



**Marcela Pinheiro Moreira**

**Priorização dos Modos de Falha de Equipamentos  
Utilizando os Métodos de Análise Multicritério  
PROMETHEE e Fuzzy PROMETHEE**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientadora: Profa. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco

Co-Orientador: Prof. Carlos Julio Dupont

Rio de Janeiro

Abril de 2009



**Marcela Pinheiro Moreira**

**Priorização dos Modos de Falha de Equipamentos  
Utilizando os Métodos de Análise Multicritério  
PROMETHEE e Fuzzy -PROMETHEE**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Profa. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco**  
**Orientadora**  
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. Carlos Julio Dupont**  
**Co-Orientador**  
CEPEL

**Prof. Djalma Mosqueira Falcão**  
COPPE/UFRJ

**Profa. Jacqueline Gisele Rolim**  
UFSC

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 03 de abril de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e da orientadora.

### **Marcela Pinheiro Moreira**

Engenheira Eletricista formada pela Universidade Federal Fluminense (UFF), atualmente é pesquisadora do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).

### Ficha Catalográfica

Moreira, Marcela Pinheiro

Priorização dos modos de falha de equipamentos utilizando os métodos de análise multicritério PROMETHEE e Fuzzy-PROMETHEE / Marcela Pinheiro Moreira ; orientador: Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco ; co-orientador: Carlos Julio Dupont. – 2009.

121 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Decisão multicritério. 3. PROMETHEE. 4. Números fuzzy. 5. RCM. I. Vellasco, Marley Maria Bernades Rebuzzi. II. Dupont, Carlos Julio. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais  
Sergio Telles Moreira (em memória) e Ana Maria Pinheiro Moreira pela  
dedicação e amor sempre demonstrados.

## **Agradecimentos**

À minha família e ao meu marido pelo amor, incentivo e compreensão nos momentos de dificuldades.

Aos meus orientadores Marley Maria B. R. Vellasco e Carlos Julio Dupont pela confiança, apoio e dedicada orientação.

Ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, em especial à pesquisadora Glória Suzana Gomes de Oliveira, pela oportunidade e incentivo.

À equipe desenvolvedora do Sistema DianE, que contribuiu para a conclusão deste trabalho.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

## Resumo

Moreira, Marcela Pinheiro; Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi (Orientadora); Dupont, Carlos Julio (Co-orientador). **Priorização dos Modos de Falha de Equipamentos Utilizando os Métodos de Análise Multicritério PROMETHEE e Fuzzy PROMETHEE**. Rio de Janeiro, 2009. 121p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Visando atender aos critérios de disponibilidade e confiabilidade exigidos pela regulamentação do setor elétrico brasileiro, as empresas de energia têm incrementado o uso de sistemas de monitoramento e diagnóstico. Isto possibilita a identificação prévia de evidências de anormalidades na condição operacional dos equipamentos de subestações, viabilizando a prática de manutenções preditivas e o gerenciamento de ativos baseado na avaliação de riscos. O RCM (*Reliability Centered Maintenance*) ou Manutenção Centrada em Confiabilidade é um processo usado para o planejamento da manutenção e tem como objetivo o gerenciamento pró-ativo e não a prevenção indiscriminada de todas as falhas. É necessário que sejam feitas as identificações das falhas funcionais, modos de falha dos componentes, efeitos e consequências destas falhas para que um plano de manutenção seja desenvolvido para cada modo de falha a fim de eliminá-lo ou reduzir suas consequências. A classificação dos modos de falha identificados é de suma importância, pois indicará uma priorização para a tomada de decisão, conduzindo a um processo de manutenção técnica e economicamente eficiente. O objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar em um programa computacional uma metodologia para priorização dos modos de falhas funcionais em equipamentos de subestações de energia elétrica obtidos a partir da aplicação do processo RCM. Considerando um contexto multicritério, propõe-se utilizar para a priorização dos modos de falha, em oposição às metodologias empíricas hoje adotadas, a metodologia de apoio multicritério a decisão PROMETHEE comparando-a com o fuzzy-PROMETHEE, onde é associada a teoria de conjuntos difusos à metodologia multicritério. No fuzzy-PROMETHEE os dados de entrada são tratados como números fuzzy, com o objetivo de considerar a incerteza contida nos dados. Com a utilização do fuzzy-PROMETHEE obtém-se uma ordenação mais realista dos modos de falhas, considerando a imprecisão dos dados. A severidade dos efeitos associados à ocorrência de cada modo de falha foi utilizada como um dos critérios de avaliação na metodologia desenvolvida. Sabe-se que os modos de falhas funcionais afetam as empresas de diferentes formas, podendo comprometer a confiabilidade do sistema, custos operacionais, ou até mesmo a segurança ou o ambiente. Diante disto, foram atribuídos graus de severidade aos diferentes impactos: econômicos (custos operacionais + custos de reparo), operacionais (disponibilidade), ambientais e, segurança (instalações e humana). Foi construído um sistema de inferência fuzzy para a obtenção da severidade global de cada modo de falha, onde as entradas serão as severidades específicas citadas anteriormente. Com a severidade global de cada modo de falha é possível obter o risco associado a cada modo de falha. A partir da priorização dos modos de falhas, pode ser aplicada uma metodologia para a priorização das ações mais adequadas para a redução ou eliminação das consequências de cada modo de falha. A maior contribuição deste trabalho é a disponibilização de um modelo refinado para a obtenção de um plano de manutenção que vise o aumento da confiabilidade operativa dos equipamentos e a redução de custos, considerando múltiplos critérios de análise e os interesses de diferentes decisores.

