

Leandro Henrique Aguiar

**Modelagem Difusa Aplicada ao Problema de Ampliação
do Carregamento de Linhas de Transmissão**

FLORIANÓPOLIS

2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Modelagem Difusa Aplicada ao Problema de Ampliação
do Carregamento de Linhas de Transmissão**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Leandro Henrique Aguiar

Florianópolis, Junho de 2006.

Modelagem Difusa Aplicada ao Problema de Ampliação do Carregamento de Linhas de Transmissão

Leandro Henrique Aguiar

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Prof. C. Celso de Brasil Camargo, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Nelson Sadowski, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. C. Celso de Brasil Camargo, Dr. Eng.

Prof. Jacqueline Gisèle Rolim, Dr. Eng.

Prof. Hans Helmut Zürn, PhD.

Aldo Cosentino, Dr. Eng.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

E não foram poucas pessoas!!!

AGRADECIMENTOS

Ao Professor C. Celso de Brasil Camargo pela orientação e apoio na realização deste trabalho.

À banca examinadora composta pelo Professor C. Celso de Brasil Camargo, Professora Jacqueline Gisèle Rolim, Professor Hans Helmut Zürn e pelo Pesquisador Aldo Cosentino pelas valiosas contribuições ao trabalho.

Ao CEPEL pela gentileza no fornecimento dos dados medidos em uma linha de transmissão real necessários ao trabalho.

Aos colegas das baias e do Labspot pela inspiração, ajuda e momentos de descontração.

Aos três indivíduos com quem morei, por todos os momentos que passamos juntos durante esses dois anos e meio em Florianópolis.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro durante os dois anos do curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica.

A todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho estando presentes ou a distância.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Modelagem Difusa Aplicada ao Problema de Ampliação do Carregamento de Linhas de Transmissão

Leandro Henrique Aguiar

Junho/2006

Orientador: C. Celso de Brasil Camargo, Dr. Eng.

Área de Concentração: Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica

Palavras-chave: Cálculo da Ampacidade, Estimação da temperatura de condutor, Modelagem *Fuzzy*, Sistemas de Inferência Difusos, Linhas de Transmissão Aéreas.

Número de Páginas: xiii + 89

O presente trabalho tem como objetivo o tratamento do problema de ampliação do carregamento de linhas de transmissão aéreas por meio do desenvolvimento de uma metodologia baseada em Lógica Difusa (*Fuzzy*) para o cálculo da temperatura superficial do condutor na linha e a estimação do seu valor até uma semana a frente. A pesquisa foi feita em duas etapas, a primeira no treinamento do sistema de inferência difuso empregado e a segunda em simulações para determinar os melhores valores para os seus parâmetros de ajuste e o seu comportamento na estimação da temperatura do condutor. Para o treinamento do sistema foram utilizados dados climáticos, amplitude de corrente e temperatura superficial do condutor, todos medidos em uma linha de transmissão real durante 31 dias consecutivos. Para determinar a quantidade de regras de inferência presentes no sistema, um algoritmo de agrupamento difuso foi empregado para organizar a massa de dados históricos em conjuntos. A cada conjunto desses uma regra foi definida, tendo seus parâmetros determinados através de uma técnica de regressão linear múltipla. As simulações foram feitas com uma parte dos dados históricos não utilizada no treinamento. Os baixos valores dos erros encontrados nessa última etapa mostram que a metodologia é viável e bastante promissora para os estudos na área de ampacidade.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

Fuzzy Modeling Applied to the Problem of the Loading Increase of Overhead Transmission Lines

Leandro Henrique Aguiar

June/2006

Advisor: C. Celso de Brasil Camargo, Dr. Eng.

Area of Concentration: Electrical Systems Planning

Key words: Ampacity Calculation, Fuzzy Modeling, Fuzzy Inference System, Overhead Transmission Lines

Number of Pages: xiii + 89

The present work has as objective the development of a Fuzzy Logic based methodology for the calculation of the conductor superficial temperature in an overhead transmission line and to estimate its value up to one week ahead. The research was made in two stages, the first in the training of the fuzzy inference system used and the second in simulations to determine the best values for their adjustment parameters and its behavior in the evaluation of the conductor temperature. Climate data, current and conductor superficial temperature were used for the system training. These values were measured in a real transmission line for 31 consecutive days. In order to set up the inference rules present in the system, a fuzzy cluster estimation method was used to organize the historical data in clusters and a recursive least squares method was used to determine the coefficients in the concluding parts of the rules. The simulations were made with a part of the historical data not used in the training. The low values of the errors found in the last stage show that the methodology is viable and quite promising for ampacity studies.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivações	1
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivo Geral	4
1.2.2	Objetivos Específicos	4
1.3	Metodologia	5
1.4	Organização do trabalho	5
2	Determinação do Carregamento de Linhas de Transmissão Aéreas	7
2.1	Considerações Gerais	7
2.1.1	Limites de Linhas de Transmissão	7
2.1.2	Fatores Dependentes do Limite Térmico	8
2.1.3	Problema de Determinação do Carregamento de LT's curtas	10
2.2	Modelo Térmico de um Condutor	12
2.2.1	Modelo Térmico Tradicional	14
2.3	Metodologias para Determinação do Carregamento de Linhas de Transmissão	14
2.3.1	Metodologias Determinísticas	15

2.3.2	Metodologias Estatísticas	15
2.3.3	Metodologias em Tempo Real	16
2.4	Metodologias para Ampliação do Limite Térmico de Linhas de Transmissão	18
2.5	Conclusão	19
3	Sistemas de Inferência Difusos	21
3.1	Introdução	21
3.2	Lógica Difusa	22
3.2.1	Teoria De Conjuntos Difusos	22
3.2.2	Variáveis Linguísticas	24
3.2.3	Funções de Pertinência	25
3.2.4	Operações com Conjuntos Difusos	26
3.2.5	Regras de Inferência	28
3.3	Agrupamento Difuso de dados	29
3.3.1	Tipos de Agrupamento	29
3.3.2	Métodos de Agrupamento Difuso	30
3.4	Sistemas Difusos	32
3.4.1	Tipos de Sistemas Difusos	33
3.5	Conclusão	36
4	Metodologia Difusa para Estimação do Carregamento de LT	37
4.1	Considerações Gerais	37
4.2	Modelo Proposto	38
4.2.1	Escolha das Variáveis de Entrada	39

4.2.2	Agrupamento dos Dados	40
4.2.3	Identificação das Regras e Elaboração do Modelo	43
4.2.4	Levantamento do Raio dos Grupos	46
4.3	Conclusão	47
5	Apresentação dos Resultados da Aplicação da Metodologia	48
5.1	Considerações Gerais	48
5.2	Dados de Entrada	48
5.2.1	Radiação Solar	49
5.2.2	Temperatura Ambiente	50
5.2.3	Velocidade e Direção do Vento	50
5.2.4	Corrente	52
5.2.5	Temperatura do Condutor	52
5.3	Aplicação da Metodologia Difusa	53
5.3.1	Levantamento do Raio dos Grupos	55
5.3.2	Exemplo de Regras e Grupos Formados	58
5.4	Resultados da Estimação	59
5.4.1	Aplicação do Modelo I	59
5.4.2	Aplicação do Modelo II	61
5.4.3	Aplicação do Modelo III	62
5.5	Tempos de Simulação	63
5.6	Conclusão	64

6	Conclusões	65
6.1	Considerações Gerais	65
6.2	Trabalho Desenvolvido	65
6.3	Vantagens da Metodologia Proposta	66
6.4	Limitações do Modelo e da Análise Realizada	67
6.5	Sugestões para Trabalhos Futuros	68
A	Modelo Térmico Tradicional	70
A.1	Equação Geral de Calor de um Condutor	70
A.2	Equação Diferencial da Temperatura do Condutor	71
A.3	Ampacidade em Regime Permanente	72
A.4	Resistência elétrica do condutor	73
A.4.1	Condutores com 3 camadas de tentos de alumínio	74
A.4.2	Condutores com 1 ou 2 camadas de tentos de alumínio	75
A.5	Ganho de Calor por Aquecimento Solar	76
A.6	Perdas de Calor por Irradiação	80
A.7	Perdas de Calor por Convecção	81
A.7.1	Convecção Natural	82
A.7.2	Convecção Forçada	84
A.7.3	Convecção Mista	85
	Referências Bibliográficas	89

Lista de Figuras

1.1	Crescimento percentual da produção e do consumo total de energia elétrica no Brasil em relação aos valores registrados no ano de 1970 (dados extraídos de MME (2005))	2
2.1	Relação entre os limites de uma linha de transmissão e o seu comprimento (VARANASI, 2005)	8
2.2	Comportamento da temperatura de um condutor submetido a um pulso de corrente de 20 min de duração (DEB, 2000)	12
3.1	Exemplo de variável lingüística representando conjuntos difusos.	24
3.2	Funções de pertinência comumente utilizadas (MATHWORKS, 2006)	25
3.3	(a) Exemplo de grupos formados pelo algoritmo de agrupamento subtrativo no espaço \mathbb{R}^2 , (b) forma dos grupos no espaço da variável X_1 e (c) no espaço da variável X_2 (GUILLAUME, 2001)	31
3.4	Esquema de um sistema de inferência difuso	32
4.1	Processo de elaboração do sistema de inferência difuso proposto	38
4.2	Algoritmo de agrupamento subtrativo	41
4.3	Processo de agrupamento subtrativo simplificado	43
5.1	Amostra da série de dados medidos de radiação solar (a) e distribuição dos valores da série completa (b)	49

5.2	Amostra da série de dados medidos de temperatura ambiente (a) e distribuição dos valores da série completa (b)	50
5.3	Amostra da série de dados medidos de velocidade (a) e direção do vento (c) e distribuição dos valores da série completa de cada uma delas ((b) e (d))	51
5.4	Amostra da série de dados medidos de corrente (a) e distribuição dos valores da série completa (b)	52
5.5	Amostra da série de dados medidos de temperatura do condutor (a) e distribuição dos valores da série completa (b)	53
5.6	Variação do número de grupos e média dos erros de estimação com o raio de cada grupo	56
5.7	Gráficos dos parâmetros de escolha do raio dos grupos para o modelo I: (a) Combinação da média e desvio padrão dos erros e (b) Combinação dos erros máximos positivo e negativo	56
5.8	Gráficos dos parâmetros de escolha do raio dos grupos par ao modelo II: (a) Combinação da média e desvio padrão dos erros e (b) Combinação dos erros máximos positivo e negativo	57
5.9	Gráficos dos parâmetros de escolha do raio dos grupos par ao modelo III: (a) Combinação da média e desvio padrão dos erros e (b) Combinação dos erros máximos positivo e negativo	57
5.10	Exemplos de grupos formados pelo algoritmo de agrupamento difuso.	58
5.11	Temperatura do condutor estimada pelo modelo I e valores medidos na linha real . .	60
5.12	Distribuição dos erros obtidos na estimação com o modelo I	60
5.13	Temperatura do condutor estimada pelo modelo II e valores medidos na linha real . .	61
5.14	Distribuição dos erros obtidos na estimação com o modelo II	62
5.15	Temperatura do condutor estimada pelo modelo III e valores medidos na linha real . .	62
5.16	Distribuição dos erros obtidos na estimação com o modelo III	63

Lista de Tabelas

3.1	Operações básicas de conjuntos difusos definidas por Lotfi Zadeh (COX, 1999)	28
A.1	Reflectância do solo sob a linha de transmissão (FLORES, 1991)	77
A.2	Constante de transparência da atmosfera (FLORES, 1991)	77
A.3	Determinação de A_2 e m_2 (ANEEL, 2005a)	83
A.4	Determinação de B_2 e m_2 (ANEEL, 2005a)	84

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivações

No mundo todo a demanda por energia elétrica vem crescendo a passos largos impulsionada pelos crescentes níveis de industrialização dos países e pela comercialização de cada vez mais produtos eletro-eletrônicos ou que dependam de alguma forma da eletricidade. Além disso, o novo paradigma que está sendo adotado em muitos países - da comercialização da energia elétrica como uma *commodity* em mercados de energia - exige que os sistemas de transmissão existentes comportem, além da carga prevista em projeto, "blocos de energia" negociados entre os agentes do mercado, blocos esses que não foram previstos pelos projetistas na época da construção dessas linhas.

Paralelamente a esses fatores, tem-se verificado também o aumento das pressões por parte da sociedade organizada para preservação do meio ambiente em todo o mundo. Vários países já adotaram novas leis mais rígidas para estudo, licenciamento e construção de empreendimentos de geração e transmissão de energia elétrica, limitando assim a expansão dos sistemas de transmissão existentes.

No Brasil, algumas características singulares do sistema elétrico fazem com que a importância das linhas de transmissão seja maior do que em outros sistemas pelo mundo. A predominância de geração hidrelétrica através de grandes usinas geradoras (74,3% do total da geração sem contar a parcela paraguaia de Itaipu (MME, 2005)) localizadas longe dos principais centros de carga, a grande diversidade hidrológica das áreas interligadas, acarretando inversões nos fluxos de intercâmbio de energia entre estas durante o ano são alguns dos principais motivos que exigem a presença de grandes troncos de transmissão, fazendo com que seja necessário planejar com eficiência a redução dos gargalos de transmissão, minimizando a ocorrência de congestionamentos.

Com o país em desenvolvimento o consumo de eletricidade vem crescendo mais expressivamente do que a produção desde a década de 1980 (figura 1.1), mesmo considerando-se como "produção" a geração própria do país e a importação dos vizinhos, obtendo índices de expansão superiores ao crescimento do Produto Interno Bruto (PIB). Só para exemplificar o crescimento anual do consumo registrado em 2003 foi de 5,4% em relação ao ano anterior, enquanto a produção aumentou 5,2% no mesmo período (MME, 2005) e o PIB registrou queda de 0,2%.

Após décadas se acumulando, essa pequena diferença anual entre os índices de crescimento do consumo e da oferta produziu uma grande disparidade, a qual o governo pretende corrigir com a construção de grandes empreendimentos hidrelétricos na região amazônica. Junto com essa solução vem a implementação de grandes troncos de transmissão, ampliando o sistema interligado nacional. Mas por levantar questões ambientais de difícil equacionamento, não há garantias que essa medida será socialmente ou ambientalmente simples de ser solucionada, podendo não ser executada em tempo hábil devido ao longo tempo que os estudos para a obtenção das licenças ambientais necessárias para uma obra desse porte levam para ser executados.

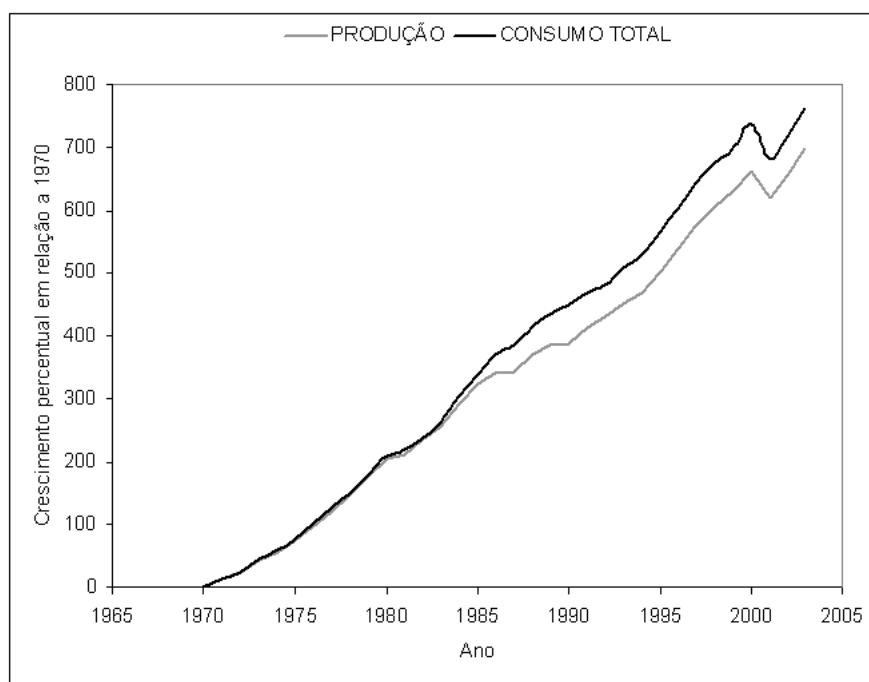


Figura 1.1: Crescimento percentual da produção e do consumo total de energia elétrica no Brasil em relação aos valores registrados no ano de 1970 (dados extraídos de MME (2005))

Da observação deste panorama, delineado por restrições econômicas, ambientais e regulatórias, onde nem sempre é possível construir novas linhas para dar vazão a energia gerada em grandes usinas

hidrelétricas ou termoeletricas cada vez mais distantes dos centros de carga, é que surgiu a motivação para a realização deste trabalho. Por isso, novos métodos são requeridos para maximizar a utilização das linhas já existentes sem afetar sua confiabilidade e sua segurança e ao mesmo tempo atender a demanda evitando ao máximo a expansão.

As pesquisas mais atuais para ampliar a capacidade do sistema de transmissão são baseadas em transmissão por corrente contínua, desenvolvimento de linhas de potência natural elevada, implantação de linhas de transmissão com mais de três fases, recapacitação de linhas antigas através da utilização de condutores mais modernos com maior capacidade e menores perdas ou simplesmente na otimização das linhas sem promover nenhuma alteração física, apenas recalculando os seus parâmetros através da utilização de novos modelos e metodologias mais precisas, refletindo o avanço científico e tecnológico dos últimos anos.

Este estudo se foca justamente neste último tipo de pesquisa, trabalhando com uma ferramenta de análise moderna, os modelos de inferência difusos (conhecidos também como modelos de inferência *fuzzy*), sobre o problema do limite térmico das linhas de transmissão. O limite térmico é um ponto importante pois é o fator restritivo do carregamento mais comum em linhas de pequena extensão. A operação do cabo acima desse limite, o qual é definido pela temperatura superficial máxima do condutor em operação, acarreta a ultrapassagem da distância de segurança cabo-solo mínima estipulada em norma, pondo em riscos a confiabilidade da linha e principalmente a segurança das pessoas, animais e objetos que estão no solo sob os condutores, além de ter reduzida a vida útil de toda a instalação de transmissão.

O problema do cálculo do limite térmico de uma linha caracteriza-se por ser não-linear e possuir uma complexidade relativamente grande, com muitas entradas e parâmetros a serem definidos. Como a aproximação de funções não-lineares é uma aplicação comum dos modelos de inferência difusos por estes serem sistemas capazes de aproximar o comportamento de tais funções a partir de dados práticos existentes, chega-se à conclusão de que a escolha dessa metodologia é bem acertada para a solução deste problema.

Dentre os diversos tipos de modelos de inferência existentes, os modelos de inferência de *Takano-Sugeno-Khan* são os mais adequados ao fim aqui descrito e por isso foram escolhidos para uso neste trabalho. De acordo com (RESENDE, 2003), a existência de funções paramétricas nos conseqüentes de suas regras e a facilidade de se ajustarem a partir de um conjunto de dados de entrada e saída faz com que eles sejam intrinsecamente relacionados com a tarefa de aproximação de funções em geral.

É importante a utilização dessa ferramenta de análise mais moderna e dados medidos em campo que permitem se aproximar o máximo possível do comportamento real do sistema, fazendo com que este opere de maneira mais racional, contornando as limitações existentes tanto nos modelos térmicos tradicionais quanto nas considerações de projeto das condições meteorológicas de entrada, podendo assim retirar vantagem da diferença entre o limite de carregamento definido no projeto e o comportamento real da linha em campo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como principal finalidade desenvolver uma nova metodologia para a estimação em tempo real, ou até 7 dias à frente, da temperatura superficial de cabos condutores aéreos. Por meio da comparação do valor estimado pelo uso desta metodologia com o valor determinado em projeto da temperatura superficial do condutor pode-se estimar a quantidade adicional de carga que pode ser transportada através da linha de transmissão mantendo a sua segurança e confiabilidade.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como consequência de se atingir o objetivo geral do trabalho, os seguintes objetivos específicos foram buscados:

- Pesquisa na literatura sobre o estado da arte da determinação do carregamento máximo de linhas de transmissão e determinação da melhor ferramenta a ser utilizada para se atingir o fim esperado;
- Utilização de dados climáticos e de carregamento reais medidos em campo para a elaboração do modelo, com a finalidade de contornar as aproximações feitas pelos modelos matemáticos tradicionais de determinação do carregamento de linhas;
- Utilização de uma técnica de identificação de modelos difusos a partir de dados históricos, permitindo a elaboração deste sem necessitar de um especialista na área de ampacidade dizendo quais são as relações entre as variáveis de entrada e de saída;

1.3 Metodologia

Primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica para verificar o estado da arte da determinação do carregamento de linhas de transmissão e para definir a técnica mais adequada a ser empregada para atingir o objetivo do trabalho. Uma vez determinado que essa técnica seria o uso de sistemas difusos, foi feita uma escolha prévia das variáveis de entrada com a finalidade de encontrar a combinação mais influente desses parâmetros na definição do limite térmico de um condutor.

