$, debido a que al disminuirse el número de reparaciones permitidas ($n = 12, 11, 10, 9$ y 8), las decisiones de reparar y reemplazar ocurren más rápido a lo largo del tiempo, y la decisión de esperar se reduce, representando un aumento en los costos de la política de mantenimiento conforme disminuye la cantidad de reparaciones.

Por otro lado, se tiene la variación de los niveles de deterioro, que disminuyen desde ($s = 8, 7$ y 6), y cuyo costo aumenta conforme disminuye s . Esto se explica por la definición de los niveles de deterioro, ya que al considerar niveles de deterioro acumulados, el costo en el que se incurre por cada estado aumenta conforme más componentes de falla se presentan. De la misma manera si se discrimina en exceso la cantidad de componentes a reparar, el costo de la política aumentar al acumular costos excesivos de mantenimiento.

El anexo 13 muestra la variación grafica de las políticas propuestas, observándose la tendencia de cada una. Así mismo, el valor total de cada política se grafica a continuación:

Figura 19. Variación de los costos para las políticas propuestas.



Fuente: Autores del proyecto

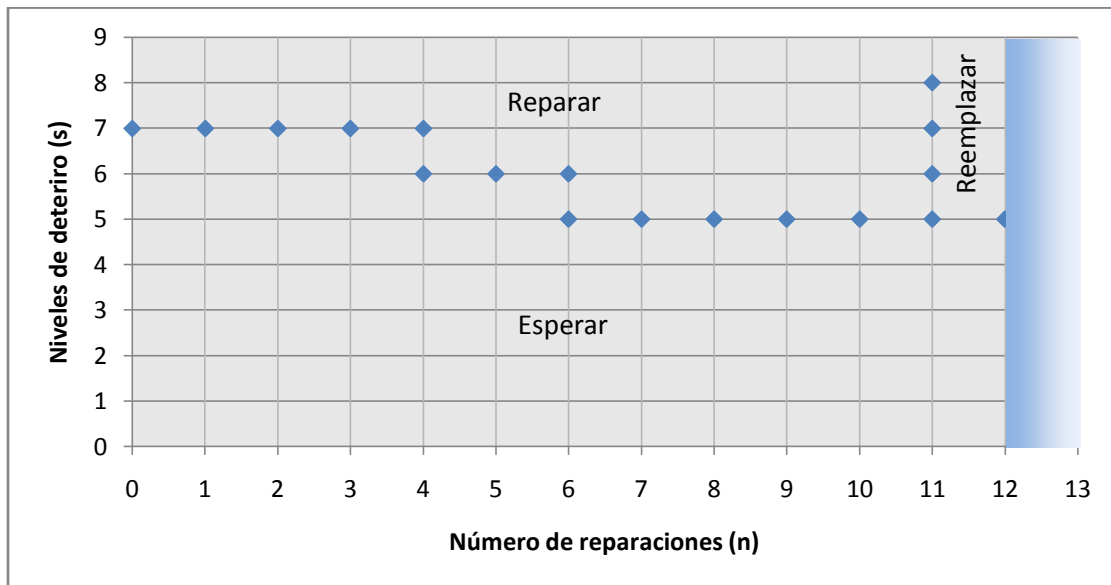
Tabla 14. Valores de los costos para las políticas propuestas.

Política numero	Nivel de deterioro	Numero de reparación	Cantidad de estados	Costo por política
1	8	12	117	164619,2
2	8	11	108	176237,6
3	8	10	99	206421,9
4	8	9	90	217270,0
5	8	8	81	221251,0
6	7	12	104	194567,7
7	7	11	96	251402,5
8	7	10	88	265715,6
9	7	9	80	282193,2
10	7	8	72	295159,4
11	6	12	91	194567,7
12	6	11	84	312863,6
13	6	10	77	315634,6
14	6	9	70	335575,4
15	6	8	63	340195,6

Fuente: Autores del proyecto

Tras realizar la comparación entre los costos de las diferentes políticas se obtuvo que el menor costo lo proporciona la política ($s = 8, n = 12$) como se muestra en la figura 20, lo cual proporciona estados de decisión como se mostrados a continuación:

Figura 20. Política de mantenimiento (8,12).



