

# Instituto Tecnológico de Morelia

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

PROGRAMA DE GRADUADOS E INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

## Administración de Recursos para la Optimización de Mantenimiento y Reemplazo de Equipos de Sistemas Eléctricos de Potencia

### T E S I S

que para obtener el grado de

**Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica**

Presenta

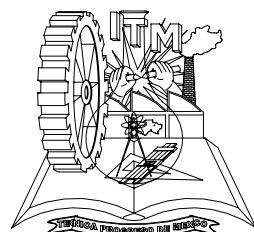
**Jorge Ernesto Cota Félix**

Asesores

**Dr. Francisco Rivas Dávalos**

**Dr. Serguei Maximov**

Morelia, Michoacán, México. Abril 2010



# **Administración de Recursos para la Optimización de Mantenimiento y Reemplazo de Equipos de Sistemas Eléctricos de Potencia**

**Jorge Ernesto Cota Félix**

## **Resumen**

La optimización de mantenimiento y reemplazo de equipos es esencial para obtener la rentabilidad, disponibilidad y confiabilidad del suministro de energía eléctrica en sistemas de potencia. El proceso de optimización requiere de información sobre el costo de mantenimiento preventivo y correctivo, así como los costos que ocasionan las fallas para la compañía de suministro eléctrico y para los consumidores. Para calcular los costos esperados es necesario de información sobre las características de confiabilidad de los equipos del sistema, la manera en que el mantenimiento afecta la confiabilidad de cada equipo y el riesgo de mantener un equipo envejecido en operación. El objetivo de esta tesis de doctorado ha sido desarrollar modelos de confiabilidad de equipos y métodos de optimización de mantenimiento y reemplazo de equipos, que tomen en cuenta el efecto del mantenimiento y el reemplazo en la confiabilidad de equipos y del sistema en general, para hacer una eficiente administración de recursos de los sistemas de potencia.

Esta investigación se enfocó en las áreas de modelos de confiabilidad de equipos de sistemas de potencia, modelos de optimización de mantenimiento y métodos de análisis de reemplazo de equipos envejecidos. En el área de modelos de confiabilidad de equipos, dos nuevos modelos han sido desarrollados: uno para fallas reparables y otro para fallas no reparables o de fin de vida. Los modelos cuantifican el efecto del mantenimiento en la confiabilidad del equipo. Estos modelos tienen la cualidad de que requieren de pocos datos históricos de fallas de los equipos; sin embargo, ofrecen una aproximación muy aceptable, según las pruebas que se realizaron con equipos de Comisión Federal de Electricidad, y que se reportan en esta tesis. También se desarrolló un nuevo modelo de optimización de mantenimiento preventivo, y un nuevo método de análisis de reemplazo para equipo envejecido. Estos modelos y método fueron formulados utilizando formulaciones matemáticas basadas en datos estadísticos. Estos

modelos y método fueron probados y perfeccionados en un caso de estudio basado en un sistema real. El sistema es una red de sub-transmisión de Comisión Federal de Electricidad de la zona Morelia a cargo de la División Centro Occidente. Los resultados que se obtuvieron muestran que la metodología nueva de administración de recursos que se desarrolló en esta investigación para la optimización de mantenimiento y reemplazo de equipos de sistemas de potencia, puede ser utilizada como herramienta para los administradores o personal encargados de la toma de decisiones en la planeación de los sistemas de potencia.

# Contenido

Resumen	ii
Abstract	iv
Agradecimiento	vi
Dedicatoria	vii
Lista de Artículos Relacionados con la Tesis	viii
Contenido	x
Lista de Figuras	xiv
Lista de Tablas	xvi
Nomenclaturas	xix

## Capítulo 1

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes	1
1.2. Estado del Arte	3
1.2.1. Modelos de Confiabilidad de Equipos	3
1.2.2. Métodos de Mantenimiento	5
1.2.2.1. Mantenimiento Correctivo	7
1.2.2.2. Mantenimiento Preventivo	7
1.2.3. Reemplazo de Equipos Envejecidos	11
1.3. Formulación del Problema	12
1.4. Objetivos	16
1.4.1. Objetivo General	16
1.4.2. Objetivos Particulares	16
1.5. Justificación	17
1.6. Estructura de la Tesis	18

## Capítulo 2

<b>Método Propuesto para la Administración de Recursos de Sistemas Eléctricos de Potencia</b>	<b>20</b>
2.1. Introducción	20
2.2. Administración de Recursos de Sistemas Eléctricos de Potencia	20
2.3. Requerimiento para un Método de Administración de Recursos	24
2.4. Método Propuesto para la Administración de Recursos	25