Após isso, foi criado o modelo propriamente dito, por meio do agrupamento difuso de dados meteorológicos e de carregamento medidos em campo e através do emprego de uma técnica de identificação automática de regras de inferência, a qual permitiu que não fosse necessário um especialista na área de ampacidade dizendo quais são as relações entre as variáveis de entrada e de saída para a definição do sistema de inferência difuso empregado. A partir daí, foram feitas várias simulações para verificar o comportamento do modelo no cálculo em tempo real e na estimação da temperatura do condutor.

1.4 Organização do trabalho

Para um melhor entendimento da pesquisa, este trabalho foi organizado de forma que os capítulos abordassem os seguintes assuntos:

No capítulo 1 o tema da pesquisa é introduzido com a apresentação dos objetivos e das motivações que levaram à realização da mesma, além de uma pequena descrição da metodologia empregada.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o problema do carregamento de linhas de transmissão, juntamente com as metodologias mais utilizadas hoje em dia para a sua solução.

No capítulo 3 é mostrada uma revisão bibliográfica sobre sistemas de inferência difusos, citando-se um pouco da sua história, os diversos tipos existentes e suas vantagens e desvantagens.

O capítulo 4 contém a descrição detalhada da metodologia desenvolvida neste trabalho, começando com a escolha das variáveis de entrada, passando pelo algoritmo de agrupamento dos dados históricos utilizado, pela geração das regras de inferência do modelo através desses dados até a descrição do sistema difuso do tipo Sugeno implementado.

No capítulo 5 são mostrados e analisados os resultados das diversas simulações de cálculo da temperatura do condutor em tempo real e das simulações da estimação até 6 dias à frente do seu valor.

Por fim são apresentadas as conclusões desta pesquisa obtidas a partir dos resultados e feitas algumas sugestões para trabalhos futuros no capítulo 6.

Capítulo 2

Determinação do Carregamento de Linhas de Transmissão Aéreas

2.1 Considerações Gerais

2.1.1 Limites de Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão possuem limites que restringem a quantidade de potência que pode ser transmitida por elas. Esses limites evitam o sobreaquecimento dos cabos condutores, instabilidade no fluxo de potência e quedas de tensão elevadas nos terminais da linha. De acordo com Stoft (2002), os limites de transmissão de energia podem ser de dois tipos:

- Limites de estabilidade;
- Limites físicos.

Os limites de estabilidade especificam a máxima diferença de fase entre as tensões de barra nos extremos da linha de transmissão, acima da qual ocorre afundamento da tensão na barra de carga e atuação da proteção dos componentes do sistema elétrico, podendo levar a desligamentos de linhas e/ou geradores. Por causa dos fenômenos que os geram, este limites não estão presentes em linhas de corrente contínua, as quais possuem apenas limites físicos.

Os limites físicos se constituem basicamente do limite térmico dos cabos condutores que formam a linha de transmissão e dos equipamentos conectados a ela nas suas subestações terminais (transfor-

maiores de potência e de corrente, chaves, disjuntores, dentre outros). Dependendo da intensidade da corrente que atravessa a linha e das condições climáticas do local, os cabos condutores podem ultrapassar a sua temperatura limite definida em projeto e sofrer deterioração térmica, reduzindo a sua vida útil. Além disso eles podem se alongar a ponto de ultrapassar a altura de segurança cabo-solo mínima definida em norma, aumentando os riscos de descargas e de desligamentos e, principalmente, reduzindo a segurança das pessoas e objetos localizados sob a linha de transmissão. Como os limites físicos são intrínsecos ao condutor, todas as linhas de transmissão tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua os possuem.

Normalmente o limite térmico é mais acentuado em linhas de menor comprimento (depende da resistência do cabo por quilômetro, a qual é constante em toda a sua extensão), enquanto os limites de estabilidade se sobrepõe em linhas de grande comprimento (dependem da reatância da linha por quilômetro, a qual é proporcional ao comprimento). O gráfico mostrado na figura 2.1, mostra a faixa de atuação desses limites com relação ao comprimento da linha de transmissão.

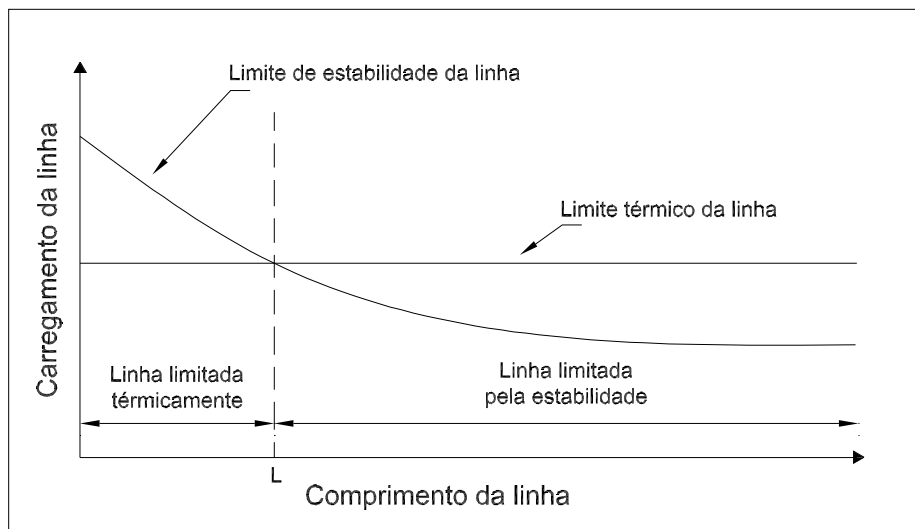


Figura 2.1: Relação entre os limites de uma linha de transmissão e o seu comprimento (VARANASI, 2005)

2.1.2 Fatores Dependentes do Limite Térmico

Tanto os limites de estabilidade quanto os físicos constituem a base de definição dos preços de congestionamento em um mercado de energia desregulamentado. De acordo com Stoft (2002), se uma linha de transmissão entre duas localidades é inadequada para suportar o comércio de energia desejado

entre esses dois locais, o local a jusante da linha vai ser forçado a comprar energia de geradores locais mais caros. Os Contratos de Prestação de Serviços de Transmissão (CPST) e os Contratos de Conexão à Transmissão (CCT), que regulamentam os direitos de transmissão (*transmission rights*) pagos aos proprietários das linhas, também dependem diretamente dos limites destas.

A resolução normativa n° 191 de 12 de dezembro de 2005 (ANEEL, 2005b) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que estabelece os procedimentos para a determinação da capacidade operativa das instalações de transmissão integrantes da rede básica e das demais instalações de transmissão, componentes do Sistema Interligado Nacional, bem como define as Funções de Transmissão e os respectivos Pagamentos Base, diz no seu artigo 7° que se a concessionária do serviço de transmissão conseguir por algum meio aumentar a capacidade de transmissão da LT, fará jus a uma parcela adicional da sua receita anual permitida (RAP), proporcional à capacidade ampliada, desde que essa ampliação evite ou postergue reforços na rede básica ou nas demais instalações de transmissão do sistema elétrico brasileiro.

Esses fatos fazem com que a definição correta destes limites seja necessária para o delineamento adequado dos valores a serem pagos pelos serviços de transmissão de energia e também para a operação ótima e racional do sistema como um todo, flexibilizando sua operação, maximizando a continuidade dos serviços de energia elétrica e minimizando os custos de ampliações e reforços das redes (ANEEL, 2005b).

O limite térmico também tem grande importância na determinação da altura de segurança que deve ser mantida entre o condutor e o solo sob a linha. A altura de segurança é definida de acordo com a tensão nominal da linha, com a área atravessada por ela (travessias sobre rodovias, ferrovias ou passagens aquáticas por exemplo) e com a temperatura máxima de operação do condutor, servindo para manter a isolamento necessária entre as partes energizadas da linha e as partes aterradas sob ela. Conforme a temperatura do cabo aumenta, ele vai se dilatando, o que provoca um aumento do seu comprimento e conseqüentemente da sua flecha.

Com isso a sua distância de segurança em relação ao solo diminui, aumentando o risco de descargas fase-terra, o que pode colocar em risco tanto a confiabilidade da linha, provocando desligamentos, como colocar em risco a segurança de pessoas, animais e objetos que estejam sob ela. Para o projeto de linhas de transmissão no Brasil, ABNT (1985) descreve as distâncias de segurança mínimas que devem ser mantidas do condutor ao solo ou a obstáculos em condições normais e de emergência até o nível de tensão de 242kV e acima deste, ANEEL (2005b) determina que seja utilizada uma norma internacional de grande aceite.

Outro fator dependente do limite térmico e que pode impactar tanto na confiabilidade da linha de transmissão quanto no balanço econômico da empresa que é sua proprietária é o envelhecimento do condutor. Quando uma linha é projetada, estima-se um período de vida útil para os seus condutores, período esse que depende das condições da região atravessada pela linha e da carga máxima que ela transportará. A operação do cabo em altas temperaturas faz com que o material do qual é feito gradativamente perca resistência mecânica e sofra recozimento, reduzindo sua vida útil. Por isso na determinação da temperatura máxima de operação do cabo tanto em condições normais quanto de emergência, também é levado em conta um percentual aceitável de perda de resistência mecânica dele, normalmente 10% (NOGUEIRA; AZZAM; SOUZA, 2001).

2.1.3 Problema de Determinação do Carregamento de LT's curtas

O problema de determinação do carregamento de linhas de transmissão de pequena extensão pode ser resumido à determinação do seu limite térmico, ou seja, encontrar a temperatura superficial máxima à qual o condutor pode ser submetido durante um certo período de operação, sem que ele sofra redução significativa na sua vida útil ou sem que ele ultrapasse a distância mínima cabo-solo de segurança prevista em norma. A temperatura superficial do cabo depende do valor eficaz da corrente que o percorre, das condições meteorológicas da região atravessada pela linha e das condições de conservação e de envelhecimento do próprio condutor.

O carregamento pode ser avaliado das seguintes formas (DEB, 2000):

Regime Permanente

Considera-se o condutor em regime permanente quando a linha está operando em condições normais e o calor ganho pelo cabo através de aquecimento solar e efeito Joule é igual ao calor perdido pelo mesmo através de irradiação para o ambiente e pelas convecções natural e forçada devidas ao efeito do vento, ou seja, operando em equilíbrio térmico. Entende-se por condições normais a linha operando por uma hora com corrente constante, condições atmosféricas estáveis e constantes e temperatura do condutor razoavelmente uniforme e constante.

Pode-se ter dois modos de operação da linha de transmissão com o condutor em regime permanente:

1. Condição de Operação Normal:

Em condição de operação normal o condutor está submetido a uma corrente tal que sua temperatura superficial é menor ou igual à temperatura máxima determinada em projeto como sendo o limite no qual o cabo pode operar sem sofrer redução significativa na sua vida útil ou sem ultrapassar a distância mínima de segurança cabo-solo definida em norma.

2. Condição de Operação de Emergência:

O condutor é considerado em regime de emergência quando a linha de transmissão está operando em sobrecarga, transportando uma corrente acima da nominal do projeto, durante período de tempo considerado curto em relação ao período anual de operação (ABNT, 1985). Isso leva o cabo a uma temperatura acima da temperatura máxima na qual ele pode operar sem sofrer redução significativa na sua vida útil, mas ainda assim, respeitando a distância mínima de segurança cabo-solo. De acordo com o item 10.4 da NBR5422/85, as condições de emergência são delimitadas pelos seguintes critérios:

- A corrente em condição de emergência deve ser um valor superior à corrente normal, limitada em sua duração, a qual deve ser inferior a 4 dias e
- O somatório das emergências em base anual não deve exceder a 5% do total de horas em regime normal de operação (aproximadamente 432 horas).

Regime Dinâmico

Quando uma linha de transmissão sofre um aumento súbito de corrente, seja pela sua energização, pela entrada de um grande bloco de carga ou por uma transferência de carga ocasionada pela falha de algum outro componente importante dos sistemas de geração e transmissão, considera-se o condutor operando em regime dinâmico. Devido à inércia térmica do material que o constitui, a sua temperatura não aumenta instantaneamente, ela sobe seguindo uma curva que depende da temperatura inicial do condutor, das condições atmosféricas e da amplitude e duração do pulso de corrente aplicado ao cabo (SHRESTHA; PHAM, 1995), conforme exemplificado na figura 2.2.

Se o aumento de carga por transferência de outro componente falho continuar por um longo tempo, o condutor, após o regime dinâmico, atingirá o regime de operação de emergência descrito no tópico anterior. As demais sobrecargas geralmente são de curta duração, menores que 30 minutos (DEB, 2000), e devem ser suportadas pela linha sem levar a temperatura do condutor acima da máxima permitida antes que a condição normal de operação seja restaurada.

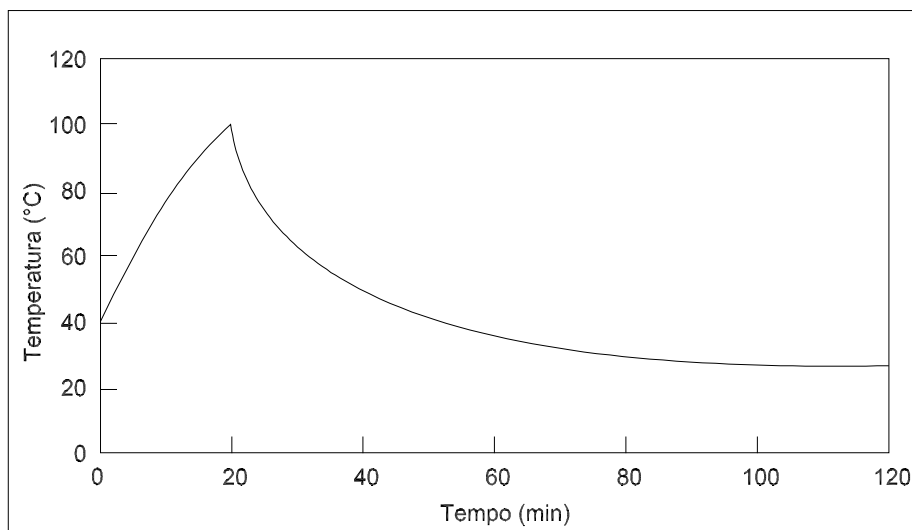


Figura 2.2: Comportamento da temperatura de um condutor submetido a um pulso de corrente de 20 min de duração (DEB, 2000)

2.2 Modelo Térmico de um Condutor

Em uma linha de transmissão aérea, a temperatura do condutor é função das quantidades de calor recebidas e perdidas por ele. Essas quantidades resultam das interações entre as condições climáticas da região atravessada pela linha e sua posição, características e condições físicas do condutor e a amplitude da corrente que o atravessa naquele instante. Os modelos térmicos tentam de diferentes maneiras descrever essas interações, procurando reproduzir da maneira mais fiel o comportamento térmico apresentado pelo cabo em campo.

Devido a essa importância fundamental que um modelo térmico preciso tem para a determinação do limite térmico de um condutor e, conseqüentemente, da capacidade de transporte da linha é que diversos estudos têm sido realizados nessa área. Alguns dos modelos que surgiram a partir desses estudos são (IEEE, 1993; CIGRÉ, 1998):

- House e Tuttle;
- ALCAN;
- Pennsylvania-New Jersey-Maryland Interconnection;
- Davis;

- Morgan;
- Black e Byrd;
- IEEE;
- CIGRÉ.

Dentre estes, os mais comumente empregados são, respectivamente, o da norma americana IEEE 738, o método de House e Tuttle e o método do CIGRÉ, seguidos por metodologias próprias de cada empresa e pelo método de Morgan (CIGRÉ, 1998).

O método de Morgan é usado extensivamente na Austrália e por concessionárias no Brasil. Nos EUA é usado o método IEEE e na Europa o do CIGRÉ. Ambos são derivados do modelo de Morgan que, por sua vez deriva dos trabalhos de House e Tuttle.

As pesquisas feitas por H. E. House e P. D. Tuttle na década de 1950 serviram como base nos Estados Unidos para a elaboração da norma utilizada no país. Lá, dois documentos são importantes quando se trata da área de limite térmico de linhas de transmissão. O primeiro é a norma IEEE 738-1993 (IEEE, 1993) onde está definida a metodologia de cálculo da relação entre a temperatura do condutor e a corrente que o atravessa neste mesmo instante. Além disso também são feitos comentários sobre a seleção dos dados de entrada e sobre os parâmetros de configuração do modelo. O segundo documento é o *National Electrical Safety Code* (NESC) o qual define, dentre outros assuntos, as distâncias mínimas de segurança entre condutores energizados de linhas de transmissão e objetos, pessoas ou animais sob ou próximos à linha.

No Brasil, a norma NBR 5422 de 1985 (ABNT, 1985) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é quem define tanto o tratamento a ser dado às variáveis atmosféricas atuantes na temperatura do cabo quanto as distâncias de segurança a serem respeitadas entre cabos e objetos próximos ou abaixo da linha. Essa norma apresenta uma limitação importante que é a falta de referência ou uma indicação clara do método de cálculo da relação temperatura-corrente do condutor a ser empregado.

Essa limitação foi contornada com a publicação da resolução normativa nº 191 de 12 de Dezembro de 2005 (ANEEL, 2005b) pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual apresenta os procedimentos para determinação da capacidade operativa das instalações de transmissão e que recomenda como metodologia de cálculo da relação temperatura-corrente de cabos aéreos a ser utilizada no país o método estabelecido pelo CIGRÉ e implementado conforme descrição presente na nota técnica 038/2005 (ANEEL, 2005a) também publicada pela ANEEL.

Na Europa é largamente utilizado o método de determinação da relação corrente-temperatura de cabos estabelecido pelo grupo de trabalho WG22-12 do Conselho Internacional de Grandes Redes Elétricas (CIGRÉ) e descrito em CIGRÉ (1992), o qual é baseado nos estudos de Vincent T. Morgan iniciados na década de 1960.

Todos os modelos citados acima são baseados em representações matemáticas complexas do comportamento do condutor em campo. Cada um deles faz diferentes suposições sobre o tratamento dado às variáveis de entrada para se chegar a saída, a qual normalmente é a temperatura do condutor ou a corrente máxima que pode atravessá-lo dada uma temperatura máxima que ele pode atingir.

Por causa disso, eles normalmente não chegam exatamente aos mesmos resultados quando se consideram os mesmos valores de entrada. De acordo com CIGRÉ (1998), o método empregado no Japão utiliza uma fórmula totalmente diferente para avaliar as perdas de calor por convecção, resultando em um limite térmico 5% a 7% menor que os determinados pelos métodos do IEEE e do CIGRÉ. No Canadá por sua vez, o método usado resulta em um limite 5% a 10% maior que as fórmulas do IEEE e do CIGRÉ. As próprias normas do IEEE e do CIGRÉ, as quais são normalmente consideradas como base para comparação de outros métodos, podem chegar a valores com uma diferença de até 10% entre si dependendo dos parâmetros de entrada considerados (SHMIDT, 1999).

2.2.1 Modelo Térmico Tradicional

Para se compreender a modelagem proposta neste trabalho, é essencial que se compreenda antes como é feito o relacionamento entre as variáveis atmosféricas, parâmetros físicos do cabo, corrente que o atravessa em um dado instante, sua temperatura superficial e características do local onde se localiza a linha de transmissão em uma modelagem matemática tradicional do problema de determinação do limite térmico de um condutor de uma linha de transmissão aérea. Por isso, no apêndice A é apresentado um modelo térmico tradicional, baseado no trabalho de Morgan, que foi obtido de uma pesquisa na literatura existente sobre o assunto.