## Palavras-chave

Decisão multicritério; PROMETHEE; Números fuzzy; RCM.

## Abstract

Moreira, Marcela Pinheiro; Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi (Advisor); Dupont, Carlos Julio (Co-advisor). **Prioritization of Failure Modes of Equipment Using the Methods of Multicriteria Analysis PROMETHE and Fuzzy PROMETHE**. Rio de Janeiro, 2009, 121p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Aiming to meet the criteria of availability and reliability required by the rules of the Brazilian electric sector, energy companies have increased the use of systems for monitoring and diagnosis. This allows the identification of prior evidence of abnormalities in the operational condition of substation equipment, enabling the practice of predictive maintenance and asset management based on risk assessment. The RCM (reliability centered maintenance) is a process used for planning of maintenance and its main objective is the pro-active management rather than indiscriminate prevention of all failures. The aim is the identification of functional failures, failure modes of components, effects and consequences of these failures to develop a maintenance plan for each mode of failure in order to eliminate it or reduce its consequences. Classification of identified failure modes is extremely important, since it indicates the priority for the decision making process, leading to a technical and cost effective maintenance. The main objective of this dissertation is to develop and implement a methodology for prioritization of failure modes of functional equipment in substations of electric power, obtained by applying the RCM process. Assuming a multicriteria context, to rank the modes of failure, as opposed to the empirical methods adopted today, it is proposed the multicriteria decision PROMETHEE and fuzzy-PROMETHEE methodologies. In the fuzzy-PROMETHEE the input data are treated as fuzzy numbers, with the purpose of considering the uncertainty contained in the data. Using the fuzzy-PROMETHEE ranking process, a more realistic modes of failure is obtained. The severity of the effects associated with the occurrence of each mode of failure was used as a criterion for evaluating the methodology developed. It is known that methods of functional failures affect businesses in different ways and may compromise the reliability of the system, operating costs, or even the safety or the environment. Therefore, different degrees of severity were attributed to the economic, operational, environmental, and safety impacts. A fuzzy inference system was developed to obtain the overall severity of each fault mode, where the inputs are the specific severities mentioned above. With the overall severity of each mode of failure it is possible to obtain the risks associated with each mode of failure. From the ranking of failure modes, a methodology can be applied to prioritize actions that are more appropriate for the reduction or elimination of the consequences of each mode of failure. The major contribution of this work is the availability of a refined model for a maintenance plan aimed at increasing the operational reliability of equipment and reduction of costs, considering multiple criteria analysis and the interests of different decision makers.