Fuente: Autores del proyecto.

La figura 20 muestra que para cada número acumulado específico de reparaciones hay un estado de deterioro en el cual es óptimo reparar o reemplazar el equipo. Así mismo informa que a medida que se repara el equipo, aumenta la posibilidad de reemplazarlo o reparado la siguiente vez. Por ejemplo, para un estado de deterioro que corresponde a 4, esperar es solo óptimo si el equipo se ha reparado tres veces o menos. Cabe tener en cuenta que al equipo se le realicen las inspecciones según lo programando de manera que no se agoten todas las opciones de reparación y espera, con el fin de permitir un máximo de doce reparaciones.

Por consiguiente, una porción de la región de la política óptima no es funcional para un equipo que se ha reparado doce veces. En otras palabras, un equipo que empieza con cero o menos de siete reparaciones se comporta óptimamente,

porque el sistema se encuentra en operación y para más de doce reparaciones no se espera que el sistema este en uso. La región sombreada muestra esta porción de la política óptima, en la que el equipo sale del alcance del modelo propuesto.

8.3 INSPECCIONES PARA LA CLASE DE EQUIPO

Para llevar a cabo las inspecciones de un equipo de aire acondicionado se aplicó el modelo propuesto por la terotecnología, propuesto en el capítulo 2 del presente proyecto. Por lo anterior las inspecciones programadas para los equipos de aire acondicionado se definen de la siguiente manera:

8.3.1 Inspecciones e intervenciones programadas

Las inspecciones según manuales, fichas técnicas del equipo y el conocimiento de los técnicos consisten en:

- Lectura de amperajes y voltajes de todos los elementos del equipo, como son motores y moto-compresores.
- Estado de los controles de presión y temperatura y pruebas de rutina a fin de evaluar el funcionamiento del equipo.
- Estado de los serpentines e intercambiadores, en cuanto grado de incrustación por deterioro por corrosión o manipulación poco adecuada.
- Chequeo de fugas de refrigerante a tuberías y accesorios de las líneas de refrigerante.
- Análisis de ruidos y supresión de aquellos que no son propios del funcionamiento.
- Inspección de los filtros de aire.
- Inspección de compuestos metálicos y latonería.
- Evaluación de los sistemas de aislamiento térmico tanto de equipos como de conductos de ventilación.

Al analizar los resultados de estas inspecciones se puede llegar a facilitar y determinar cuáles son los ajustes, las actividades de mantenimiento correctivo o preventivo a efectuar.

Dado el caso de que sea necesario realizar una actividad de mantenimiento se realizaran los siguientes mantenimientos:

- Componentes eléctricos:

Ajustes de conexiones eléctricos en la acometida de potencia.

Ajuste por revisión de controles de presión y temperatura.

Ajustes por limpieza de los motores compresores y ventiladores, entre otros.

- Componentes mecánicos:

Lavado de filtros.

Lavado de serpentines del evaporador y condensador.

Comprobación de presiones, nivel de aceite, temperaturas.

Verificación, ajuste o cambio si fuera el caso de la tornillería.

9. INDICADORES DE SEGUIMIENTO PARA LA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO

La política de mantenimiento propuesta en este proyecto de grado analiza la variación en costo y las probabilidades de ocurrencia de falla de los equipos de aire acondicionado, pero no cuenta con herramientas que permitan evaluar la gestión realizada por la DMT las cuales son necesarias para verificar la eficiencia de la política formulada.

Teniendo en cuenta lo anterior y con el fin de verificar la eficacia de la política de mantenimiento, la DMT cuenta con la información proveniente de la cantidad de solicitudes de mantenimiento total realizadas que se registran en el SIMAT, vía memorando, formato FRT.03, formato FRT.04, formato FRT.19, formato FRT.08 y formato FRT.11, la cual permite el planteamiento de indicadores de desempeño en función de las solicitudes generadas por mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo y metrología.