2.3 Metodologias para Determinação do Carregamento de Linhas de Transmissão

Como a determinação da capacidade real de transporte de uma linha de transmissão sempre foi um desafio para os projetistas por causa da dependência de diversas grandezas de difícil aferição e

previsibilidade e elevada dispersão, o limite térmico do condutor deve ser definido guardando sempre uma margem de segurança para evitar que condições extremas imponham solicitações não suportáveis à linha. Sendo assim, é possível classificar as diversas metodologias para determinação do limite térmico de linhas de transmissão aéreas em várias categorias de acordo com o nível de conservadorismo de cada uma delas. Na maioria das vezes as metodologias de cálculo independem do modelo térmico usado, variando no tratamento dado aos dados de entrada do modelo.

2.3.1 Metodologias Determinísticas

As metodologias mais antigas e tradicionais de cálculo do limite térmico de linhas de transmissão são chamadas de determinísticas porque definem um valor fixo para a corrente máxima que pode atravessar o cabo, levando-o à temperatura superficial máxima de operação. Isso é feito com base em um único conjunto de condições atmosféricas que inclui temperatura ambiente alta, vento perpendicular ao cabo e em baixa velocidade e radiação solar máxima.

Essa suposição extremamente conservativa favorece a segurança operativa da linha de transmissão, pois garante que a temperatura máxima definida em projeto nunca será ultrapassada na operação em campo. No Centro de Operações do Sistema, esse valor torna-se o teto de referência nas decisões sobre o carregamento da linha, sob qualquer condição climática. Mas como os piores casos de cada variável atmosférica dificilmente ocorrem simultaneamente na prática, o valor encontrado para a temperatura superficial máxima por uma metodologia determinística fica bem acima do limite real da linha, fazendo com que o condutor seja sub-utilizado. Em Seppa et al. (2000), verificou-se que o valor encontrado deterministicamente fica entre 10% e 30% acima do valor real em 90% do tempo.

Um exemplo desse tipo de metodologia é a norma brasileira NBR 5422/85, a qual recomenda a utilização de valores constantes nos cálculos. Na falta de valores medidos em campo, é recomendado o emprego da temperatura ambiente igual à média anual da região atravessada pela linha, radiação solar igual a 1000W/m^2 e velocidade de vento igual a 1m/s (ABNT, 1985).

2.3.2 Metodologias Estatísticas

Como foi dito, a combinação dos piores casos já observados para as variáveis atmosféricas não ocorre facilmente, ficando ociosa uma boa parte da capacidade de transporte do condutor. Para contornar este problema é que foi proposta a aplicação de técnicas estatísticas sobre as variáveis atmosféricas, proporcionando além de um melhor conhecimento sobre elas, a possibilidade de buscar

resultados menos conservadores por meio da correlação mais realista dos parâmetros atmosféricos. Juntamente com isso, são considerados dois tipos de riscos (FURTADO et al., 1997):

- risco térmico: probabilidade de uma determinada temperatura do condutor ser ultrapassada;
- risco de falha: probabilidade de falha na linha por ocorrência de rompimento da isolamento do espaçamento entre condutor e objetos sob ou próximos à linha.

De acordo com Cosentino et al. (1993), as metodologias estatísticas possibilitam quantificar a frequência com que uma dada temperatura de referência é ultrapassada e a probabilidade de ocorrência de uma descarga elétrica do cabo para qualquer objeto, pessoa ou animal sob a linha em situações desfavoráveis e em um determinado período, para o sistema operando em regime normal e em emergência.

No método desenvolvido em Cosentino et al. (1993), o qual foi utilizado em diversos outros trabalhos (JUNIOR; RIBEIRO; RAMOS, 1997; KOSMANN, 1997; FURTADO et al., 1997), os riscos térmicos são calculados considerando que as temperaturas no cabo condutor se distribuem de acordo com uma função densidade de probabilidade. Já os riscos de falha são determinados considerando a ocorrência simultânea de sobretensões que podem dar origem a descargas fase-terra por rebaixamento excessivo do cabo e condições ambientais e de carregamento que levem o cabo a uma distância mínima de pessoas, objetos ou animais sob a linha. Ao estabelecer um risco de falha máximo, é possível determinar a distância mínima entre cabo e obstáculo e a partir dela, o rebaixamento máximo admissível do cabo.

Normalmente em metodologias estatísticas o cálculo do limite térmico do condutor é feito para 2 ou 4 cenários diferentes, os quais são dia no verão, noite no verão, dia no inverno e noite no inverno. Isso é feito pois estes períodos apresentam as características climáticas extremas de uma mesma região.

A principal vantagem das metodologias estatísticas é que elas permitem um aumento na potência máxima a ser transmitida sem perda de confiabilidade e com riscos mensuráveis e próximos aos que são observados em metodologias determinísticas (FURTADO et al., 1997).

2.3.3 Metodologias em Tempo Real

A partir da década de 1990, com a evolução da informática e das telecomunicações, começaram a surgir equipamentos de supervisão em tempo real de parâmetros das linhas de transmissão e de

parâmetros atmosféricos. O tratamento computacional dessas informações permite que se conheça em tempo real o estado da linha e que se tire partido da capacidade ociosa nela a cada instante.

O objetivo básico das metodologias de cálculo em tempo real do limite térmico de condutores não é o de operá-los em temperaturas mais altas ou com distâncias cabo-solo menores do que o definido em projeto e sim o de operar a linha o mais próximo possível do seu limite na maioria do tempo (DOUGLASS; MOTLIS; SHEPPA, 1999). Ou seja, dado o limite térmico da linha de transmissão (que pode ter sido calculado por uma metodologia determinística ou estatística), a função do monitoramento em tempo real dela é de operá-la o mais próximo possível desse limite instante a instante.

Essas metodologias podem ser divididas em monitoramento direto e indireto (STEPHEN, 2000). O monitoramento em tempo real direto pode ser feito medindo a corrente no condutor, a tensão mecânica sobre o cabo ou a altura de segurança cabo-solo.

A medição direta da temperatura do condutor é feita através de sensores térmicos instalados diretamente sobre o condutor energizado e que transmitem seus dados por meio de sinais de rádio ou de celular para uma estação central. Como o sensor mede a temperatura pontualmente, ele deve ser instalado nos vãos críticos da linha, pois não é possível extrapolar os valores obtidos com ele para os demais vãos. Além disso, o fato de estar no mesmo potencial do cabo acarreta uma dificuldade extra para sua instalação e manutenção (NOGUEIRA; AZZAM; SOUZA, 2001).

Já a medição direta da altura cabo-solo é realizada por meio de sensores ultrassônicos ou câmeras de vídeo. Como na maior parte das linhas de transmissão o limite mínimo da altura cabo-solo acontece antes de se atingir o limite de temperatura danosa ao condutor, esse método apresenta como grande vantagem a monitoração direta dessa variável, sem simplificações ou cálculos. Ele também reflete a resposta mecânica do condutor a sua temperatura média, evitando possíveis erros de uma medição pontual. Uma grande desvantagem desta técnica é que os sensores normalmente têm que ser instalados no solo sob a linha, o que nem sempre é possível de ser feito, principalmente em casos de travessias sobre rodovias, ferrovias e sobre a água (NOGUEIRA; AZZAM; SOUZA, 2001).

No mundo todo, entre as empresas que fazem monitoramento direto de suas linhas, a medição da tensão mecânica sobre o condutor é o método mais utilizado (SEPPA et al., 2000). A altura de segurança do condutor é diretamente proporcional à tensão mecânica a qual o cabo está submetido. Por isso, a sua medição permite uma estimativa bem precisa da altura cabo-solo para vários vãos (localizados entre as estruturas de ancoragem onde são instalados os sensores), refletindo o efeito das condições climáticas e corrente por todo esse percurso. Outra vantagem é a instalação do sensor atrás da cadeia

de ancoragem, ou seja, do lado desernegizado da linha, o que facilita a instalação e manutenção (NOGUEIRA; AZZAM; SOUZA, 2001).

O monitoramento em tempo real também pode ser feito indiretamente por meio da medida dos parâmetros atmosféricos e sua conseqüente aplicação em um modelo térmico do condutor. Esse método é o menos dispendioso pois pode fazer uso de dados obtidos por estações meteorológicas de centros de previsão do clima, as quais já estão instaladas em várias regiões do país. Um cuidado que se deve ter ao usar esses dados é o de verificar a validade dos dados medidos na região atravessada pela linha, pois ela pode apresentar características climáticas ligeiramente diferentes da área onde a estação meteorológica está instalada. Alguns trabalhos já foram publicados abordando técnicas de transferência espacial de variáveis climáticas para se fazer as correções necessárias nesses dados (SOUZA et al., 2001; GUETTER; HOFFMANN; MELLO, 2005).

Como as metodologias de medição em tempo real têm por finalidade a operação da linha o mais próximo do seu limite, é possível fazer a combinação delas com uma metodologia estatística. A metodologia estatística entra na determinação mais acertada do limite térmico da linha e a metodologia de medição em tempo real entra na operação da linha mais próxima desse limite, aproveitando ao máximo a capacidade de transporte do condutor com riscos controlados.

2.4 Metodologias para Ampliação do Limite Térmico de Linhas de Transmissão

Os estudos para desenvolvimento de modelos térmicos e metodologias de cálculo mais precisas constituem apenas uma vertente do total de pesquisas na área de ampliação do limite térmico de linhas de transmissão. As empresas do setor de transmissão têm realizados estudos em diversas áreas com a finalidade de ampliar a capacidade de carregamento de suas linhas, desde opções menos conservativas como a operação das linhas em temperaturas mais altas, chegando até a opções mais severas como o recondutoramento adotando cabos tecnologicamente mais avançados.

Em (CIGRÉ, 1998) foi apresentada uma pesquisa sobre como as empresas do setor de transmissão de várias partes do mundo tentam contornar o problema do limite térmico de suas linhas. O emprego de novos condutores termo-resistentes que apresentam menores variações na distância cabo-solo em altas temperaturas têm se tornado cada vez mais freqüente. De acordo com (OLIVEIRA, 2000), os condutores de alumínio 1350 (a liga mais usada em cabos) têm uma temperatura máxima recomendável

em torno de 90°C. As novas ligas metálicas empregadas em condutores permitem seu funcionamento em temperaturas acima de 200°C em regime normal de operação, podendo chegar a 360°C com algumas ligas especiais.

Desde a década de 1980 estão sendo desenvolvidos condutores formados por fios trapezoidais ao invés de circulares. As idéias principais desses condutores são a de eliminar o espaço existente entre os fios, os quais ficam mais unidos, melhorando a transferência de calor do núcleo para a superfície do cabo e a idéia de aumentar a área da seção de alumínio (o que reduz a resistência do condutor) mantendo o mesmo diâmetro externo de um cabo convencional. Apesar das vantagens apresentadas, as quais podem elevar a capacidade de transmissão da linha em 50% ou até mais, os altos custos desses novos tipos de cabo e do serviço de recondutoramento ainda são os principais fatores limitantes para o uso extensivo dessa opção. Quando se opta pelo recondutoramento normalmente ele é feito trocando o cabo antigo por um novo do mesmo tipo, apenas com uma bitola maior, o que implica em custos menores.

O retensionamento dos condutores e a elevação das torres ou raspagem do solo sob a linha também são opções empregadas para ampliar o seu carregamento. Quando o limite de carregamento de uma linha de transmissão é dado pela altura de segurança cabo-solo de alguns vãos críticos seus, essas duas técnicas permitem aumentar a distância entre os condutores e a superfície sob eles, possibilitando que a capacidade de transmissão seja ampliada sem ultrapassar o limite definido em norma.

2.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento da determinação do limite de carregamento de linhas de transmissão aéreas. Foram descritos os fatores que limitam a corrente que pode atravessar um condutor em um dado instante, além dos fatores que dependem do cálculo do limite térmico de uma linha.

Foram descritas também as características de cada um dos regimes de operação de um condutor, para os quais devem ser determinados os valores máximos da temperatura superficial que ele pode atingir e a corrente que o leva a operar com essa temperatura.

Foram apresentados os modelos térmicos mais utilizadas no mundo (IEEE e CIGRÉ) pelas empresas do setor de transmissão, bem como a norma brasileira em vigor (NBR 5422/85) e a resolução nº 191 da ANEEL que define os procedimentos de cálculo das instalações de transmissão no país e o

modelo térmico recomendado. Além disso, as diferenças nos valores obtidos pelos diversos modelos térmicos em uso no mundo foram apresentados.

Por fim, foram descritas as várias metodologias para a determinação do carregamento de linhas de transmissão, assim como suas principais vantagens e desvantagens.

Capítulo 3

Sistemas de Inferência Difusos

3.1 Introdução

Como foi dito anteriormente, vários estudos na área de ampacidade já estão sendo feitos com o emprego de novas tecnologias em materiais, monitoramento e principalmente técnicas matemáticas mais modernas que se consolidaram nos últimos 20 anos. Dentre estas técnicas se destacam as redes neurais, os algoritmos genéticos e a lógica difusa.

Como o processo de determinação do limite de carregamento de uma linha de transmissão envolve fatores climáticos que nem sempre são mensuráveis com uma boa precisão e outros fatores difíceis de se determinar ou muito vagos, como por exemplo a reflexão de calor pela superfície do solo sob a LT, parâmetros que dependem das condições de conservação e idade do condutor, dentre outros, é que se verificou a possibilidade do uso de uma metodologia para tratamento e análise de informações imprecisas na solução deste problema.

Por tentar reproduzir a capacidade humana de tomar decisões racionais e chegar a respostas precisas com base em um conhecimento que é incompleto, inexato, ou não totalmente confiável, fazendo uso apenas de regras simples é que a lógica difusa foi escolhida como ferramenta base da metodologia proposta neste trabalho. Suas características intrínsecas permitem a ela incorporar em um mesmo sistema de inferência difuso o conhecimento objetivo extraído de uma massa de dados numéricos com o conhecimento subjetivo obtido a partir de informações lingüísticas fornecidas por uma pessoa especialista na área, podendo aproximar o funcionamento de sistemas extremamente complexos onde é difícil construir um modelo matemático preciso.

Para o entendimento do funcionamento da metodologia implementada, neste capítulo será feita uma apresentação dos conceitos mais importantes relativos aos sistemas de inferência difusos, partindo de uma apresentação dos fundamentos da lógica difusa, passando pela exposição dos métodos de agrupamento difuso de dados, pela descrição dos dois tipos de sistemas difusos e de seus componentes e finalizando com algumas aplicações dessa ferramenta encontradas na literatura.

3.2 Lógica Difusa

Sabe-se que qualquer fenômeno físico possui um número enorme de restrições e que quanto mais detalhadamente se analisa esse fenômeno, mais restrições se tornam relevantes. Mas a capacidade do ser humano em lidar com informações precisas é limitada, um grande nível de detalhamento de um sistema acaba perdendo relevância na hora de ser processado pelo cérebro. O grande trunfo do pensamento humano é representar essas informações imprecisas ou vagas por meio de adjetivos comuns (como os conceitos de 'alto', 'médio', 'baixo', 'quente' ou 'muito frio', dentre outros). O processamento dessas variáveis é bem mais fácil e se dá por meio da utilização de regras de inferência bem simples do tipo "*SE...*, *ENTÃO...*", o que permite chegar-se a conclusões precisas mesmo quando se analisam situações complexas. É nessa característica da mente humana que a os sistemas de inferência difusos se baseiam, fazendo uso dos conceitos da Teoria dos Conjuntos Difusos e da Lógica Difusa.

A Lógica *Fuzzy*, ou em português Lógica Difusa ou Nebulosa, pode ser definida, em um sentido mais restrito, como um sistema lógico multi-valor que é uma extensão da lógica clássica booleana. Mas hoje em dia o sentido predominante dado ao termo lógica difusa é praticamente o mesmo de teoria dos conjuntos difusos, que é aquela que descreve conjuntos que não possuem uma fronteira definida (MATHWORKS, 2006).

3.2.1 Teoria De Conjuntos Difusos

A Teoria de Conjuntos Difusos, concebida por Lotfi A. Zadeh na década de 1960, foi desenvolvida com o objetivo de representar informações de caráter impreciso, incompleto ou vago. Essa teoria se distingue da teoria clássica de conjuntos basicamente em um ponto fundamental: o conceito de pertinência. Na teoria clássica, dado um elemento x e um conjunto A , ambos contidos em um universo

X , esse elemento pode estar em apenas duas condições: ou x pertence a A ou x não pertence a A . Desta forma pode ser definida uma função característica da seguinte maneira (KLIR, 1995):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se e somente se } x \in A \\ 0, & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

Na teoria de conjuntos difusos é feita uma generalização dessa premissa da teoria clássica de função característica booleana, assumindo-se que não existe uma fronteira bem definida separando dois conjuntos adjacentes. Isso faz com que a função característica de um elemento a um conjunto possa assumir infinitos valores desde 0 (quando o elemento não pertence ao conjunto) até 1 (quando o elemento pertence exclusivamente ao conjunto), dependendo do grau de pertinência do elemento ao conjunto em questão, passando a ser chamada de função de pertinência. A partir deste ponto a pertinência de um elemento a um conjunto passa a não ser mais algo baseado somente em 'pertence' ou 'não pertence', mas sim baseado no grau com que se pertence a esse conjunto. Assim elementos podem pertencer a um conjunto em maior ou menor grau dependendo da sua função de pertinência.

A definição matemática de um conjunto difuso A , em um universo X , definido por uma função de pertinência $\mu_A(x) : X \rightarrow [0; 1]$ é feita da seguinte forma (KLIR, 1995):

$$A = \{\mu_A(x)/x\} \quad \text{com } x \in X \quad (3.2)$$

Um determinado elemento pode pertencer a dois ou mais conjuntos difusos ao mesmo tempo, mas o somatório dos graus de pertinência dele aos conjuntos tem que obrigatoriamente ser igual a 1 (PEDRYCZ, 2005).

$$\sum_{i=1}^C u_{ik} = 1, \quad \text{com } k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.3)$$

Onde:

u_{ik} : grau de pertinência do ponto k ao conjunto i ;

C : número de conjuntos;

N : número de pontos.

Normalmente os conjuntos difusos são definidos de forma que possuam pelo menos um elemento com grau de pertinência igual a 1 e pelo menos um elemento com grau de pertinência igual a 0.

Quando isso acontece diz-se que o conjunto está na forma normal máxima (COX, 1999). Apesar dessa ser a forma mais tradicional, nada impede que um conjunto tenha como limites máximo e mínimo valores entre 0 e 1.

3.2.2 Variáveis Lingüísticas

Uma vez que os dados numéricos são agrupados em conjuntos difusos define-se uma variável lingüística para representar esses grupos. A idéia de variável lingüística é o centro da técnica de modelagem difusa de dados. Ela é uma variável cujos valores são dados por adjetivos que de alguma forma se relacionam, podendo ser ordenados, como por exemplo 'baixo', 'médio' e 'alto'. Cada um destes valores corresponde a um conjunto difuso e passa a representá-lo juntamente com uma determinada função de pertinência (figura 3.1). Neste ponto o valor numérico do dado não é mais importante e sim o seu grau de pertinência a determinado conjunto. Esse mapeamento de valores numéricos para valores lingüísticos é o centro da técnica de modelagem difusa de dados e permite que sistemas complexos demais para o tratamento matemático convencional sejam analisados de uma forma mais simples.

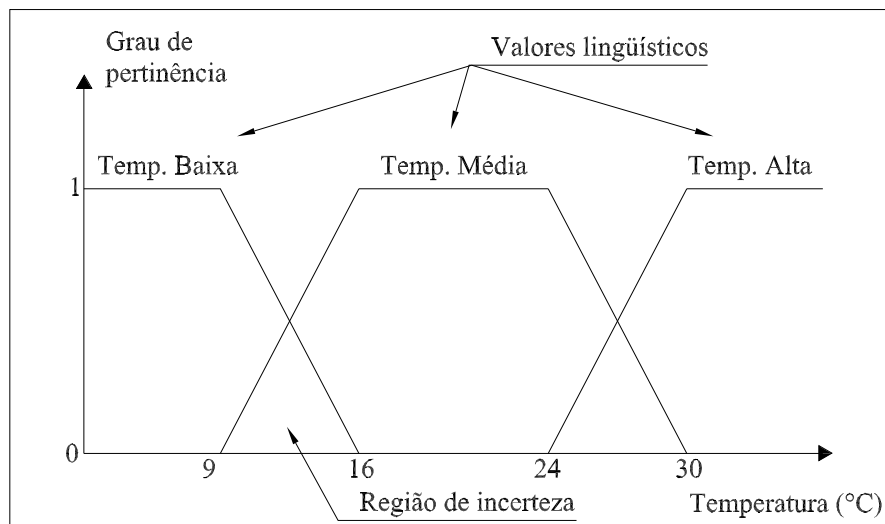


Figura 3.1: Exemplo de variável lingüística representando conjuntos difusos.