## Keywords

Multicriteria decision making; PROMETHEE; Fuzzy numbers; RCM.

## Sumário

1 Introdução	14
1.1. Motivação	15
1.2. Objetivos	17
1.3. Descrição do Trabalho	18
1.4. Estrutura do Trabalho	19
2 Fundamentação Teórica	21
2.1. Introdução	21
2.2. Manutenção Centrada em Confiabilidade – RCM	21
2.2.1. Definições e Objetivos da RCM	22
2.2.2. Funções, Padrões de Desempenho e Contexto Operacional	25
2.2.3. Falhas Funcionais e Potenciais	26
2.2.4. Modos de Falha	27
2.2.5. Causas das Falhas Funcionais	28
2.2.6. Efeitos e Conseqüências das Falhas	28
2.2.7. Análise de Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA)	30
2.2.8. Ações Pró-Ativas	33
2.3. Lógica Fuzzy	33
2.3.1. Teoria dos Conjuntos Fuzzy	34
2.3.2. Números Fuzzy	36
2.3.3. Sistemas de Inferência Fuzzy	39
2.4. O Apoio Multicritério à Decisão	41
2.4.1. Problemáticas do Apoio à Decisão	44
2.4.2. Considerações sobre a Escolha do Método	44
3 Métodos Utilizados para a Priorização dos Modos de Falha	50
3.1. Introdução	50
3.2. O Método PROMETHEE	51
3.2.1. Funções de Preferência ou Critérios Generalizados	52
3.2.2. Construção dos Índices de Preferência Ponderada	55
3.2.3. Fluxos de Sobreclassificação	56
3.2.4. Classificação Parcial das Alternativas – PROMETHEE I	56
3.2.5. Classificação Completa das Alternativas – PROMETHEE II	57
3.3. Fuzzy PROMETHEE	58
4 Modelo de Decisão Multicritério	62
4.1. Introdução	62
4.2. Descrição do Modelo de Decisão Proposto	62
4.3. Determinação dos Critérios	64
4.3.1. Grau de Ocorrência da Causa (GO)	65
4.3.2. Confirmação da Causa (CI)	66
4.3.3. Severidade dos Impactos	67
4.4. Sistema de Inferência Fuzzy	71
4.4.1. Modelagem do Sistema Fuzzy	72
4.5. Cálculo do Risco	74



4.6. Aplicação dos Métodos de Apoio Multicritério à Decisão	75
4.6.1. PROMETHEE	77
4.6.2. F-PROMETHEE	78
5 Estudo de Casos	81
5.1. Introdução	81
5.2. Caso de Estudo: Transformador 58599	82
5.3. Análise de Sensibilidade	88
5.4. Análise dos Resultados	97
6 Conclusões e Recomendações	100
6.1. Conclusões	100
6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	101
Referências Bibliográficas	103
Apêndice 1 Conjunto de Regras	107
Apêndice 2 Subsistema Parte Ativa	112