La DMT presenta el Programa Anual de Mantenimiento 2011, dentro del cual se incluyen los laboratorios en vía de acreditación con base en la norma ISO 17025:2005, los cuales solicitan las actividades de mantenimiento antes mencionadas a la DMT, con el fin de cumplir los requerimientos de la norma.

Estos laboratorios ofrecen servicios de investigación y extensión, que representan una importante fuente de ingresos para la UIS, dentro de las actividades realizadas en investigación se desarrollan proyectos que cuentan con el apoyo económico de COLCIENCIAS.

Este proyecto se aplicó para los equipos de aire acondicionado tipo Mini-Split, los cuales son de suma importancia para el normal funcionamiento de los laboratorios, ya que en el numeral 5.3 Instalaciones y Condiciones Ambientales de la Norma ISO 17025:2005, se establece que las condiciones ambientales dentro de los laboratorios deben garantizar la confiabilidad de los resultados emitidos para los ensayos realizados, para lo cual se requiere que tanto los equipos como las muestras no se vean afectadas por las condiciones ambientales.

Dentro de las variables a controlar por los laboratorios, se encuentran la temperatura y la humedad, para lo cual se utilizan equipos de aire acondicionado tipo Mini-Split, y para verificar el rango permitido de temperatura y humedad se utilizan termohigrómetros.

Los indicadores que se formulan a continuación serán aplicados inicialmente en dichos laboratorios por la importancia que representan para la UIS.

Por lo anterior, se espera que para garantizar el cumplimiento de los requisitos establecidos en la norma se haga uso de la política propuesta, en la cual se establece que el equipo sea inspeccionado una vez al año y que entre una inspección y otra el equipo sea reparado dos veces máximo, ya que históricamente no suceden más de dos fallas en el equipo, pero dado el caso en que esto sucediera el equipo saldrá del alcance de la definición de la política de mantenimiento planteada en este proyecto.

9.1 INDICADORES

- **Costo de mantenimiento correctivo.**

Este indicador busca medir de forma trimestral el costo de los mantenimientos correctivos realizados por la DMT, por medio de la información proveniente del

Sistema de Información Mantenimiento Tecnológico (SIMAT), Equipos no incluidos en el SIMAT y Vía memorando.

- **Solicitudes de mantenimiento correctivo.**

Este indicador busca medir de forma trimestral la cantidad de mantenimientos correctivos realizados por la DMT, por medio de la información proveniente del Sistema de Información Mantenimiento Tecnológico (SIMAT), Equipos no incluidos en el SIMAT y Vía memorando.

- **Tiempo de respuesta de mantenimiento correctivo.**

Este indicador busca medir de forma trimestral el tiempo promedio para dar cumplimiento a las solicitudes de mantenimientos correctivos realizados por la DMT, por medio de la información proveniente del Sistema de Información Mantenimiento Tecnológico (SIMAT), Equipos no incluidos en el SIMAT y Vía memorando.

Estos indicadores tienen como fin analizar el comportamiento del mantenimiento correctivo y preventivo, ya que busca verificar que los mantenimientos preventivos sean mayores que los mantenimientos correctivos.

9.2 DEFINICIÓN DE LOS COMPONENTES DEL FORMATO DE INDICADORES


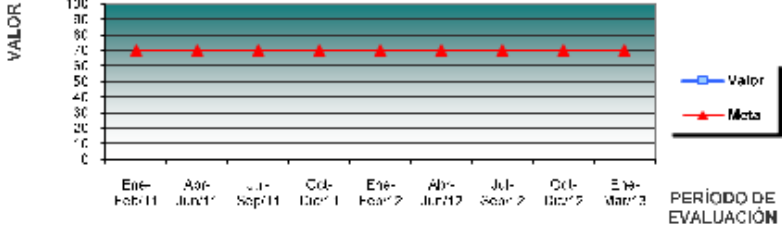
Para la formulación de los indicadores propuestos anteriormente se utilizó el formato de Seguimiento Institucional FSE.10 que forma parte del Sistema de Gestión de Calidad de la UIS, con el fin de facilitar la comprensión, aplicación y medición de los indicadores. Los componentes del formato de indicadores como se muestra en la figura 22 y son explicados a continuación:

- **Proceso:** Es el proceso dentro del cual se mide el indicador. Los procesos están definidos en el mapa de procesos de la UIS, que para este caso es el proceso de Recursos Tecnológicos.
- **Subproceso:** Es el proceso dentro de la DMT en el cual se encuentra el indicador.
- **Nombre del indicador:** Es el nombre que se le asigna para ser tenido en cuenta dentro del inventario de indicadores del proceso.
- **Tipo de indicador:** Corresponde a la denominación para el tipo de indicador que puede ser de eficiencia, eficacia o efectividad.
- **Objetivo:** Es el fin para el cual se diseña el indicador.
- **Meta:** Corresponde a al valor numérico que se busca con la medición del indicador.
- **Método del cálculo:** Es la fórmula matemática con la cual se determina el valor para el indicador.
- **Unidad:** Es la cantidad estandarizada para una determinada magnitud.
- **Ponderación:** Corresponde al porcentaje de importancia asignado dentro del total de los indicadores del proceso.
- **Frecuencia de medición:** Es cada cuanto se realiza la medición del indicador.
- **Fuente de datos:** Son los registros o documentos de los cuales se obtendrá la información para el cálculo del indicador.
- **Responsable de medición:** Corresponde al cargo de la persona encargada de llevar a cabo el cálculo y seguimiento del indicador.
- **Periodo de seguimiento:** Es el periodo de tiempo dentro del cual se hará la medición.
- **Resultados:**
 - **Grafica:** Es la representación grafica de los datos obtenidos para el periodo medido.

- **Observaciones:** Es el análisis de los resultados obtenidos para el periodo.
- **Acción formulada:** en caso de que el indicador este por debajo de la meta se formula una acción que busque mejorar el resultado del indicador.
- **Responsable:** Es el cargo de la persona que formula la acción a tomar.
- **Registro:**
 - **Valor:** Es el valor del indicador para el periodo de medición.

Los indicadores propuestos se evalúan trimestralmente y se entregan a la dirección de control interno y la coordinación de calidad de la UIS, realizados en la herramienta ofimática Excel como se muestran en el anexo 14.

Figura 21. Formato de indicadores.

		SEGUIMIENTO INSTITUCIONAL					Código: FSE.10					
		INFORME DE DESEMPEÑO DE LOS PROCESOS					Versión: 04					
PROCESO	RECURSOS TECNOLOGICOS	SUBPROCESO	N.A.									
DESEMPEÑO DEL PROCESO												
1. COMPORTAMIENTO DE INDICADORES												
NOMBRE DEL INDICADOR	Tiempo de respuesta de mantenimiento correctivo		TIPO DE INDICADOR	Efectividad	OBJETIVO	Medir el tiempo promedio utilizado para dar cumplimiento a las solicitudes de Mantenimiento Correctivo						
Meta	70%	Método de Cálculo	(Total de tiempo utilizado en Mantenimientos Correctivos Cumplidos / Total de Solicitudes de Mantenimiento Cumplidas)		Unidad	%	Ponderación					
Frecuencia de medición	Trimestral	Fuente de Datos	Sistema de Información Mantenimiento Tecnológico (SIMAT), E quipos no incluidos en el SIMAT, Via memorando.		Responsable de medición	Profesional DMT	Periodo de seguimiento*					
RESULTADOS												
					OBSERVACIONES:							
					ACCIÓN FORMULADA:							
					RESPONSABLE							
	Ene-Feb/11	Abr-Jun/11	Jul-Sep/11	Oct-Dic/11	Ene-Feb/12	Abr-Jun/12	Jul-Sep/12	Oct-Dic/12	Ene-Mar/13			
VALOR												
META**	70	70	70	70	70	70	70	70	70			

* El periodo de seguimiento hace referencia al tiempo del reporte del informe de desempeño (trimestre evaluado)

** La meta cuando sea parcial debe ser registrada en el campo de observaciones

Fuente: Sistema de Gestión de Calidad de la UIS.