3.2.3 Funções de Pertinência

O conceito de função de pertinência já foi mostrado anteriormente, mas em uma definição formal ela é uma curva que define como cada elemento no espaço de entrada é mapeado para um grau de pertinência entre 0 e 1 dentro do conjunto difuso (MATHWORKS, 2006). Dependendo dos dados que se deseja representar, do contexto do problema, da experiência e perspectiva do pesquisador, as funções de pertinência podem assumir as mais diferentes formas possíveis. Na figura 3.2 são mostradas as formas mais utilizadas hoje em dia.

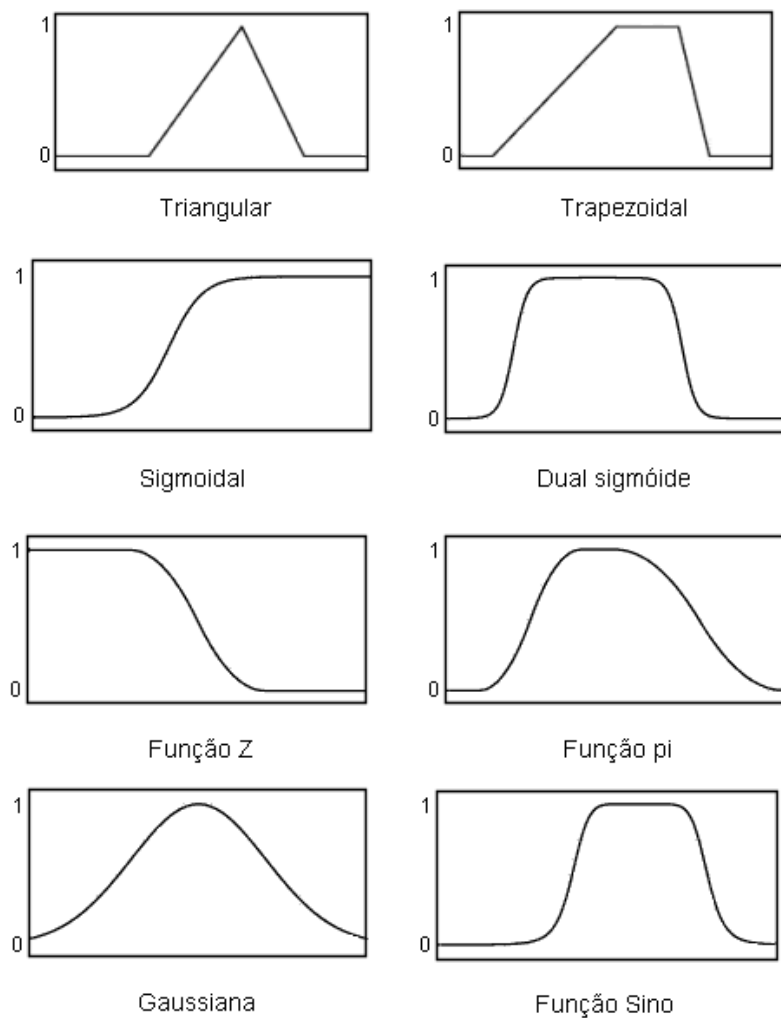


Figura 3.2: Funções de pertinência comumente utilizadas (MATHWORKS, 2006)

Como pode ser visto acima, normalmente uma função de pertinência é definida por uma função analítica contínua ou pela combinação de várias destas, mas em alguns casos essas formas-padrão não são suficientes para representar as características importantes de uma determinada variável. Nesta

circunstância, pode-se definir uma função de pertinência com uma forma arbitrária que represente de maneira mais adequada o comportamento da variável. Esse tipo de representação é comum quando se faz uso de algoritmos de classificação difusa como o *Fuzzy C-means* para a definição dos conjuntos difusos. Isso, no entanto, pode complicar a verificação e a validação do sistema, além de afetar seu desempenho computacional (COX, 1999).

3.2.4 Operações com Conjuntos Difusos

A teoria de conjuntos clássica define algumas operações para lidar com os conjuntos clássicos. Da mesma forma existe também na lógica difusa uma série de operações especificamente definidas para combinar e modificar conjuntos difusos.

Como os conjuntos difusos não são bem definidos, as operações da lógica difusa são definidas diretamente sobre as funções de pertinência, fazendo com que exista mais de uma maneira de se realizar cada uma dessas operações, dependendo do problema e do contexto em que o sistema se enquadra. Por isso é necessária a definição de algumas regras para poder caracterizar cada uma das operações básicas de conjuntos: intersecção, união e complemento. As funções que se enquadram nessas regras são chamadas de Normas Triangulares (*T-norms*) para a intersecção difusa e Co-normas Triangulares (*T-conorms* ou *S-norms*) para a união difusa.

Intersecção Difusa ou Norma T

A intersecção difusa é uma operação binária da forma $i : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ e que satisfaz às seguintes propriedades para todo $x, y, z, w \in [0, 1]$ (KLIR, 1995):

- Comutatividade: $i(x, y) = i(y, x)$
- Associatividade: $i(x, i(y, z)) = i(i(x, y), z)$
- Monotonicidade: se $x \leq y$ e $w \leq z$, então $i(x, w) \leq i(y, z)$
- Condições de contorno: $i(x, 0) = 0$ e $i(x, 1) = x$

As funções que obedecem as condições acima e que são as mais utilizadas para representar a intersecção difusa são a operação de mínimo: $i(x, y) = \min(x, y)$ e o produto algébrico: $i(x, y) = x \cdot y$.

União Difusa ou Co-norma T ou Norma S

A união difusa é uma operação binária da forma $u : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ e que satisfaz às seguintes propriedades para todo $x, y, z, w \in [0, 1]$ (KLIR, 1995):

- Comutatividade: $u(x, y) = u(y, x)$
- Associatividade: $u(x, u(y, z)) = u(u(x, y), z)$
- Monotonicidade: se $x \leq y$ e $w \leq z$, então $u(x, w) \leq u(y, z)$
- Condições de contorno: $u(x, 0) = x$ e $u(x, 1) = 1$

As funções comumente empregadas para representar a união difusa são a operação de máximo: $u(x, y) = \max(x, y)$ e a união clássica de conjuntos: $u(x, y) = x + y - x \cdot y$.

Complemento Difuso

A operação de complemento de um conjunto difuso é uma operação da forma $c : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ e que satisfaz às seguintes propriedades para todo $x, y \in [0, 1]$ (KLIR, 1995):

- Condições de contorno: $c(0) = 1$ e $c(1) = 0$
- Monotonicidade: se $a \leq b$, então $c(a) \geq c(b)$

O complemento de um conjunto difuso é normalmente dado por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

Apesar da grande variedade de normas T e co-normas T, as operações básicas estabelecidas pelo desenvolvedor da lógica difusa, Lotfi Zadeh, (ver tabela 3.1) são as mais utilizadas pela sua eficácia e por satisfazerem quase todas as propriedades algébricas de conjuntos clássicos, o que torna seu uso mais simples.

Tabela 3.1: Operações básicas de conjuntos difusos definidas por Lotfi Zadeh (COX, 1999)

Operação	Simbologia	Operador Lógico	Definição Difusa
Intersecção	$C = A \cap B$	E	$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$
União	$C = A \cup B$	OU	$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$
Complemento	$C = \bar{A}$	NÃO	$\mu_C(x) = 1 - \mu_A(x)$

3.2.5 Regras de Inferência

O núcleo de um sistema de inferência difuso são as suas regras de inferência. São elas que relacionam as variáveis de entrada com a variável de saída. Cada regra possui uma série de proposições condicionais ou incondicionais sobre as variáveis de entrada que são avaliadas de acordo com seu grau de verdade para gerar o valor correspondente da saída. São essas proposições que relacionam os valores numéricos das variáveis de entrada com as variáveis lingüísticas (e conseqüentemente com os conjuntos difusos) definidas previamente para cada entrada. Uma regra de inferência possui a seguinte forma geral:

$$\textit{Se } x \textit{ é } Z \textit{ então } y \textit{ é } W$$

Onde x e y são as variáveis de entrada e saída respectivamente e Z e W são valores lingüísticos associados a conjuntos difusos. Além da relação de conseqüência, a regra também diz que o grau de pertinência de y a W depende do grau de pertinência de x a Z .

Verifica-se que a regra se divide em duas partes: a parte precedida pelo *Se* é chamada de antecedente ou predicado da regra e a parte precedida pelo *Então* é chamada de conseqüente ou conclusão da regra. O antecedente pode possuir diversas proposições, as quais são combinadas por meio dos operadores lógicos mostrados na tabela 3.1.

As regras de inferência são normalmente criadas a partir de informações prévias do funcionamento do sistema que se deseja modelar. Essas informações podem ser dadas por uma pessoa especialista no funcionamento do sistema, por um modelo analítico já existente ou extraídas de uma massa de dados históricos medidos no próprio sistema.

A grande maioria dos sistemas de inferência difusos possuem somente regras com proposições condicionais. Neste caso a ordem em que essas regras são executadas não interfere no funcionamento do sistema (COX, 1999).

O número de regras de inferência é um ponto importante de qualquer sistema difuso, pois ele interfere diretamente na precisão do resultado final. Se o número de regras for muito pequeno, o modelo pode não ser capaz de representar o comportamento do sistema real com a precisão necessária. Mas se o número de regras for muito grande, o modelo pode se tornar muito específico, perdendo sua capacidade de generalização, principalmente se as regras forem criadas a partir de dados históricos, além de aumentar o esforço computacional para a sua execução (GUILLAUME, 2001).

3.3 Agrupamento Difuso de dados

Quando se trata de algoritmos de agrupamento para utilização em sistemas de inferência difusos, deve-se ter em mente que os grupos por eles definidos devem representar certas características e comportamentos dos dados que possam ser usados mais tarde para a criação das regras de inferência a serem utilizadas pelo sistema. Caso o agrupamento dos dados não tenha sido feito de forma adequada, os grupos formados não terão ligação com a realidade fazendo com que o sistema de inferência seja totalmente prejudicado já em sua base, não conseguindo relacionar a entrada com a saída de maneira eficaz.

Muitos pesquisadores já estudaram e ainda estão estudando quais dados devem ser considerados para a realização de um agrupamento a ser utilizado em sistemas de inferência difusos. Os estudos já feitos mostram que o agrupamento pode ser feito basicamente com o uso somente de dados de entrada, somente com dados de saída ou com os dados de entrada e saída conjuntamente.

3.3.1 Tipos de Agrupamento

Quando se utilizam somente dados de entrada, alguns dados que apresentam uma similaridade podem ser colocados em um mesmo grupo apesar de resultarem em diferentes valores de saída, o que leva o sistema a um conflito. O procedimento de gerenciamento de conflito proposto em Wang e Mendel (1992) pode ser utilizado neste caso, definindo-se um grau para cada regra gerada pelos dados no sistema de inferência e aceitando-se somente aquela com maior grau, dentre as conflitantes.

No caso do uso somente de dados de saída, a parte das regras que se relaciona com a entrada, chamada de premissa das regras, é definida através da projeção dos grupos gerados pelos dados de saída sobre o espaço da entrada. Em um sistema real quase sempre existem diferentes combinações

das entrada que levam à mesma saída, por isso, este tipo de operação não é trivial e o seu resultado pode ser afetado por ruído nos dados (GUILLAUME, 2001).

A utilização conjunta dos dados de entrada e saída para a realização do agrupamento faz com que toda a informação disponível seja usada para a criação dos grupos. Assim, as regras baseadas nestes serão completamente definidas, com a premissa correspondendo a parte do grupo relacionada com a entrada e a conclusão correspondendo à parte relacionada à saída. A desvantagem desta metodologia é que os grupos formados são de difícil compreensão, pois alguns dados podem pertencer ao mesmo grupo, embora não estejam próximos nem no espaço da entrada e nem no espaço da saída. A sua proximidade se dá por causa da compensação entre suas distâncias nos dois espaços (GUILLAUME, 2001). Neste caso também podem aparecer conflitos e em caso afirmativo, o gerenciamento destes se faz necessário. O procedimento definido em Wang e Mendel (1992) trata exatamente deste caso.

3.3.2 Métodos de Agrupamento Difuso

A maneira mais simples de se fazer o agrupamento difuso de dados é dividindo o universo de discurso de cada variável (todos os valores possíveis de serem assumidos pela variável em questão) em N partes iguais, cada uma com uma função de pertinência triangular, trapezoidal ou sino e com uma região de incerteza (figura 3.1) entre os conjuntos com 50% da largura do conjunto (COX, 1999; GUILLAUME, 2001).

Apesar de funcionar em uma boa parte dos casos, essa abordagem é muito simplista e não leva em conta no agrupamento a distribuição dos dados. Uma variação deste método que corrige esse problema consiste em dividir o universo de discurso em N partes, posicionar o centro da função de pertinência no valor médio dos dados de cada parte e definir a largura delas como um desvio padrão (COX, 1999).

Métodos mais avançados de agrupamento difuso de dados são necessários quando se pretende realizar o agrupamento conjunto de dados históricos de entrada e saída. Dentre estes, destacam-se os métodos de agrupamento baseado em funções objetivo, como o algoritmo *Fuzzy C-Means* e os algoritmos genéticos. Os algoritmos genéticos são usados para selecionar o melhor número de conjuntos difusos para cada variável de entrada de acordo com os dados, tentando durante o processo de evolução maximizar a performance do sistema e minimizar o tamanho da base de regras (GUILLAUME, 2001). Já o *Fuzzy C-Means* faz o agrupamento de maneira que cada um dos dados pertença a cada um dos grupos com um grau de pertinência que depende da distância entre o dado e o centro do grupo.

O valor chamado de centro do grupo é definido de maneira aleatória no início da execução do algoritmo e nas demais iterações ele é atualizado conforme o grau de pertinência dos dados analisados (PEDRYCZ, 2005).

As técnicas de agrupamento com funções-objetivo apresentam uma desvantagem: o número de grupos deve ser definido previamente pelo pesquisador. Existem técnicas de agrupamento que definem por si só o número de grupos, baseando-se em alguns parâmetros de entrada. Apesar destes parâmetros também serem definidos previamente pelo pesquisador, existem valores-padrão que atendem a grande maioria dos casos com sucesso. Uma destas técnicas é o algoritmo de agrupamento subtrativo (*subtractive clustering*) descrito em Chiu (1994). Nele, os dados das M variáveis são considerados como pontos em um hiperplano de M dimensões. Inicialmente cada ponto é considerado como um possível centro de um grupo. Durante as iterações, é calculado um potencial para cada um desses pontos e o ponto que possuir o maior potencial dentro de um certo raio de ação é considerado o novo centro do grupo. Esse processo é repetido até que se atinja uma certa precisão, onde os potenciais dos pontos praticamente param de variar.

Os grupos formados por este algoritmo não são simples de se compreender por se sobreporem no espaço de cada variável (ver figura 3.3), o que complica a definição de valores lingüísticos a cada um deles. Por isso seu uso é geralmente restrito a sistemas de inferência difuso do tipo Sugeno (item 3.4.1) e em algoritmos de classificação de padrões baseados em lógica difusa.

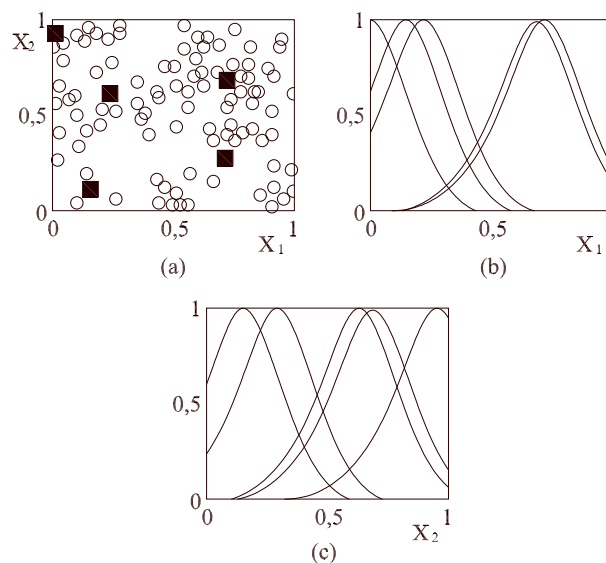


Figura 3.3: (a) Exemplo de grupos formados pelo algoritmo de agrupamento subtrativo no espaço \mathbb{R}^2 , (b) forma dos grupos no espaço da variável X_1 e (c) no espaço da variável X_2 (GUILLAUME, 2001)

3.4 Sistemas Difusos

Apesar dos sistemas de inferência difusos serem empregados em uma vasta gama de aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento hoje em dia e de serem muito dependentes do problema em análise, sua forma básica não varia muito. Todos eles têm basicamente os componentes mostrados na figura 3.4.

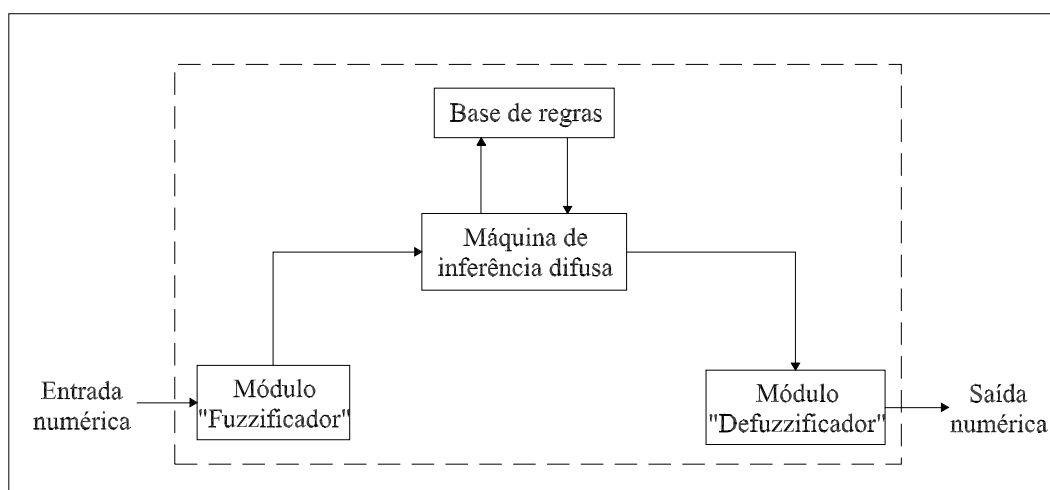


Figura 3.4: Esquema de um sistema de inferência difuso

O módulo *fuzzificador* é o responsável por transformar as informações numéricas das variáveis de entrada em informações lingüísticas manipuláveis pelo sistema de inferência, ou seja, é ele quem diz por qual conjunto difuso aquele dado numérico de entrada é representado e com qual grau de pertinência. A base de regras é o conjunto de todas as regras que foram definidas previamente, tanto por meio de um especialista na área quanto por meio de dados históricos, para guiar o funcionamento do sistema. A máquina de inferência difusa, também conhecida como motor de inferência, é a parte funcional do sistema. É ela que realiza o processamento das entradas consultando a base de regras e definindo quais destas e em qual ordem serão aplicadas a cada momento. O módulo *defuzzificador* é o responsável pela conversão dos valores lingüísticos da variável de saída, definidos pela máquina de inferência, de volta para valores numéricos, ou seja, definindo qual é o valor numérico que melhor representa aquele conjunto difuso definido para a variável de saída.

Em sua estrutura, um sistema de inferência difuso não é muito diferente de um sistema especialista tradicional, chegando a ser considerado como um caso especial de sistema especialista (KLIR, 1995).