## Lista de figuras

Figura 1 – Intervalo P-F	26
Figura 2 – Conjunto fuzzy	35
Figura 3 – Suporte do conjunto fuzzy	36
Figura 4 – Conjunto singleton	36
Figura 5 – Representação de um número fuzzy na forma L-R	38
Figura 6 – Representação de um número fuzzy triangular	38
Figura 7 – Estrutura de um sistema fuzzy	40
Figura 8 – Função de preferência $P_j(a,b)$	53
Figura 9 – Função de preferência $H_j(a,b)$	53
Figura 10 – Relação de sobreclassificação entre duas alternativas	55
Figura 11 – Ordenação parcial de alternativas (PROMETHEE I)	57
Figura 12 – Representação gráfica da função de preferência	60
Figura 13 – Modelo para priorização de modos de falha	63
Figura 14 – Sistema fuzzy para o cálculo da severidade	72
Figura 15 – Conjuntos fuzzy das variáveis de entrada	73
Figura 16 – Conjuntos fuzzy da variável de saída	74
Figura 17 – Tela principal do programa computacional desenvolvido	76
Figura 18 – Exemplo de índices de preferência ponderada	77
Figura 19 – Classificação completa estabelecida pelo PROMETHEE II	78
Figura 20 – Representação gráfica do número fuzzy $(0.85, 0.25, 0.15)_{LR}$	79
Figura 21 – Classificação completa estabelecida pelo F-PROMETHEE	80
Figura 22 - Transformador 58599 – Caso de Estudo	82
Figura 23 - Sobreaquecimento na parte ativa	83
Figura 24 - Métodos de análise de defeitos	83
Figura 25 - Obtenção da variável de saída severidade global	87
Figura 26 - Dispersão Modelo 1 x Modelo 2	92
Figura 27 - Dispersão Modelo 1 x Modelo 3	92
Figura 28 - Dispersão Modelo 1 x Modelo 4	93
Figura 29 - Dispersão Modelo 1 x Modelo 5	93
Figura 30 - Dispersão Modelo 1 x Modelo 6	93

Figura 31 - Dispersão Modelo 1 x Modelo 5, 6	94
Figura 32 - Ordenação das causas pelo Modelo 3	94
Figura 33 - Ordenação das causas pelo Modelo 4	95
Figura 34 - Ordenação das causas pelo Modelo 5	95
Figura 35 - Ordenação das causas pelo Modelo 6	96
Figura 36 - Detalhe da flange da bucha	97
Figura 37 - Detalhe dos links de interligação	97
Figura 38 - Detalhe dos terminais de AT	98
Figura 39 - Detalhe de conexão de AT	98

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação de funções e objetivos	25
Tabela 2 – Avaliação da severidade dos modos de falha	31
Tabela 3 - Avaliação da ocorrência dos modos de falha	31
Tabela 4 - Avaliação da detecção dos modos de falha	32
Tabela 5 – Operações com números fuzzy	39
Tabela 6 – Avaliação de n alternativas para k critérios	52
Tabela 7 – Os seis tipos de critério generalizado	54
Tabela 8 - Definição de “O” para cada causa x método de análise	66
Tabela 9 - Definição de “I” para cada causa x método de análise	66
Tabela 10 - Níveis de severidade	67
Tabela 11 - Avaliação da severidade dos impactos econômicos	69
Tabela 12 - Avaliação da severidade dos impactos operacionais	70
Tabela 13 - Avaliação da severidade dos impactos de segurança à vida humana	70
Tabela 14 - Avaliação da severidade dos impactos ambientais	71
Tabela 15 - Modelagem das variáveis de entrada	73
Tabela 16 – Modelagem da variável de saída	74
Tabela 17 - Causas identificadas e priorizadas pelo sistema DianE	84
Tabela 18 - Avaliações das causas	86
Tabela 19 - Modelo 1 e 2	88
Tabela 20 - Modelos 3 e 4	88
Tabela 21 - Modelos 5 e 6	89
Tabela 22 - Ordenações obtidas através dos Modelos 1, 2, 3, 4, 5 e 6	89
Tabela 23 - Fluxos líquidos calculados dos modelos 3, 4, 5 e 6	96
Tabela 24 - Componentes da parte ativa	112
Tabela 25 - Função x Componente x Falha Funcional x Modo Falha	113
Tabela 26 - Função x Componente x Falha Funcional x Modo Falha	113
Tabela 27 - Função x Componente x Falha Funcional x Modo Falha	114
Tabela 28 - Função x Componente x Falha Funcional x Modo Falha	115
Tabela 29 - Função x Componente x Falha Funcional x Modo Falha	117

Tabela 30 - Função x Componente x Falha Funcional x Modo Falha	117
Tabela 31 - Função x Componente x Falha Funcional x Modo Falha	118
Tabela 32 - Função x Componente x Falha Funcional x Modo Falha	119
Tabela 33 - Função x Componente x Falha Funcional x Modo Falha	120
Tabela 34 - Função x Componente x Falha Funcional x Modo Falha	121