10. CONCLUSIONES

La principal conclusión alcanzada en este trabajo refleja que una adecuada política de mantenimiento permite determinar los valores que pueden ayudar a la toma de decisiones en mantenimiento. Sin embargo para alcanzar este propósito se plantean dos problemas, por una parte el modelo matemático de costos que se aplica al equipo en estudio y en el que se apoya la toma de decisiones, el cual debe ser simple y ajustarse lo más posible al comportamiento real, si se quieren obtener resultados fiables. Por otro lado surge el problema de una correcta recogida de datos y su respectivo análisis.

De una forma más general el trabajo arroja las siguientes conclusiones:

- A partir del análisis Pareto realizado a los equipos de infraestructura de la UIS, a los cuales se les realiza mantenimiento, la DMT puede obtener información veraz y actual, de los equipos que requieren mayores costos de mantenimiento correctivo y/o preventivo. Dicha información es de vital importancia para la gestión de mantenimiento realizada por la DMT.
- Al considerar un equipo como el total de la suma de sus componentes, se puede establecer una cantidad límite de niveles de deterioro y un número límite de reparación para estos componentes, y de esta manera analizar el comportamiento evolutivo del equipo permitiendo una mejor administración de las decisiones a tomar.
- El estudio del comportamiento que puede presentar un equipo de aire acondicionado a través del tiempo, representa para el diseño de una política de mantenimiento el reto más grande, ya que estas determinan en gran medida la confiabilidad del mismo.

- Del mismo modo que la obtención de las probabilidades, un modelo de costos adecuado y viable constituye el eje fundamental de desarrollo de la política de mantenimiento, que tiene como fin ayudar a la DMT en la administración de sus recursos económicos e implícitamente de su recurso humano.
- La implementación de la política de mantenimiento propuesta representa una herramienta teórico-práctica, útil y confiable, que busca asegurar el funcionamiento del equipo objeto de análisis, al unir algunas de las teorías de investigación de operaciones y mantenimiento de equipos, estudiadas a través de la carrera de Ingeniería Industrial.
- Una vez aplicada la política propuesta es necesario verificar la eficacia de esta, ya que es importante para la DMT contar con el sistema de indicadores que permita realizar la revisión continua tanto en costos, como en solicitudes evidenciando la mejora de sus procesos.
- Por otro lado la revisión bibliográfica de los trabajos de investigación, proyectos y artículos en el campo de los modelos cuantitativos de mantenimiento muestra que la mayor parte de los trabajos publicados hasta la fecha se ha realizado con propósitos teóricos. En los cuales se explora el comportamiento matemático del modelo probabilístico para distintas combinaciones de mantenimiento, pero no se ha aplica concretamente a un equipo. Así mismo los trabajos existentes no presentan una metodología establecida para la toma de datos y su análisis antes de plantear los escenarios posibles para el mantenimiento del equipo.

11. RECOMENDACIONES

- Con respecto al modelo se recomienda que la DMT realice el inventario de equipos de aire acondicionado tipo Mini-Split, identificando la cantidad de equipos por estados (s,n), como se definió a través de este proyecto, de manera que utilizando los costos para las decisiones a tomar, se establezca el presupuesto anual esperado para las decisiones de reparar, reemplazar y esperar.
- Este proyecto, como herramienta para la toma de decisiones de reparar, reemplazar o mantener funcionando una clase de equipo, teniendo en cuenta su estado actual, recomienda ampliar el alcance de su aplicación para aquellos equipos hallados dentro del análisis Pareto, mostrado en el anexo 1 del presente proyecto.
- La DMT como responsable del mantenimiento y funcionamiento de los equipos de infraestructura, debería ser el responsable de la formulación o determinación del plan anual de mantenimiento para los equipos de los laboratorios que se encuentran en vía de acreditación en la norma ISO 17025:2005, asesorando dichos laboratorios, teniendo en cuenta la complejidad de sus procesos.
- La DMT como proceso de Recursos Tecnológicos dentro del Sistema de Gestión de Calidad para las normas ISO 9001:2008 y GP1000:2009, tiene una oportunidad de mejora en la observación hecha por el ICONTEC en la visita de recertificación realizada en el primer semestre del año 2010, la cual es: "La observación es: La medición de los costos de los mantenimientos correctivos y preventivos y su impacto en la ejecución de los procesos, de manera que se cuente con los elementos de juicio adicionales que permitan determinar la permanencia o reposición de los equipos."