A diferença entre os dois está no tratamento oferecido aos dados de entrada e saída, os quais são convertidos para variáveis lingüísticas para se realizar seu processamento no sistema difuso.

3.4.1 Tipos de Sistemas Difusos

Os sistemas de inferência difusos apresentam duas características básicas que são a capacidade de lidar com conceitos lingüísticos imprecisos e a capacidade de reproduzir o comportamento de sistemas não lineares com grande eficácia. Por isso podem ser implementados dois tipos básicos de sistemas difusos dependendo de qual característica se deseja enfatizar.

Sistemas Mamdani

Os sistemas que se apóiam na capacidade de modelagem por meio de conceitos lingüísticos imprecisos, também conhecidos como Sistemas Mamdani, tem a vantagem de se aproximar à linguagem utilizada normalmente pelos seres humanos, portanto sendo sistemas de fácil entendimento. Isso faz com que eles sejam os mais apropriados quando as informações para criação das regras de inferência são dadas por uma pessoa especialista no problema em questão (KLIR, 1995). Apesar desses casos englobarem a maioria dos sistemas difusos, nem sempre somente o uso desse tipo de informação é suficiente, sendo necessária a utilização também de informações numéricas obtidas de dados históricos (GUILLAUME, 2001). Para se fazer isso, foi proposto em Wang e Mendel (1992) um método geral para combinar informações numéricas (retiradas de dados históricos) com informações lingüísticas (fornecidas por um especialista) em uma mesma base de regras.

O emprego de dados históricos para a geração das regras de inferência em um sistema do tipo Mamdani na maioria das vezes faz com que apareçam regras conflitantes, as quais possuem o mesmo antecedente mas levam a diferentes conseqüências. Em Wang e Mendel (1992) é sugerido um procedimento de definição de um peso para cada regra criada, escolhendo-se assim aquela com maior peso dentre as conflitantes.

A base de regras de inferência em um sistema Mamdani normalmente é muito grande, já que é necessária uma regra para cada combinação das variáveis de entrada que gera uma saída (GUILLAUME, 2001). Por exemplo, se um sistema possui duas variáveis de entrada e cada uma delas está dividida em 3 conjuntos difusos, serão necessárias $3^2 = 9$ regras para cobrir todas as opções de entrada e determinar a saída. Para sistemas muito grandes, com diversas entradas ou entradas representadas por

muitos conjuntos difusos, isso faz com que seja necessário um poder de processamento computacional significativo, além de um bom espaço de memória para armazenar a base de regras, apesar de algumas dessas regras representarem combinações das entradas que nunca ou dificilmente ocorrerão na prática.

Os sistemas do tipo Mamdani foram inicialmente desenvolvidos por E. H. Mamdani na década de 1970 para a utilização em controladores lógicos de processos. Apesar desta continuar sendo a sua principal aplicação, hoje em dia encontram-se em uso nas mais diversas áreas, inclusive fora da engenharia. A modelagem de sistemas econômicos complexos, com definição de preços baseada na análise de demanda, elasticidade, custos de produção, transporte e armazenamento, avaliação da concorrência, etc. tem sido feita desde a década de 1980 com sucesso (COX, 1999). A aplicação em previsão de séries temporais (presentes nas áreas de economia, meteorologia, processamento de sinais, dentre outras) tem apresentado também resultados bastante satisfatórios (WANG; MENDEL, 1992). Seu emprego em sistemas de classificação de dados e reconhecimento de padrões chega a apresentar em alguns casos resultados superiores a algoritmos baseados em redes neurais, os quais são normalmente empregados para este fim (COX, 1999). Em Deb (2000) é sugerida a utilização de um sistema de inferência difuso do tipo Mamdani para a determinação da ampacidade em linhas de transmissão, sugestão essa que serviu de inspiração para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Sistemas Sugeno

O segundo tipo de sistema difuso é focado na capacidade de reproduzir o comportamento de sistemas não lineares e de difícil modelagem matemática. Estes são denominados de Sistemas TSK (Takano-Sugeno-Khan) ou Sistemas Sugeno devido aos estudos de M. Sugeno iniciados na década de 1980 sobre criação de sistemas de inferência difusos auto-aprendizes, ou seja, que definem sua própria base de regras a partir de dados históricos de entrada e saída.

Na prática, a diferença entre os dois tipos de sistemas de inferência difusos está no formato das suas regras e na forma como é realizada a *defuzzificação* dos valores de saída. As regras de um sistema Mamdani tem a seguinte forma:

$$\textit{Se } x \textit{ é } A \textit{ e } y \textit{ é } B, \textit{ então } z \textit{ é } C$$

Com x , y e z sendo valores lingüísticos. Após a avaliação desta regra, é necessário o uso de uma técnica de *defuzzificação* para se determinar o valor numérico correspondente da saída. Em

Roychowdhury e Pedrycz (2001) são descritas diversas estratégias de *defuzzificação*, destacando-se o método do centro de gravidade, o qual é o mais utilizado devido a sua simplicidade.

Enquanto as regras de um sistema Mamdani lidam somente com valores lingüísticos, as regras de um sistema Sugeno utilizam valores lingüísticos no antecedente das regras e valores numéricos no conseqüente, apresentado a seguinte forma:

$$\text{Se } x \text{ é } A \text{ e } y \text{ é } B, \text{ então } z = c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot y$$

É possível verificar nesta regra que o valor numérico da variável de saída é dada diretamente por uma combinação linear dos valores das variáveis de entrada. As constantes multiplicativas presentes no conseqüente da regra são determinadas por meio do emprego de métodos recursivos como o dos mínimos quadrados (WU; LU, 1999) ou por meio de redes neurais (gerando os chamados sistemas de inferência *neuro-fuzzy* ou ANFIS) (GUILLAUME, 2001; MATHWORKS, 2006).

No caso de um sistema Sugeno, existe apenas uma regra para cada grupo difuso que representa as entradas. Isso gera um sistema linear que possui uma única solução e garante que todas as regras serão ativadas em algum momento, resultando em uma base de regras bem menor.

Os sistemas do tipo Sugeno, pelo seu próprio processo de construção, têm um emprego menos abrangente que os do tipo Mamdani. Se uso se dá principalmente em controle de processos, previsão de séries temporais e, na área de sistemas de potência, em previsão de carga.

Em Wu e Lu (1999) foi empregado um sistema Sugeno para previsão de carga a curto prazo (de 1 hora a 24 horas a frente). Nesse estudo foi utilizado o algoritmo recursivo de mínimos quadrados para determinar o valor das constantes multiplicativas do conseqüente das regras e uma análise de variância para determinar a melhor combinação das variáveis de entrada do modelo (temperatura ambiente, carga e hora), o que permitiu que se obtivesse um desempenho computacional muito bom. O desempenho deste sistema Sugeno ainda foi comparado com um modelo baseado puramente em redes neurais e com um modelo matemático baseado em função de transferência, todos os três alimentados com dados reais, com o sistema difuso atingindo resultados superiores ou no mínimo iguais aos outros dois modelos.

Em Guirelli et al. (2003), foi implementado um sistema de previsão de carga a curtíssimo prazo (de 15 minutos a 1 hora a frente) com um sistema do tipo Sugeno. Nesse estudo foram obtidos bons resultados, sendo indicado o uso deste modelo para refinamento da previsão obtida com técnicas de redes neurais de estimação de curto prazo.

3.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os termos básicos da teoria de lógica difusa, os quais são necessários para o entendimento do sistema de inferência difuso utilizado neste trabalho. Como os conjuntos difusos são uma peça importante na modelagem do sistema, foi feita uma breve descrição dos tipos de agrupamento difuso de dados e dos métodos mais utilizados para esta finalidade. Foram apresentados os componentes de um sistema de inferência difuso, além de enunciados os dois tipos mais comuns de sistemas e suas diferenças. Foram ainda citadas algumas das aplicações práticas de cada um deles encontradas na literatura, as quais mostram que a natureza das regras de inferência difusas e dos relacionamentos entre conjuntos difusos de diferentes formas provê uma poderosa capacidade de modelar um sistema cuja complexidade faz com que o uso de sistemas especialistas tradicionais, análises matemáticas e estatísticas seja muito difícil.

Capítulo 4

Metodologia Difusa para Estimação do Carregamento de LT

4.1 Considerações Gerais

A estimação da corrente máxima que pode passar por um condutor ou da temperatura máxima que ele pode atingir dada uma certa corrente e condições atmosféricas é de fundamental importância para operar a linha de transmissão de forma otimizada, permitindo ampliar a sua capacidade de transporte, realizar o agendamento de transferências de blocos de energia entre os agentes de um mercado de energia ou realizar transferência de carga entre linhas diferentes nos momentos mais adequados, sem comprometer fisicamente a linha ou a segurança de quem está próximo ou sob ela.

O problema da determinação do limite térmico de um condutor apresenta uma grande complexidade devido ao grande número de parâmetros físicos do cabo e da região atravessada pela linha que devem ser considerados para o cálculo, além do fato que tem como variáveis de entrada parâmetros atmosféricos que possuem um certo grau de incerteza em suas medições. Visando contornar os problemas que estes fatos causam e as limitações dos modelos térmicos tradicionais é que foi proposta aqui a utilização de dados históricos medidos em um sistema real para o desenvolvimento de um modelo baseado na teoria de lógica difusa que represente com mais fidelidade o comportamento térmico de um condutor.

Assim, como outras técnicas de inteligência artificial que se baseiam em dados históricos, foi necessário um processo exaustivo de escolha da combinação dos dados de entrada que representa da

melhor forma a relação corrente-temperatura do condutor, assim como a realização de uma etapa de treinamento do modelo para que as informações do relacionamento entrada-saída contidas nos dados fossem extraídas, possibilitando a criação das regras de inferência que vinculam o comportamento das entradas com a saída.

Com esse modelo, o qual é descrito em Wu e Lu (1999) para previsão de carga, é possível realizar a estimação do limite térmico de uma linha de transmissão em tempo real ou até uma semana a frente, dependendo dos dados de entrada, com uma boa precisão.

4.2 Modelo Proposto

Neste trabalho foi escolhido um sistema de inferência difuso do tipo Sugeno para ser a base do modelo térmico de um condutor de uma linha aérea de transmissão aqui proposto. Nele a variável de saída (no caso a temperatura do condutor) é representada por uma combinação linear das variáveis de entrada. O seu processo de construção está ilustrado de maneira geral no fluxograma da figura 4.1 e cada um dos seus passos será apresentado nas seções a seguir.

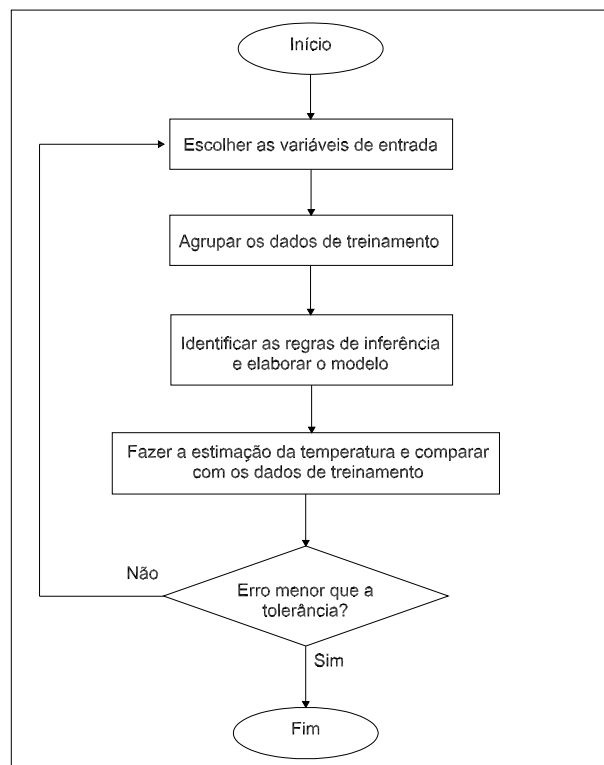


Figura 4.1: Processo de elaboração do sistema de inferência difuso proposto

4.2.1 Escolha das Variáveis de Entrada

De acordo com Chiu (1996), um dos grandes desafios na modelagem de sistemas não lineares é a escolha da melhor combinação das variáveis de entrada dentre todas as possíveis combinações existentes. Para o processo de modelagem, a incorporação somente das variáveis mais importantes permite a obtenção de um modelo mais simples e mais confiável, já que menos variáveis terão que ser medidas.

Como o sistema de inferência difuso aqui utilizado apresenta características similares a sistemas baseados em redes neurais, optou-se pelo uso da mesma técnica de busca da melhor combinação dos parâmetros de entrada do modelo usada nesses casos. Por não existir um método eficaz de realizar essa escolha, normalmente são criados diversos modelos, um para cada possível combinação, até que seja encontrada a ideal. Essa metodologia não é a mais adequada nos casos em que o sistema a ser modelado é muito grande e possui diversos parâmetros que interferem no seu comportamento, sendo estes possíveis candidatos a variáveis de entrada, que é o caso da determinação do limite térmico de um condutor aqui em análise. Um levantamento prévio mostra que os seguintes parâmetros são candidatos a entradas para o sistema de inferência difuso:

- Temperatura ambiente;
- Velocidade do vento;
- Direção do vento;
- Radiação solar;
- Cobertura de nuvens;
- Hora do dia;
- Dia do ano;
- Corrente no condutor;
- Tensão mecânica aplicada sobre o condutor;
- Temperatura do condutor;
- Altura da linha em relação ao solo;

- Dados eletro-mecânicos do condutor (bitola, material, resistência elétrica, etc.);
- Dados da região atravessada pela linha;
- Dados históricos de horas, dias, meses ou anos anteriores aos utilizados no treinamento.

Para limitar o número de candidatos e facilitar a escolha final, algumas considerações podem ser feitas. Por ser o período de estudo muito curto (no máximo uma semana), parâmetros como as propriedades físicas e eletro-mecânicas do cabo, as características da região atravessada pela linha, dentre outros são constantes ou podem ser considerados constantes, reduzindo os candidatos a entradas às variáveis atmosféricas - temperatura ambiente, radiação solar, velocidade e direção do vento, cobertura de nuvens -, tensão mecânica e temperatura do condutor, altura do condutor em relação ao solo e a corrente que o atravessa, juntamente com o dia e a hora em que as medidas foram feitas.

Em Bosignoli e Filho (1999) foram utilizados somente os parâmetros atmosféricos e hora como entradas para um modelo baseado em redes neurais, sendo obtidos resultados muito bons, o que incentivou a mesma abordagem aqui neste trabalho e serviu como ponto de partida para a escolha das variáveis. A temperatura do condutor também foi adicionada como uma entrada, fazendo assim uso de toda informação disponível tanto no espaço das entradas como no da saída para a extração das regras de inferência.

Para verificar se a combinação de variáveis escolhida foi acertada ou não, o modelo baseado nessa combinação é implementado e sua saída é comparada com os valores da saída medidos no sistema real presentes nos dados de treinamento. A diferença entre esses dois valores, o obtido na prática e o obtido pelo modelo, é que determina a qualidade da estimação e conseqüentemente, a qualidade da combinação de variáveis de entrada utilizada. Como limite aceitável para esse erro, foi estabelecido o valor de 10%. Modelos com erros de estimação abaixo desse limite foram considerados aceitáveis.

4.2.2 Agrupamento dos Dados

Como foi dito no Capítulo 3, o agrupamento dos dados históricos é de suma importância para a criação do sistema de inferência difuso. O método de agrupamento subtrativo (*subtractive clustering*) aqui empregado parte do princípio que a massa de dados históricos é formada por diversos pontos em um hiperespaço de M dimensões, onde as coordenadas de cada ponto são dadas pelos valores históricos das N variáveis de entrada e das $M-N$ variáveis de saída. O fluxograma da figura 4.2 ilustra o funcionamento desse algoritmo.

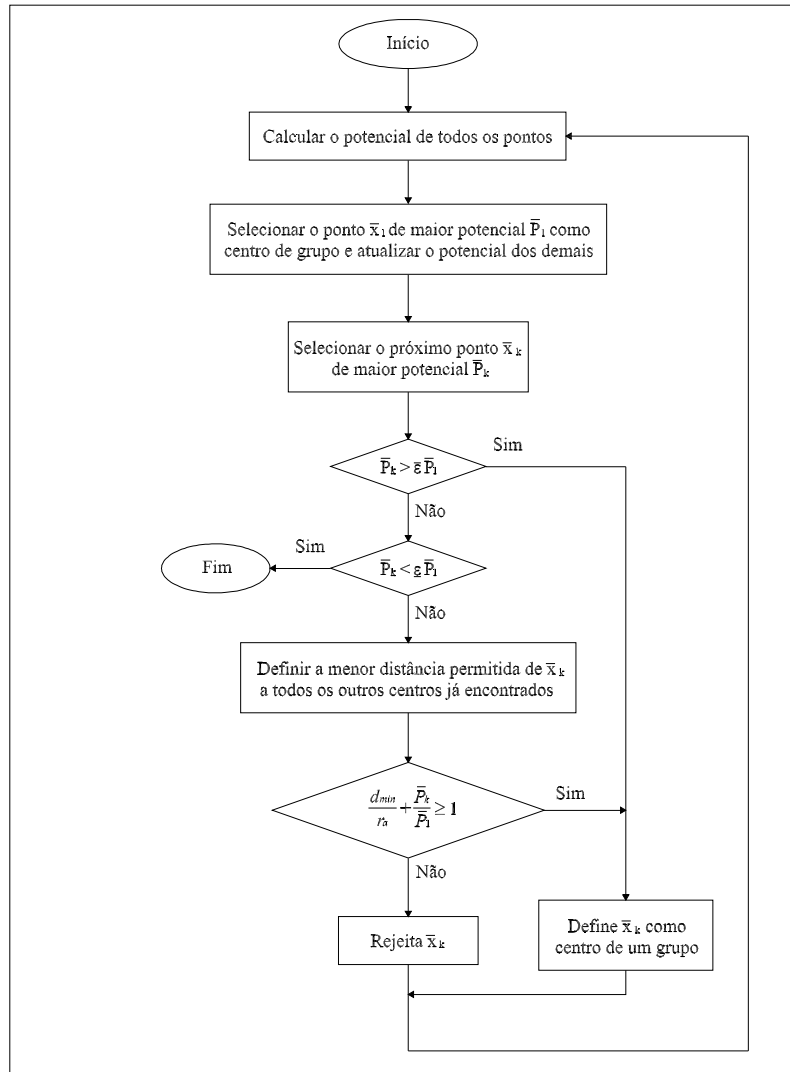


Figura 4.2: Algoritmo de agrupamento subtrativo

Inicialmente cada ponto x_i é considerado como sendo um possível centro de um grupo e tem seu potencial (medida da possibilidade dele ser centro) calculado em relação aos demais (x_j) por meio da equação 4.1:

$$P_i = \sum_{j=1}^n e^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2} \quad (4.1)$$

Onde n é o número de pontos e com:

$$\alpha = \frac{4}{r_a^2} \quad (4.2)$$

O parâmetro r_a é considerado o raio do grupo. Como o potencial de um ponto é função da sua distância a todos os demais pontos, aquele que apresentar o maior número de vizinhos dentro do raio r_a terá o maior potencial e será considerado efetivamente o centro do primeiro grupo, passando a ser denominado de \bar{x}_1 e seu potencial de \bar{P}_1 . Neste momento, o potencial do próximo ponto é subtraído com base na sua distância do primeiro centro por meio da equação 4.3:

$$P_i = P_i - \bar{P}_1 \cdot e^{-\beta \|x_i - \bar{x}_1\|} \quad , \quad (4.3)$$

$$\beta = \frac{4}{r_b^2} \quad . \quad (4.4)$$

O parâmetro r_b é uma constante positiva. Somente os pontos dentro da área definida por este parâmetro é que sofrerão redução no seu potencial com relação ao primeiro centro do grupo. O valor de r_b deve ser igual ou maior que o valor de r_a para se evitar centros de grupos muito próximos. Em Chiu (1996) é recomendada a escolha de $r_b = 1,25 \cdot r_a$.

Após o potencial de todos os pontos ter sido revisado com o uso da equação 4.3, o ponto que possuir o maior potencial é definido como sendo o centro do segundo grupo. Então são atualizados novamente os potenciais dos pontos que se encontram dentro do raio do segundo grupo com a mesma equação 4.3.