## Capítulo 3

<b>Modelos Probabilístico de Confiabilidad de Equipos</b>	<b>30</b>
3.1. Introducción	30
3.2. Teoría de Confiabilidad	30
3.3. Modelos Probabilístico de Confiabilidad de Equipos	36
3.3.1. Modelo de Confiabilidad de Equipos para Fallas Reparables	36
3.3.2. Modelo de Confiabilidad de Equipos para Fallas no Reparables (período de desgaste)	43
3.4. Conclusiones	50

## Capítulo 4

<b>Incorporación de Modelos de Confiabilidad de Equipos en el Cálculo de Confiabilidad de Sistemas</b>	<b>52</b>
4.1. Introducción	52
4.2. Modelo Completos de Confiabilidad de Equipos	52
4.2.1 Indisponibilidad de Equipos	53
4.3 Cálculo Probabilístico de Confiabilidad para Sistemas Eléctricos de Potencia	56
4.4 Conclusiones	66

## Capítulo 5

<b>Prioridad de Equipos</b>	<b>67</b>
5.1. Introducción	67
5.2. Esquema para la Valoración de Importancia de Equipos	67
5.3. Esquema para la Valoración de Condición de Equipos	69
5.4. Conclusiones	76

## Capítulo 6

<b>Modelos de Optimización de Mantenimiento y Reemplazo de Equipos</b>	<b>77</b>
6.1. Introducción	77
6.2. Optimización de Mantenimiento	77
6.2.1. Modelo Propuesto para la Optimización de Mantenimiento	79
6.3. Análisis de Reemplazo de Equipos Envejecidos	84
6.3.1. Importancia del Reemplazo Oportuno	85
6.3.2. Estrategias de Reemplazo	85
6.3.3. Modelo Matemático Probabilístico Propuesto para el Reemplazo de Equipos Envejecidos	86
6.4. Conclusiones	91

## Capítulo 7

<b>Casos de Estudio de la Aplicación del Método Propuesto de Administración de Recursos en Sistemas de Potencia</b>	<b>93</b>
7.1. Introducción	93
7.2. Criterios para la Evaluación de Estrategias de Administración de Recursos	93
7.2.1. Índices de Confiabilidad para Evaluación de Estrategias de Administración de Recursos en Sistemas de Potencia	95
7.2.2. Modelo de Costos para la Evaluación de Estrategias de Administración de Recursos en Sistemas de Potencia	95
7.3. Aplicación de los Casos de Estudio	99

7.3.1. Caso Base	99
7.3.1.1. Desempeño Técnico del Caso Base	100
7.3.1.2. Desempeño Económico del Caso Base	102
7.3.2. Caso de Administración de Recursos Óptima	103
7.3.2.1. Desempeño Técnico del Caso de Administración de Recursos Óptima	110
7.3.2.2. Desempeño Económico del Caso de Administración de Recursos Óptima	111
7.4. Conclusiones	113
<b>Capítulo 8</b>	
<b>Conclusiones y Trabajos Futuros</b>	<b>114</b>
8.1. Conclusiones	114
8.2. Trabajos Futuros	118
<b>Referencias</b>	<b>120</b>
<b>Apéndice A</b>	
<b>Resultados de los Modelos de Confiabilidad de Equipos</b>	<b>125</b>
A.1 Resultados del Modelo de Confiabilidad de Equipos para Fallas Reparables	125
A.2 Resultados del Modelo de Confiabilidad de Equipos debido a Fallas no Reparables (“ <i>fin de vida</i> ”)	128
<b>Apéndice B</b>	
<b>Datos del Sistema de Sub-transmisión de CFE de la Zona Morelia</b>	<b>130</b>
B.1 Datos Generales de los Equipos	130
B.2 Resultados de los Índices de Disponibilidad	131

## **Apéndice C**

<b>Datos para la Estimación de Prioridad de Equipos</b>	<b>133</b>
C.1 Datos de los Equipos	133
C.2 Datos de Condiciones e Importancia de los Equipos	136
C.3 Resultados de la Estimación de los Índices de Importancia y Condición para cada Equipos	145
C.4 Resultados del Cálculo de Flujos de Potencia y Corto Circuito	147

## **Apéndice D**

<b>Resultados de la Optimización de Mantenimiento y Reemplazo de Equipos</b>	<b>148</b>
D.1 Resultados de la Optimización de Mantenimiento Preventivo de Equipos	148
D.2 Resultados de la Optimización para Reemplazo de Equipos	149

<b>Anexos</b>	<b>152</b>
---------------	------------