Para dar cumplimiento a esta oportunidad de mejora se recomienda utilizar este proyecto de grado.

- La DMT cuenta actualmente con el SIMAT, como se definió en este proyecto, y el personal idóneo para cumplir técnica y administrativamente sus actividades, pero su capacidad de proyección para mejorar sus procesos, se ve afectada por la desarticulación de la información que fluye entre el área contable y técnica interna.

Se recomienda integrar el área de costos y de mantenimiento dentro del SIMAT, con el fin de brindar un mejor servicio a los usuarios de la DMT, y realizar una gestión administrativa, que permita a su personal enfocarse en las actividades de misionales propias del mantenimiento de los equipos de infraestructura de la UIS.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Norma internacional ISO 14224:2006, Para el Petróleo, Petroquímica e Industria de Gas natural - Recogida e Intercambio de datos de fiabilidad y mantenimiento para el equipo.
- Moubray, J. (1997, Febrero 01). Applying and Implementing Risk-based Inspection Programs. Maintenance & Reliability. Hydrocarbon Processing, p.43.
- Anzola, F. and Pradhan, S. (1994, Febrero 28). Maintenance Strategies for Greater Availability. Maintenance & Retrofitting, p.39.
- Arata Andreani, Adolfo, Ingeniería y Gestión de la Confiabilidad Operacional en Plantas Industriales, Primera Edición 2009, RIL Editores, Pág. 199.
- García Garrido, Santiago, Organización y gestión Integral del Mantenimiento, Editorial Díaz Santos, 2003, Pág. 99.
- Garavito H. Edwin Alberto, Mantenimiento y conservación industrial, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales – Ingeniería Industrial – UIS Diseño de Plantas. Pág. 4.
- Rey Sacristán, Francisco, TPM, Mantenimiento Total de la Producción, proceso de Implantación y Desarrollo, Editorial Fundación Confemetal 2001.
- Moubray John, Editorial Aladon Ltda., Edición en español 2004, Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.
- Creus Sole, Antonio, Fiabilidad y Seguridad, Editorial Marcombo S.A. 2005, Segunda Edición, Pág. 303.

- Moubray John, Edición en español 2004, Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, pág. 133-201.
- Raouf Dixon, Duffuaa, Sistemas de Mantenimiento Planeación y Control, Editorial Limusa S.A. 2009, Pág. 66, Pág. 295.
- Sassieni M., Yaspan A., Friedman L., Investigaciones de Operaciones, Editorial Limusa S.A., Mexico 1978.
- Murat Kurt, Jeffrey P. Kharoufeh, Optimally maintaining a Markovian deteriorating system with limited, imperfect repairs, Department of Industrial Engineering, University of Pittsburgh, European Journal of Operational Research 205 (2010) 368–380.
- Tesis doctoral 219, 2001, Dr. Antonio Sánchez del Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas de la Escuela de Ingenieros Industriales de la Universidad de Sevilla.
- Manual del usuario, Acondicionador de aire, TEMPSTAR, Modelos: 38TCT – 40TCT, FORM: MAGF07M1.
- Krajewski, Lee J., Ritzman, Larry P., Administración de Operaciones, Estrategia y Análisis, Editorial Pearson Educación, 2000, Quinta Edición, Pág. 502.
- Programa: WINQSB, Modulo: MARKOV PROCESS, Version 1.0, Copyright © Yih – Long Chang.