Como os dados históricos são obtidos por meio de medições em campo, é possível que eles apresentem ruídos advindos das características dos aparelhos de medição e das condições em que essas medições foram feitas. Para evitar que esses ruídos interfiram na identificação dos grupos, normalmente são definidos dois critérios de avaliação dos potenciais dos possíveis centros: $\bar{\epsilon}$ e $\underline{\epsilon}$. Se $\bar{P}_k > \bar{\epsilon}\bar{P}_1$, o ponto x_k é escolhido como um centro de um novo grupo e o processo de busca por novos centros continua. Se $\bar{P}_k < \underline{\epsilon}\bar{P}_1$, o ponto x_k é rejeitado como centro, significando que todos os centros de grupos já foram encontrados e o processo de agrupamento é finalizado. Se $\underline{\epsilon}\bar{P}_1 < \bar{P}_k < \bar{\epsilon}\bar{P}_1$, então deve ser definida uma distância mínima d_{min} entre os centro dos grupos, a qual dirá que o ponto x_k é um centro de um novo grupo se:

$$\frac{d_{min}}{r_a} + \frac{\bar{P}_k}{\bar{P}_1} \geq 1$$

Na implementação do algoritmo de agrupamento subtrativo feita neste trabalho não foi considerada a presença do ruído nos dados por uma questão de simplicidade, sendo então utilizado apenas o valor de $\underline{\xi}$ igual a 0,15 e desprezando $\bar{\epsilon}$. Com isso, o processo toma a forma mostrada na figura 4.3.

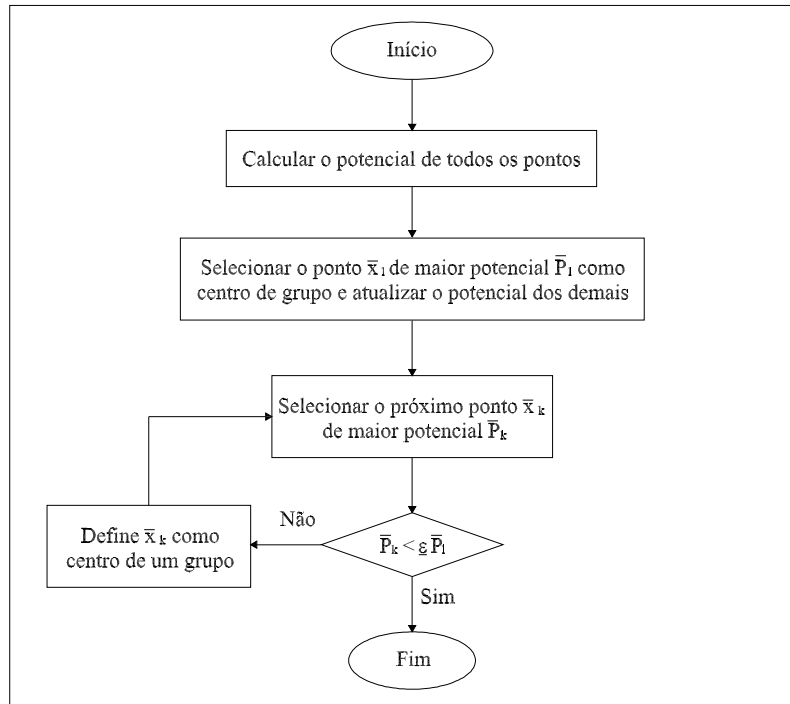


Figura 4.3: Processo de agrupamento subtrativo simplificado

O parâmetro $\underline{\xi}$, juntamente com o raio do grupo, é quem define a quantidade de grupos. Quanto maior o valor de $\underline{\xi}$ e do raio do grupo, menos pontos serão aceitos como centros de grupos e, conseqüentemente, menos grupos serão formados. Isso interferirá diretamente no número de regras de inferência a serem criadas e no grau de generalização do sistema de inferência difuso. Não há um meio analítico de se determinar o valor ideal de $\underline{\xi}$ e de r_a , apenas através de tentativas empíricas. A literatura recomenda a utilização de $\underline{\xi} = 0,15$ (WU; LU, 1999; CHIU, 1994; CHIU, 1996). Já o valor de r_a é totalmente dependente do problema em estudo.

4.2.3 Identificação das Regras e Elaboração do Modelo

De acordo com Chiu (1996), um centro de um grupo é em essência um ponto que representa as características do relacionamento entre entradas e saídas do sistema que se deseja modelar. Então cada centro de grupo pode ser utilizado como base para se determinar cada uma das regras do sistema difuso, sendo assim o número de regras igual ao número de grupos.

As regras de inferência do sistema difuso aqui descrito têm a seguinte forma:

R_1 : Se z_1 é A_{11} e z_2 é A_{21} e ... e z_N é A_{N1} ,

então $y_1 = p_{01} + p_{11} \cdot z_1 + p_{21} \cdot z_2 + \dots + p_{N1} \cdot z_N$

R_2 : Se z_1 é A_{12} e z_2 é A_{22} e ... e z_N é A_{N2} ,

então $y_2 = p_{02} + p_{12} \cdot z_1 + p_{22} \cdot z_2 + \dots + p_{N2} \cdot z_N$

⋮

R_C : Se z_1 é A_{1C} e z_2 é A_{2C} e ... e z_N é A_{NC} ,

então $y_C = p_{0C} + p_{1C} \cdot z_1 + p_{2C} \cdot z_2 + \dots + p_{NC} \cdot z_N$

Onde os termos z_j são as coordenadas de cada ponto da massa de dados históricos a serem usados no treinamento, ou seja, as variáveis de entrada escolhidas para o treinamento, A_{ji} são os grupos formados pelo agrupamento subtrativo e p_{ji} constantes.

Para iniciar a construção das regras de inferência é necessário determinar o grau de pertinência dos pontos aos grupos. Como os grupos teoricamente podem ser representados por diferentes funções de pertinência no espaço de cada variável de entrada, esse cálculo deve ser feito de maneira independente para cada uma delas. Na revisão bibliográfica feita não foram encontrados casos práticos do emprego de diferentes funções para representar um mesmo grupo em diferentes espaços, por isso optou-se aqui pelo uso somente da função gaussiana (ver figura 3.2). Portanto, o grau de pertinência de cada variável de entrada a cada grupo pode ser determinado pela equação 4.5.

$$\mu_{ji} = e^{-\frac{(z_j - \bar{z}_{ji})^2}{2 \cdot \sigma_j^2}} \quad (4.5)$$

Onde:

z_j : variável de entrada j ;

μ_{ji} : grau de pertinência da variável z_j ao grupo i ;

\bar{z}_{ji} : centro do grupo i , o qual representa o valor médio da função de pertinência gaussiana do grupo i no espaço da variável de entrada j ;

σ_j : desvio-padrão da função de pertinência gaussiana i no espaço da variável j .

Em Wu e Lu (1999), é recomendada a definição do desvio-padrão da função gaussiana como sendo:

$$\sigma_j = \frac{r_a}{\sqrt{8}} \cdot (\max(z_j) - \min(z_j)) \quad (4.6)$$

Dado um conjunto de entradas z_1, z_2, \dots, z_N , a saída y correspondente a ele é encontrada por meio da equação 4.7:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^C [\min(\mu_{1i}, \dots, \mu_{Ni}) \cdot (p_{0i} + p_{1i} \cdot z_1 + \dots + p_{Ni} \cdot z_N)]}{\sum_{i=1}^C \min(\mu_{1i}, \dots, \mu_{Ni})} \quad (4.7)$$

Tomando-se:

$$\beta_i = \frac{\min(\mu_{1i}, \dots, \mu_{Ni})}{\sum_{i=1}^C \min(\mu_{1i}, \dots, \mu_{Ni})} \quad (4.8)$$

É obtida a seguinte equação:

$$y = \sum_{i=1}^C [\beta_i \cdot (p_{0i} + p_{1i} \cdot z_1 + \dots + p_{Ni} \cdot z_N)] \quad (4.9)$$

Organizando a equação 4.9, chega-se a:

$$y = \sum_{i=1}^C (p_{0i} \cdot \beta_i + p_{1i} \cdot z_1 \cdot \beta_i + \dots + p_{Ni} \cdot z_N \cdot \beta_i) \quad (4.10)$$

Colocando a equação 4.10 na forma vetorial, tem-se:

$$\sum_{i=1}^C [(\beta_i \cdot \vec{Z}) \cdot \vec{P}_i] = y \quad (4.11)$$

Sendo que o vetor \vec{P}_i tem $(N + 1)$ linhas e y é um valor escalar. Para permitir a multiplicação pelo vetor \vec{P}_i , o vetor \vec{Z} foi definido como $\vec{Z} = [1, z_1, z_2, \dots, z_N]$, possuindo assim $(N + 1)$ colunas.

Na equação acima são conhecidos o vetor \vec{Z} e o valor de y , obtidos de um dos dados de treinamento, além dos valores de β_i que podem ser calculados pela equação 4.8. Portanto as únicas incógnitas são os parâmetros do conseqüente das regras $p_{0i}, p_{1i}, \dots, p_{Ni}$, com $i = 1, \dots, C$, representados pelo vetor \vec{P}_i . Com um conjunto de m dados de treinamento redundantes é possível montar a partir da equação 4.11 um sistema da forma:

$$[\beta \cdot \mathbf{Z}] \cdot \vec{P} = \vec{Y} \quad (4.12)$$

Onde $[\beta \cdot \mathbf{Z}]$ é uma matriz de m linhas e $C \cdot (N + 1)$ colunas, \vec{P} é um vetor de $C \cdot (N + 1)$ linhas e uma coluna e \vec{Y} é um vetor de m linhas e uma coluna.

Existem diversas formas para se resolver o sistema acima e encontrar o vetor \vec{P} . Na implementação feita neste trabalho, foi feita uma regressão linear múltipla utilizando o método dos mínimos quadrados para executar essa tarefa.

4.2.4 Levantamento do Raio dos Grupos

Após a etapa de criação e treinamento do sistema de inferência difuso, foram feitos testes com ele para a determinação do raio dos grupos mais adequado a ser empregado nas estimações. Como parâmetros para se fazer essa escolha, foram utilizados o erro máximo positivo (diferença obtida quando o valor estimado é maior que o medido), o erro máximo negativo (diferença obtida quando o valor estimado é menor que o medido), a média e o desvio padrão dos erros de cada simulação.

Estes parâmetros foram combinados em pares por meio de uma metodologia de múltiplos critérios bem simples. Primeiramente os valores obtidos para os quatro foram normalizados de forma que o melhor valor obtido para cada um deles nas simulações fosse igual a zero. Desta forma, quanto mais próximo de zero estiver o valor encontrado, mais adequado é o raio dos grupos utilizado. Para facilitar a escolha, esses quatro valores foram combinados dois a dois, gerando apenas dois parâmetros. O primeiro deles foi formado pela soma da média e do desvio padrão dos erros e o segundo foi constituído pela soma do erro máximo positivo com o erro máximo negativo. A escolha foi feita com base no gráfico de cada um desses parâmetros em função do raio, o qual foi gerado através do teste do sistema para diversos valores de raio de grupos.

4.3 Conclusão

Como o problema da determinação do limite térmico de um condutor de uma linha de transmissão aérea é algo complexo por possuir diversos fatores intervenientes, criar um modelo baseado em dados históricos medidos em campo é uma alternativa para minimizar os erros de modelagem e conseguir extrair de maneira mais eficaz a relação entre as entradas e a saída do sistema real. Por isso uma metodologia de elaboração de um sistema de inferência difuso do tipo Sugeno criado a partir de dados históricos foi descrita neste capítulo.

Foram tecidos comentários sobre a forma como foram escolhidas as variáveis de entrada para o modelo, além de ter sido descrita em detalhes o processo de treinamento, ou seja, identificação das regras de inferência.

No sistema apresentado, a variável de saída é representada por uma combinação linear das variáveis de entrada e por isso foi necessário o emprego de um método de regressão linear múltipla - no caso o método dos mínimos quadrados - para determinar os parâmetros do consequente das regras, finalizando assim a identificação das regras e elaboração do modelo térmico proposto.

Capítulo 5

Apresentação dos Resultados da Aplicação da Metodologia

5.1 Considerações Gerais

Devido à complexidade do problema de determinação da temperatura de operação de um condutor aéreo em um alinha de transmissão, diversas simulações foram necessárias para se verificar o comportamento do sistema desenvolvido. Após ele ter sido elaborado conforme a metodologia descrita no capítulo 4, foi necessário testá-lo para encontrar o melhor valor para os seus parâmetros de ajuste. Então de posse desses valores, foi feita a validação dos resultados comparando-os com os dados de temperatura do condutor medidos em campo.

5.2 Dados de Entrada

Os dados de entrada usados neste trabalho foram obtidos com ajuda do CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Eles consistem em dados de temperatura ambiente, velocidade e direção do vento e radiação solar medidos em uma estação meteorológica instalada próximo à linha, de temperatura do condutor registrados com o auxílio de sensores instalados diretamente sobre o cabo e de corrente registrados pelos transformadores de corrente instalados nas extremidades da linha, todos eles medidos em intervalos de uma hora. A medida de temperatura deve ser feita sempre no vão mais próximo de onde está instalada a estação meteorológica para se manter a correlação entre as valores medidos.

A massa de dados históricos foi dividida em uma parte composta por 600 medições horárias consecutivas de cada variável (equivalentes a 25 dias), a qual foi utilizada para extração de conhecimento e treinamento do sistema de inferência difuso. A outra parte, composta por 144 medições horárias consecutivas de cada variável (equivalente a 6 dias), foi empregada para testar o desempenho do sistema e realizar a estimação da temperatura.

A seguir serão descritas as variáveis de entrada utilizadas, feitos alguns comentários sobre suas características e sobre o comportamento observado nos dados medidos.

5.2.1 Radiação Solar

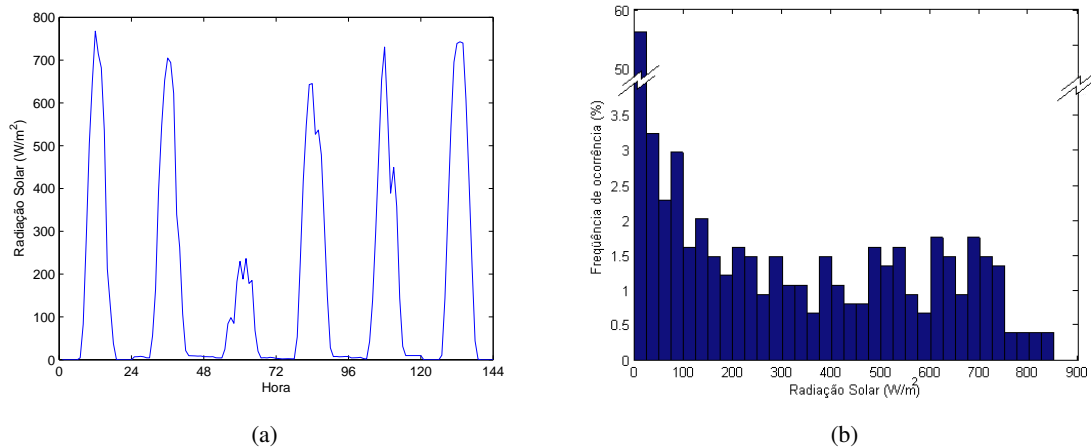


Figura 5.1: Amostra da série de dados medidos de radiação solar (a) e distribuição dos valores da série completa (b)

A radiação solar apresenta um comportamento cíclico e bem definido, atingindo seu máximo no meio do dia e o valor zero durante toda a noite. Basicamente dois fatores afetam o seu comportamento: um de curto prazo com a variação do nível de cobertura do céu por nuvens e outro de longo prazo com a mudança de estações do ano.

Como pode ser observado no gráfico 5.1(b) de distribuição percentual da radiação solar, as maiores ocorrências são de valores bem mais baixos que o valor máximo. Como a maior parte dos fenômenos atmosféricos se deve aos efeitos do aquecimento que o Sol promove na superfície da Terra, as demais variáveis apresentam comportamentos ligeiramente parecidos com o da radiação solar. Isso indica que a linha de transmissão opera na maior parte do tempo em condições bem menos restritivas que as especificadas em projeto com valores determinísticos.

O valor recomendado na norma NBR 5422/85, que é de 1000W/m^2 para radiação solar total (direta mais a refletida pelo solo) não foi atingido em nenhum momento durante as medições, como pode ser visto na figura 5.1(b), sendo que durante 65% do tempo a radiação solar medida ficou abaixo de 10% dele.

5.2.2 Temperatura Ambiente

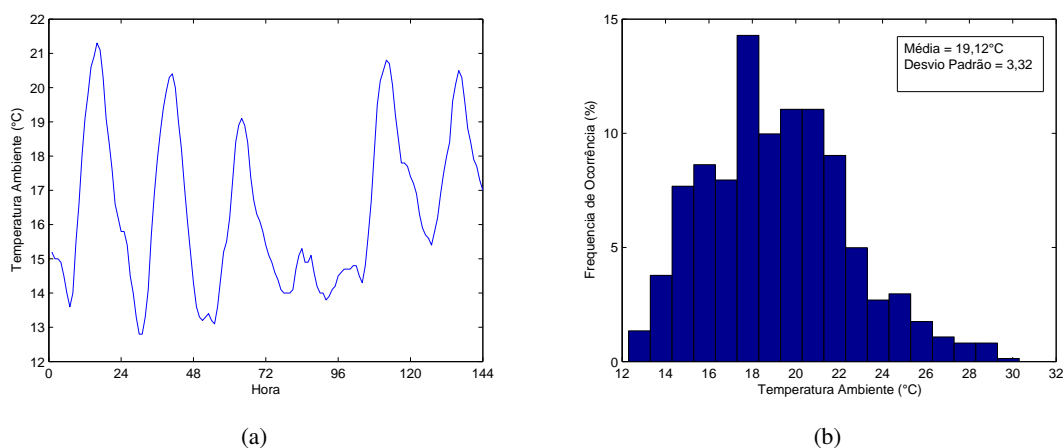


Figura 5.2: Amostra da série de dados medidos de temperatura ambiente (a) e distribuição dos valores da série completa (b)

Como a temperatura ambiente de uma determinada área é determinada pelo relacionamento entre o aquecimento provocado pelo Sol na superfície terrestre (ou seja, pela radiação solar) e o meio ambiente dessa área, o seu comportamento segue basicamente o mesmo padrão da radiação solar, com o valor máximo sendo atingido próximo ao meio do dia e o mínimo próximo ao meio da noite.

Na norma NBR 5422/85 recomenda-se o uso da temperatura do conjunto crítico de valores simultâneos ou caso não se tenham dados, que seja utilizada a temperatura ambiente máxima medida (juntamente com a radiação solar máxima) para o cálculo do limite de temperatura do condutor. No caso da série histórica aqui utilizada, o valor máximo da temperatura ambiente registrado está na casa dos 30°C. Contudo o valor médio da temperatura no período de medição foi de aproximadamente 20°C, com valores abaixo deste ocorrendo em 61% do tempo.

5.2.3 Velocidade e Direção do Vento

A velocidade e a direção do vento são duas variáveis que apresentam um comportamento pouco definido ao longo do tempo. A velocidade tende a ser maior durante o dia, por causa do aumento

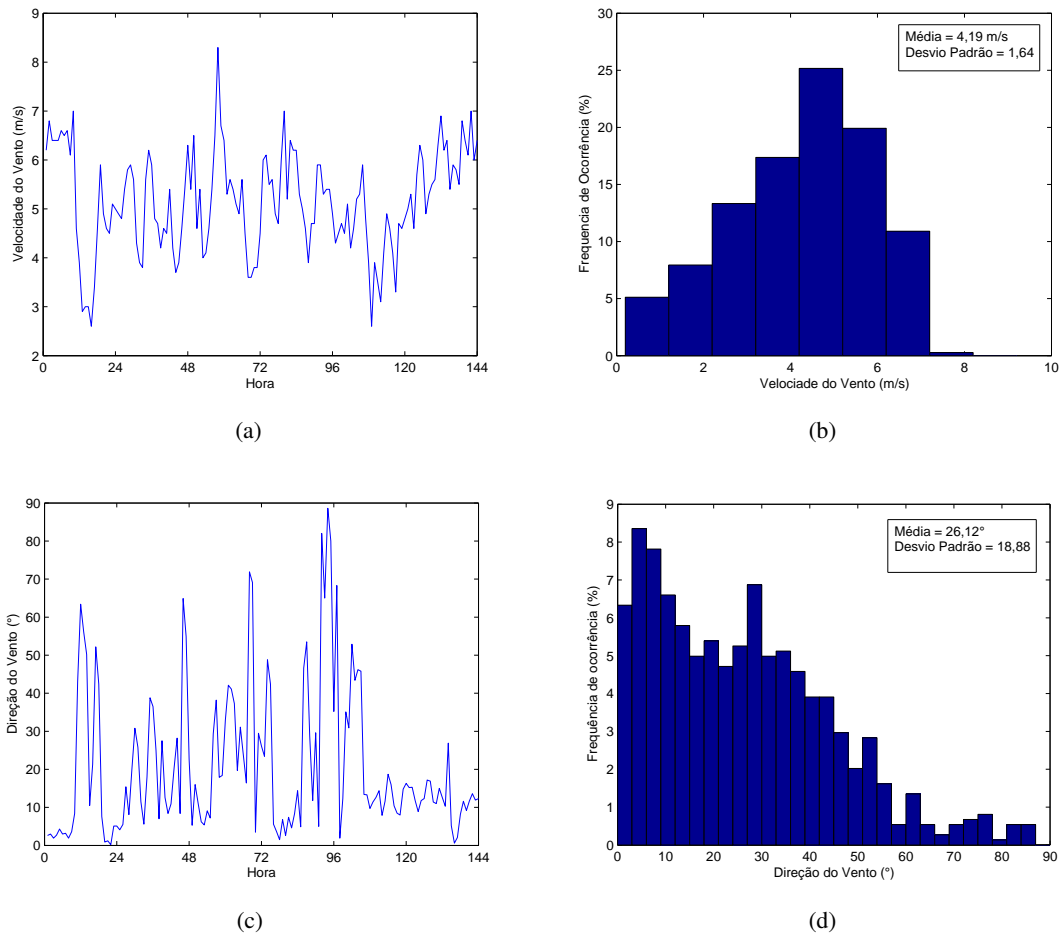


Figura 5.3: Amostra da série de dados medidos de velocidade (a) e direção do vento (c) e distribuição dos valores da série completa de cada uma delas ((b) e (d))

da radiação solar e do aquecimento da superfície do planeta. O relevo também influencia bastante sobre essa variável, a qual tende a aumentar em regiões mais altas e/ou planas. Já a direção do vento é fortemente dependente das características físicas da região onde foram feitas as medições. Em regiões costeiras, a direção do vento é mais bem definida, indo do mar para o continente durante o dia e no sentido contrário durante a noite. Em regiões acidentadas, o vento tende a seguir a direção do relevo.

É recomendado o uso da velocidade do vento igual a 1m/s pela NBR 5422/85. Como não é dito nada sobre a direção, normalmente os cálculos são feitos subentendendo-se que o vento flui perpendicularmente ao cabo. De acordo com o gráfico 5.3(b), quase 96% do tempo o vento soprou com uma velocidade acima desse valor. Já no gráfico 5.3(d), vê-se que dificilmente o vento flui perpendicularmente ao cabo. Esse é um fato importante, pois a capacidade de resfriamento do cabo pelo vento é reduzida conforme diminui o ângulo de incidência (ver equação A.45).

5.2.4 Corrente

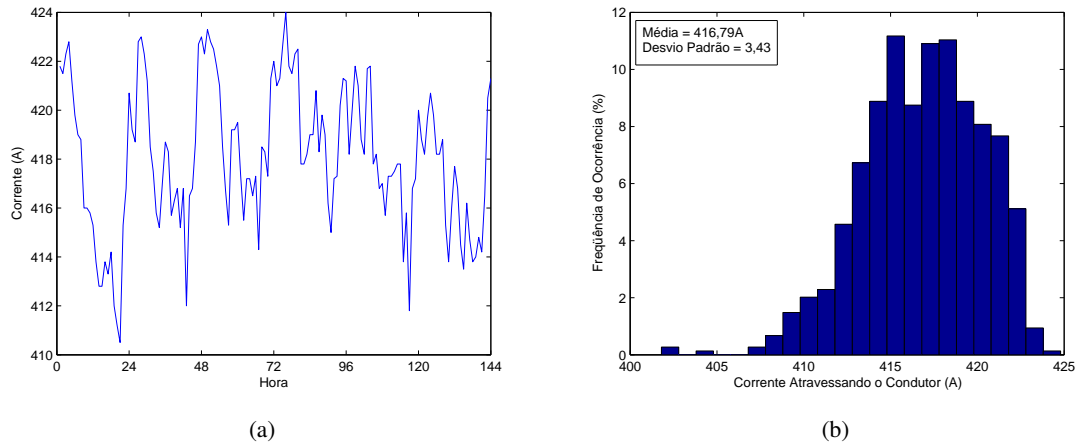


Figura 5.4: Amostra da série de dados medidos de corrente (a) e distribuição dos valores da série completa (b)

Os dados medidos de corrente correspondem à amplitude da corrente eficaz que atravessa o condutor no instante de medição. Estes valores são medidos a partir dos transformadores de corrente instalados nas subestações localizadas nos extremos da linha de transmissão. A estimação dos seus valores futuros pode ser feita por meio da análise da curva de carga do sistema. Essa curva de carga é dependente de diversos fatores, desde climáticos (temperatura ambiente, precipitação, etc.) até sociais (datas em que ocorrem eventos importantes), além da entrada em funcionamento de grandes cargas ao longo do dia.

A corrente também pode ser considerada a variável de saída do sistema difuso, desde que a temperatura do condutor seja fornecida como entrada, juntamente com os dados atmosféricos.

Os valores aqui utilizados foram medidos em uma linha de transmissão experimental equipada com condutor CAAA Linnet 26/7, com carregamento mantido aproximadamente constante em torno de 420A.

5.2.5 Temperatura do Condutor

A temperatura do condutor tem seu comportamento dado por uma combinação do comportamento da temperatura ambiente, da radiação solar e da corrente atravessando o cabo. O seu valor máximo ocorre próximo do anoitecer, quando a corrente está aumentando (próximo do pico de carga, que ocorre normalmente no período das 18hs às 21hs) e a temperatura ambiente ainda está em um nível

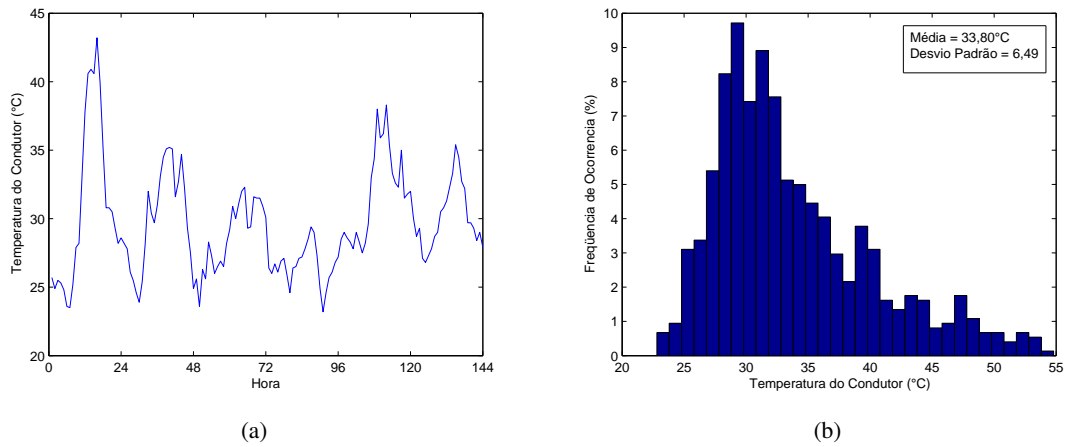


Figura 5.5: Amostra da série de dados medidos de temperatura do condutor (a) e distribuição dos valores da série completa (b)

considerável.

Pelo gráfico 5.5(b) é possível notar que a maioria dos valores de temperatura do condutor medidos se localizaram abaixo de 34°C , que é o valor médio da série histórica. Observa-se então que a linha de transmissão opera normalmente distante do seu limite térmico. Neste período de medição, o valor máximo medido foi de aproximadamente 55°C , sendo que 86% das medições ficaram abaixo de três quartos desse valor.

5.3 Aplicação da Metodologia Difusa

Para verificar o comportamento e o desempenho da modelagem difusa aplicada ao problema de ampliação do carregamento de linhas de transmissão aéreas foram feitas diversas simulações, que geraram diversos modelos. Grande parte deles não atingiu o desempenho mínimo desejado, que foi de média de erros máxima de 10% na estimação até uma semana a frente do valor da temperatura do condutor.

Nesta seção, serão apresentados os resultados de três desses modelos que obtiveram um desempenho melhor que o limite estipulado.

O primeiro deles (modelo I) utiliza as seguintes variáveis de entrada:

- Temperatura ambiente no instante t ;

- Radiação solar no instante t ;
- Velocidade do vento no instante t ;
- Direção do vento no instante t ;
- Corrente atravessando o condutor no instante t ;
- Hora no instante t ;
- Temperatura ambiente no instante $(t - 1)$;
- Radiação solar no instante $(t - 1)$.

A principal característica desse sistema é a de não usar a temperatura do condutor como uma variável de entrada, ou seja, sem realimentação. A temperatura do condutor também não foi utilizada no processo de agrupamento dos dados, o que gerou grupos com base apenas em informações extraídas do espaço das variáveis de entrada.

O segundo modelo aqui descrito (modelo II) faz uso das seguintes variáveis de entrada:

- Temperatura ambiente no instante t ;
- Radiação solar no instante t ;
- Velocidade do vento no instante t ;
- Direção do vento no instante t ;
- Corrente atravessando o condutor no instante t ;
- Hora no instante t .

Neste caso, o agrupamento foi feito com o emprego da temperatura do condutor para criar os grupos com base nas informações disponíveis tanto no espaço das variáveis de entrada quanto no espaço da variável de saída. Este modelo tem como característica não servir-se de dados medidos ou calculados em instantes anteriores ao qual se está fazendo o cálculo atual.

Já o terceiro modelo apresentado aqui (modelo III), tem como entradas os seguintes parâmetros:

- Temperatura ambiente no instante t ;

- Radiação solar no instante t ;
- Velocidade do vento no instante t ;
- Direção do vento no instante t ;
- Corrente atravessando o condutor no instante t ;
- Hora no instante t ;
- Temperatura do condutor no instante $(t - 1)$;
- Radiação solar no instante $(t - 1)$.

Este modelo faz uso de toda a informação disponível (entradas mais saída) para realizar o agrupamento dos dados, além de ser realimentado com o valor medido na hora anterior da radiação solar e com o valor calculado também na hora anterior da temperatura do condutor.

Além de serem apresentados os resultados obtidos com os modelos acima, serão mostrados os resultados do processo de levantamento do raio mais adequado para os grupos e alguns exemplos dos grupos difusos criados pelo algoritmo de agrupamento subtrativo.

5.3.1 Levantamento do Raio dos Grupos

Com o sistema de inferência difuso já criado e treinado, foram feitos testes para se determinar o raio dos grupos mais adequado a ser empregado nas estimações. Como foi explicado no item 4.2.4, dois gráficos foram gerados para cada modelo criado: um do parâmetro formado pela soma da média e dos desvio padrão dos erros pelo raio e outro formado pela soma do erro máximo positivo com o erro máximo negativo pelo raio. O valor do raio escolhido é aquele que minimiza os dois parâmetros de escolha. Em todos os três casos, o raio dos grupos foi variado de 0,95 a 0,15 com passos de -0,0283, resultando em 29 simulações para cada modelo.

O gráfico da figura 5.6 mostra o número de grupos gerados e a média dos erros quando se varia o raio dos grupos. É possível ver que quanto menor o raio, mais grupos são formados, aumentando a complexidade do sistema. É possível notar também que a média dos erros reduz conforme aumentam o número de grupos, o que mostra que as novas regras criadas permitem ao sistema representar melhor a relação entradas-saída. Mas em um determinado momento o grupo começa a ficar tão pequeno que a regra formada a partir dele passa a representar não a relação geral entre entradas e saída, mas

somente o comportamento dos pontos utilizados no treinamento. Esse fenômeno constitui o processo de sobre-treinamento do modelo.

Apesar do gráfico da figura 5.6 ter sido gerado a partir das simulações com o modelo III, o mesmo comportamento foi observado nas simulações feitas com todos os outros modelos criados ao longo do estudo.

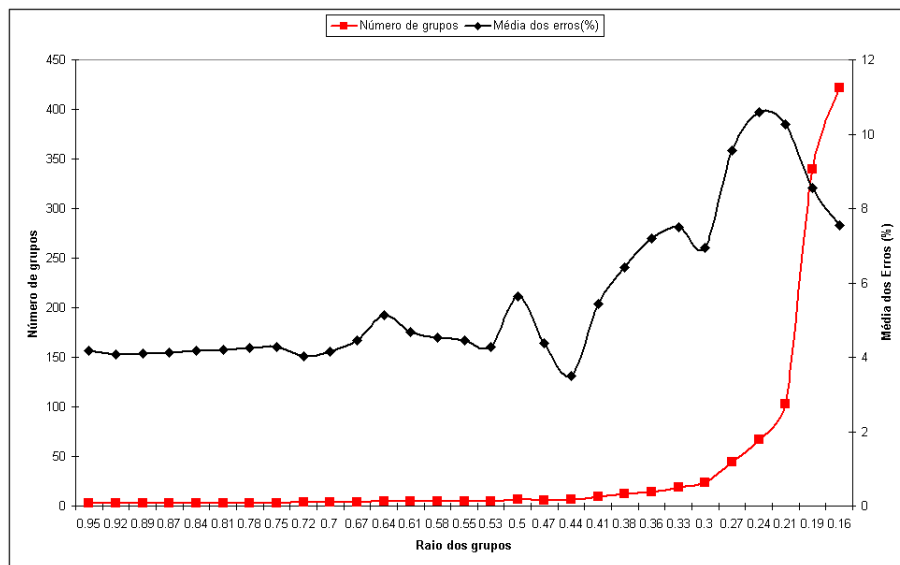


Figura 5.6: Variação do número de grupos e média dos erros de estimação com o raio de cada grupo

Os gráficos mostrados nas figuras 5.7(a) e 5.7(b) foram obtidos para o modelo I. Com base na observação destes gráficos, vê-se que o valor que minimiza as duas curvas, ou seja, aquele mais adequado para o raio dos grupos é de 0,7236. É neste valor que a média e o desvio padrão dos erros da estimação, a maior diferença positiva e a maior negativa atingem conjuntamente o menor valor.

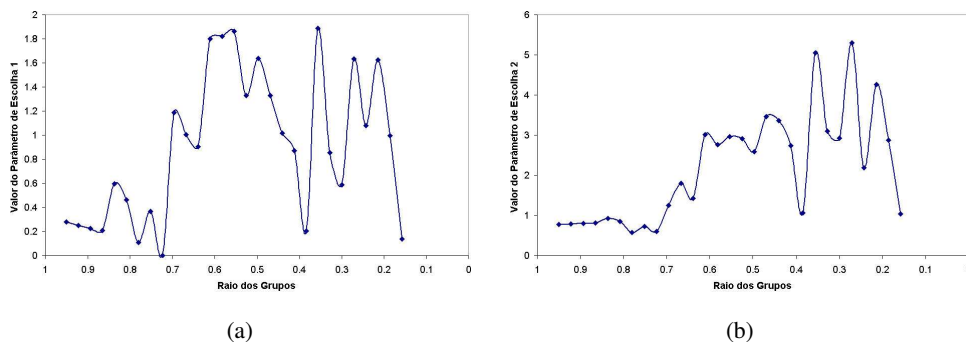


Figura 5.7: Gráficos dos parâmetros de escolha do raio dos grupos para o modelo I: (a) Combinação da média e desvio padrão dos erros e (b) Combinação dos erros máximos positivo e negativo

A figura 5.8 mostra os gráficos dos parâmetros de escolha obtidos para as simulações com o modelo II. Infere-se destes gráficos que o valor adequado para o raio dos grupos é de 0,4972. Um detalhe a ser notado no gráfico 5.8(a) é que a média e o desvio padrão dos erros atingem seus valores mínimos para o raio variando entre 0,8 e 0,75 aproximadamente. A estimação feita com valores de raio neste intervalo também resultam em baixos valores de erro, dentro do limite aceitável. Isso mostra que o raio encontrado aqui não é um valor ótimo e único, mas sim dependente dos dados de entrada e da metodologia de escolha dele. Outros valores também podem levar a resultados muito bons durante a estimação.

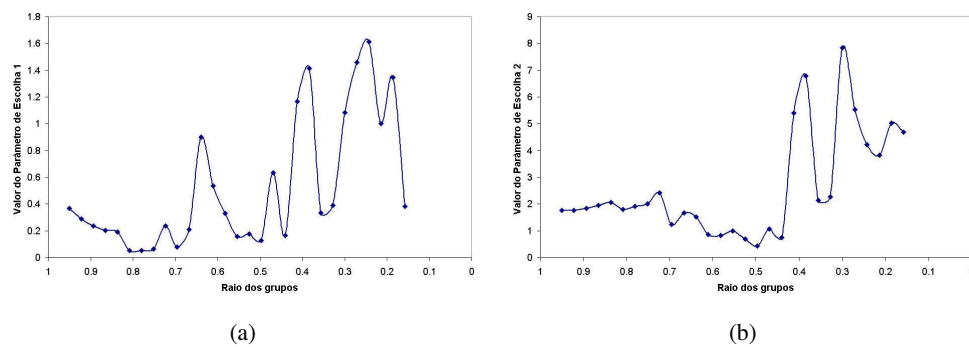


Figura 5.8: Gráficos dos parâmetros de escolha do raio dos grupos par ao modelo II: (a) Combinação da média e desvio padrão dos erros e (b) Combinação dos erros máximos positivo e negativo

As simulações feitas com o modelo III resultaram nos gráficos mostrados na figura 5.9. Pela análise deles, verifica-se que o valor mais adequado para o raio dos grupos é de 0,4406. É possível notar que para o raio igual a 0,6953 também são obtidos valores baixos dos dois parâmetros de escolha. Ambos podem ser considerados como "valores adequados", sem afetar o desempenho do sistema de inferência difuso.

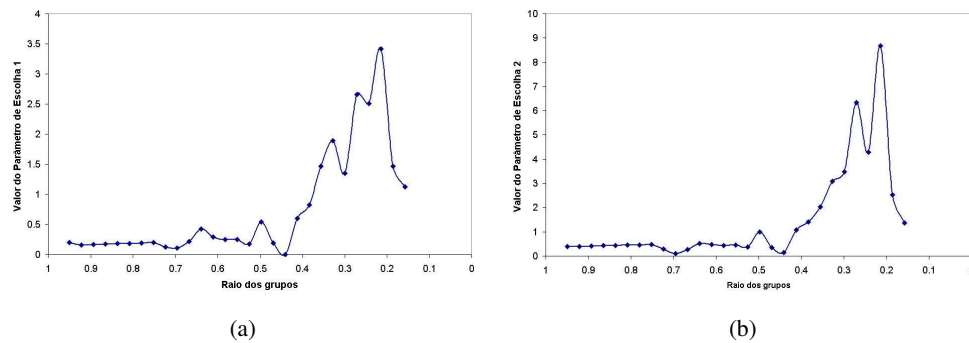


Figura 5.9: Gráficos dos parâmetros de escolha do raio dos grupos par ao modelo III: (a) Combinação da média e desvio padrão dos erros e (b) Combinação dos erros máximos positivo e negativo

5.3.2 Exemplo de Regras e Grupos Formados

Utilizando-se o raio igual a 0,4406 determinado acima para o modelo III, o algoritmo de agrupamento difuso chegou a 7 grupos, cada um possuindo 9 dimensões por serem 9 variáveis de entrada — radiação solar, temperatura ambiente, hora, corrente, velocidade e direção do vento, todas medidas no instante (t) e temperatura do condutor e radiação solar medidas no instante ($t - 1$) — além da temperatura do condutor no instante (t) também usada no agrupamento durante a etapa de treinamento. Na figura 5.10 são mostradas as representações dos grupos para algumas das variáveis a título de ilustração.

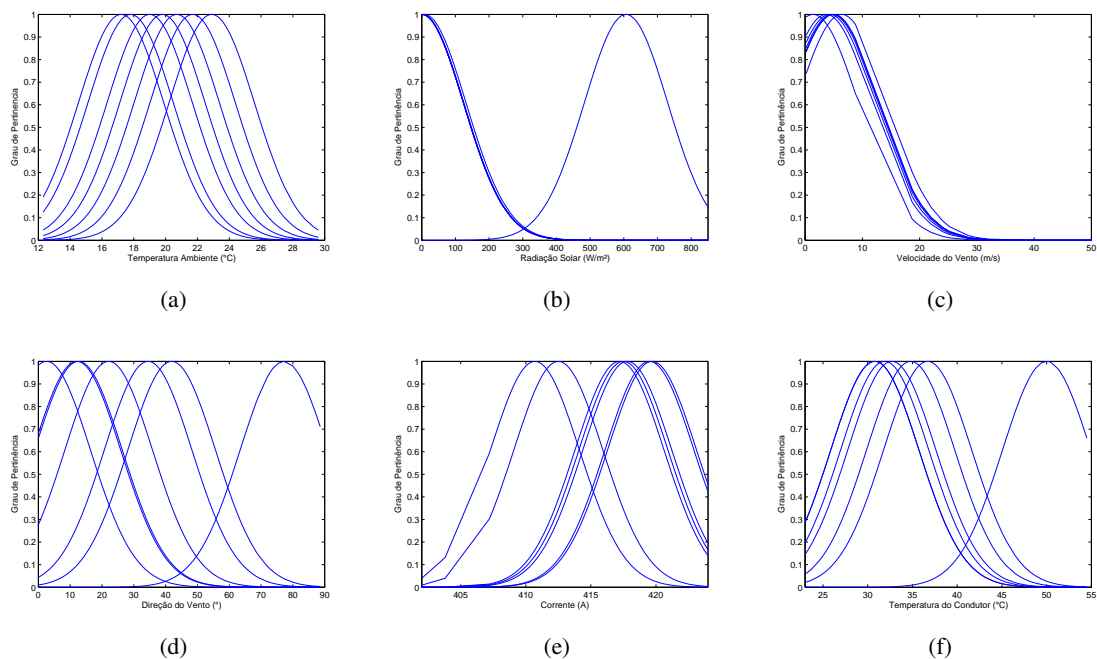


Figura 5.10: Exemplos de grupos formados pelo algoritmo de agrupamento difuso.

Após uma simulação seguindo o que foi definido para a criação dos grupos acima, foram geradas sete regras (uma para cada um dos grupos formados). Um exemplo do parâmetro consequente de uma das regras formadas nesta simulação é mostrado a seguir:

$$Temp_cond = 0,0224 + 0,3275 \cdot Temp_amb - 0,7206 \cdot Vv - 0,0409 \cdot Dv + 0,0103 \cdot Rad_solar - 0,0385 \cdot Hora + 0,0179 \cdot Corrente + 0,7082 \cdot Temp_cond_ant - 0,0117 \cdot Rad_solar_ant$$

Onde:

$Temp_{cond}$:	temperatura do condutor no instante t ;
$Temp_{amb}$:	temperatura ambiente no instante t ;
V_v :	velocidade do vento no instante t ;
D_v :	direção do vento no instante t ;
Rad_{solar} :	radiação solar no instante t ;
$Hora$:	hora no instante t ;
$Corrente$:	amplitude da corrente atravessando o condutor no instante t ;
$Temp_{cond_{ant}}$:	temperatura do condutor no instante $t - 1$;
$Rad_{solar_{ant}}$:	radiação solar no instante $t - 1$.

5.4 Resultados da Estimação

Uma vez determinado o valor mais conveniente para o raio dos grupos, foi feita a estimação propriamente dita da temperatura do condutor em um período de seis dias. Os dados de entrada utilizados nos cálculos e os dados de temperatura do condutor empregados para se fazer a validação do modelo foram os mesmos usados na determinação do raio dos grupos. Estes dados apresentam uma característica interessante para o teste dos modelos: a presença de um dia atípico no seu interior, onde os parâmetros atmosféricos apresentaram um comportamento ligeiramente diferente do restante.

5.4.1 Aplicação do Modelo I

Usando o modelo I com o raio dos grupos igual a 0,7236 foram obtidos quatro grupos e, conseqüentemente, quatro regras de inferência. A média dos erros encontrados para esta estimação foi de 9,89%, ficando muito próximo do limite máximo pré-determinado de 10%. Os valores de temperatura do condutor estimados estão mostrados no gráfico da figura 5.11 juntamente com os valores medidos na linha real.

Pode-se verificar que os valores calculados pelo sistema de inferência difuso apresentaram variações muito bruscas nos horários onde a temperatura do condutor atinge seus extremos, tanto superiores quanto inferiores, o que resultou em um erro máximo positivo de aproximadamente 48% e um erro máximo negativo de 45%.

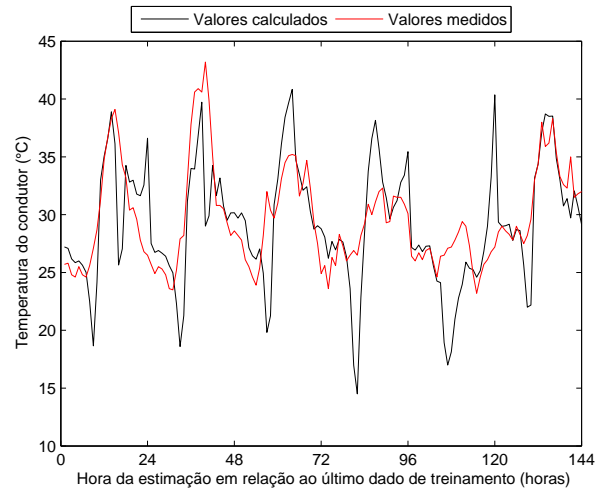


Figura 5.11: Temperatura do condutor estimada pelo modelo I e valores medidos na linha real

No gráfico de distribuição dos erros (figura 5.12), é possível ver que muitos valores (30% do total) ficaram acima de 10%, o que mostra que, apesar de ter a média dos erros abaixo do limite, o desempenho geral do sistema não foi bom o bastante para que pudesse realizar uma estimativa confiável.

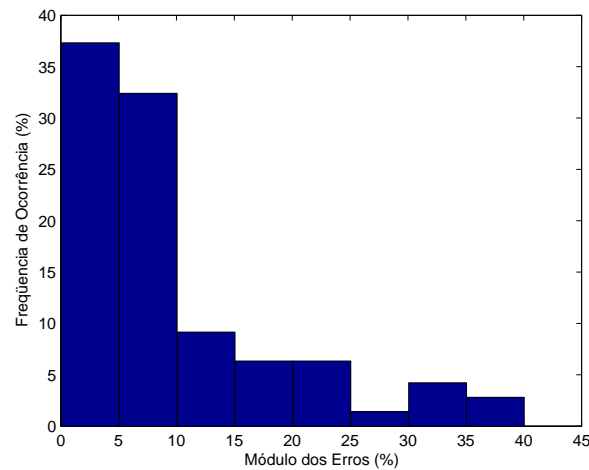


Figura 5.12: Distribuição dos erros obtidos na estimação com o modelo I

5.4.2 Aplicação do Modelo II

Para a combinação de entradas do modelo II e valor do raio igual a 0,4972, o algoritmo de agrupamento encontrou sete grupos. Os erros de estimação obtidos tiveram um valor médio de 10,24%, com um erro positivo máximo de quase 13% e um erro máximo negativo de 45%. Na figura 5.13 estão os gráficos da saída estimada pelo modelo e do valor medido.

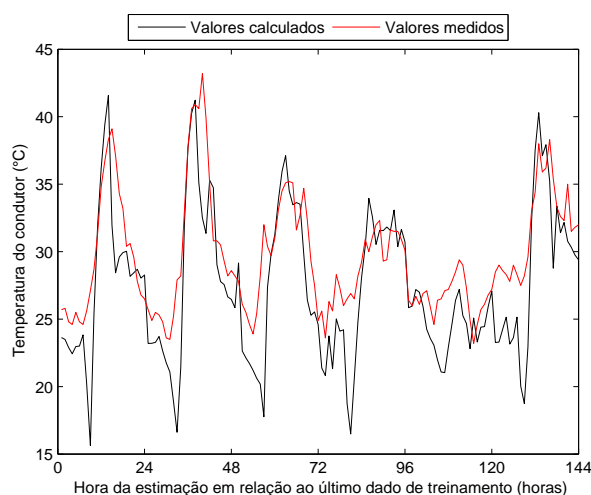


Figura 5.13: Temperatura do condutor estimada pelo modelo II e valores medidos na linha real

É possível ver que os valores estimados pelo modelo tenderam a acompanhar o comportamento real da temperatura do condutor no período diurno, mas no período noturno a temperatura ficou bem abaixo do valor real medido. Foram principalmente estes que fizeram uma parte significativa da distribuição dos erros, vista na figura 5.14, ficar acima do limite de 10%.

Quando esses resultados são comparados com os obtidos com o modelo I, verifica-se que os resultados finais obtidos foram piores, apesar do aumento do número de regras de inferência descrevendo a relação entradas-saída, indicando que quando a escolha das variáveis de entrada não é a ideal, mais regras são criadas para tentar reproduzir o comportamento dos dados de treinamento.

Esse fato também mostra que o sistema mais eficiente não é necessariamente aquele que possui mais regras e sim aquele que possui a combinação mais adequada de variáveis de entrada, ou seja, as variáveis que tem a maior correlação com a variável de saída.

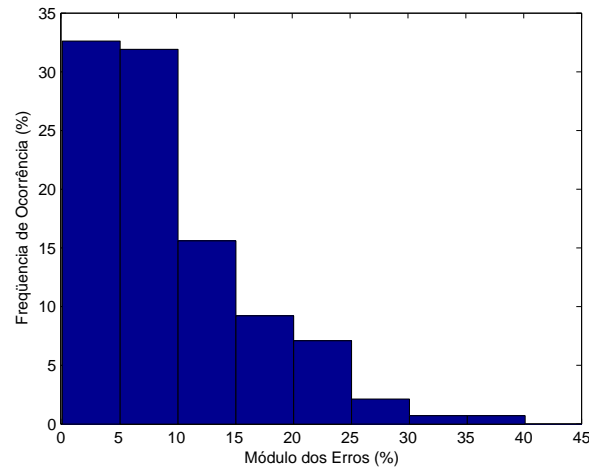


Figura 5.14: Distribuição dos erros obtidos na estimação com o modelo II

5.4.3 Aplicação do Modelo III

O modelo III é o mais completo de todos os três quando se fala das informações utilizadas em seu treinamento. Nele são empregados dados tanto dos parâmetros atmosféricos no instante (t) quanto dados obtidos no instante anterior, além da consideração da temperatura do condutor nos instantes (t) e ($t - 1$) no agrupamento. Isso proporcionou a ele um desempenho muito melhor que o apresentado pelos modelos I e II, como pode ser visto na figura 5.15, inclusive no quinto dia da série, onde os parâmetros atmosféricos se comportaram de maneira bem diferente dos demais dias.

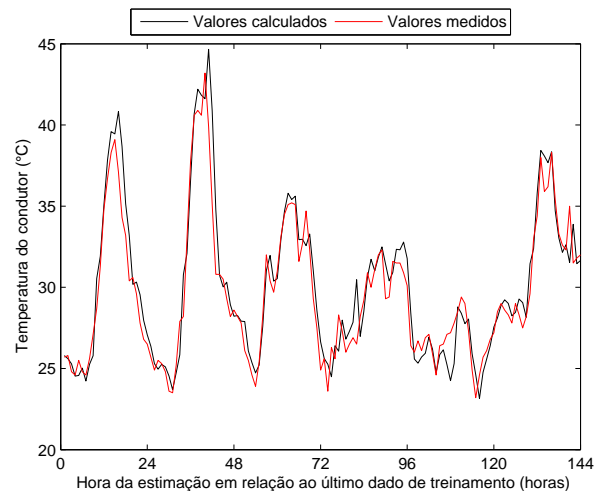


Figura 5.15: Temperatura do condutor estimada pelo modelo III e valores medidos na linha real

Com o raio dos grupos igual a 0,4406, foram obtidos sete grupos/regras. Apesar de ser a mesma quantidade utilizada no modelo II, o seu desempenho foi muito superior, com uma média dos erros igual a 3,49% e um desvio padrão de 3,14. Como pode ser visto na figura 5.16, quase 60% dos erros ficaram abaixo da média. O erro máximo positivo obtido foi de aproximadamente 16% e o erro máximo negativo foi de 11%.

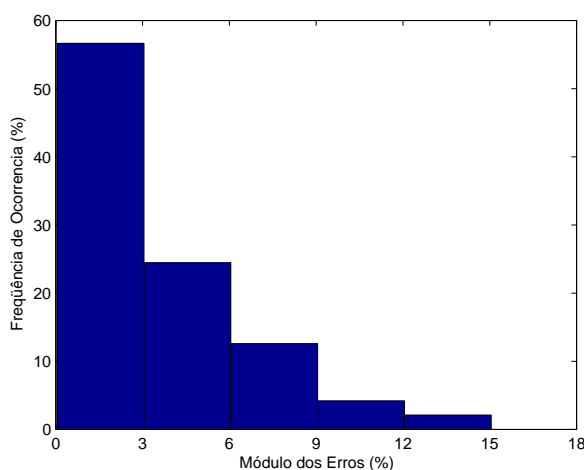


Figura 5.16: Distribuição dos erros obtidos na estimação com o modelo III

Esses fatos comprovam que o número de regras não pode ser utilizado como parâmetro de desempenho do sistema, pois dois modelos (II e III), que possuem sete regras, apresentaram resultados bem diferentes. Também é possível verificar que o emprego de valores medidos ou calculados em instantes anteriores, além da temperatura do condutor, no treinamento do modelo é necessário não para que a maior quantidade de informações possa ser extraída da massa de dados históricos, mas sim para que as informações corretas possam ser extraídas.

5.5 Tempos de Simulação

O desempenho computacional dos três modelos foi muito bom. Eles foram implementados no ambiente científico de programação MATLAB versão 7.0 - R14, rodando sobre plataforma Windows. Para cada um dos modelos, a etapa de treinamento, incluindo o levantamento do valor ideal do raio dos grupos, necessitou de aproximadamente 9 minutos para ser executada em um computador com processador AMD Sempron 2400+ de 1,6GHz e sistema operacional Windows 2000. É importante dizer que o tempo de treinamento depende do tamanho da série histórica de dados empregados neste

processo.

Uma vez treinado o sistema, o processo de estimação é bastante rápido. Os tempos necessários para cada uma das estimações feitas com os três modelos, foram marcados em um computador equipado com um processador Intel Celeron de 700MHz e sistema operacional Windows XP. Cada estimação levou em torno de 20 segundos para ser executada, comprovando o desempenho computacional da metodologia.

5.6 Conclusão

Neste capítulo a metodologia proposta foi testada e validada com dados reais medidos em uma linha de transmissão. Foram feitos comentários sobre as características das séries de dados históricos empregados no treino e no teste dos três modelos descritos, juntamente com os resultados dos testes para o levantamento do raio mais adequado para os grupos difusos. Por fim, foram mostrados os resultados obtidos para as simulações de cada um dos modelos.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Considerações Gerais

Assim como no mundo todo, o setor elétrico no Brasil está passando por mudanças. Com a demanda em pleno crescimento, a mudança de paradigma com a comercialização de energia elétrica em mercados e as limitações econômicas, ambientais e sociais para a construção de novos empreendimentos de geração e transmissão, o sistema de transmissão atual está sendo cada vez mais exigido e as linhas tendo que transportar cargas maiores que as previstas em projeto.

Como os métodos tradicionais com os quais foi feito o projeto das linhas existentes fazem uso de parâmetros determinísticos que deixaram uma margem de segurança muito grande, permitindo que se amplie a capacidade de transporte delas apenas com uma reavaliação desses parâmetros por meio da monitoração destes em tempo real e/ou do uso de metodologias de cálculo mais modernas. Foi justamente neste ponto que se apoiou o estudo aqui realizado, tornando possível a determinação em tempo real ou até uma semana a frente da temperatura superficial do condutor de uma linha de transmissão, concedendo ao operador do sistema a possibilidade de agendar transferências de carga e operar a linha o mais próximo possível do limite definido em projeto.

6.2 Trabalho Desenvolvido

No estudo realizado aqui, foi desenvolvida uma metodologia de determinação do limite térmico de um condutor de uma linha aérea de transmissão baseada em um sistema de inferência difuso, o qual foi

criado a partir de dados históricos medidos em campo. O objetivo pretendido foi o de representar de maneira mais fiel o comportamento real de um condutor instalado em uma linha, permitindo estimar a temperatura superficial do cabo até uma semana a frente por meio de dados obtidos de centros de previsão do tempo e estudos climáticos ou de modelos de previsão de séries.

Após uma escolha prévia das variáveis de entrada mais influentes na relação corrente-temperatura de um condutor e da quantidade de pontos a serem utilizados na etapa de treinamento, foi utilizado um método de agrupamento difuso, o agrupamento subtrativo, para a definição de conjuntos difusos que serviram como base para a geração das regras de inferência do modelo. Como optou-se pelo uso de um sistema de inferência difuso do tipo Sugeno, onde a saída é uma combinação linear das entradas, foi necessário determinar os parâmetros multiplicativos do consequente de cada regra. Para isso foi feita uma regressão linear múltipla por meio do método dos mínimos quadrados, completando dessa forma o processo de elaboração (também denominado de treinamento) do modelo.

O treinamento, os testes e a validação do modelo foi feita com base em uma massa de dados históricos medida em uma linha de transmissão real.

6.3 Vantagens da Metodologia Proposta

A combinação do algoritmo de agrupamento subtrativo com uma regressão linear múltipla para a elaboração de um sistema de inferência difuso do tipo Sugeno permitiu que o processo de treinamento do modelo fosse bastante eficiente do ponto de vista de desempenho computacional. Isso se deve ao fato de que nenhum desses processos envolveu algum tipo de otimização não-linear ou cálculos analíticos muito complexos, permitindo que a busca pela combinação mais favorável das variáveis de entrada e pelo número ótimo de regras fosse feito em um tempo relativamente pequeno.

Além disso, o método proposto apresentou um alto grau de flexibilidade, tornando possível a troca das variáveis de entrada de maneira rápida, sem necessitar de grandes alterações na estrutura do modelo.

Durante as diversas simulações foi observado que quando uma das variáveis de entrada apresenta um comportamento em desacordo com a saída, o número de grupos/regras aumenta consideravelmente. Isso é um sinal de que a variável de entrada tem baixa relação com a saída e por isso sua inclusão exigiu mais esforço do processo de treinamento do sistema para a sua representação. Conclui-se

então que o número de grupos/regras criados é um bom parâmetro de escolha da combinação mais adequada das variáveis de entrada.

6.4 Limitações do Modelo e da Análise Realizada

A análise do potencial do modelo, aqui feita por meio das simulações, foi limitada. A variabilidade e quantidade dos dados históricos que foram disponibilizados para o treinamento e avaliação foi pequena. A massa de dados históricos aqui utilizada possuía valores medidos de temperatura ambiente, velocidade e direção do vento, radiação solar, temperatura do condutor, corrente que o atravessa e a hora do dia em que foram feitas as medições.

Com isso, deixou de ser realizada a análise do comportamento do condutor empregando como variáveis de entrada outros parâmetros importantes para a determinação do limite térmico de condutores de linhas aéreas de transmissão: a tensão mecânica aplicada sobre o condutor e a altura do mesmo em relação ao solo, pela falta de disponibilidade destes dados. Apesar disso, os bons resultados apresentados nas simulações aqui feitas, mostrando a capacidade da metodologia em extrair informações do relacionamento entradas-saída presentes na massa de dados históricos de treinamento, aliada a flexibilidade do modelo, indicam que um desempenho semelhante será obtido em uma simulação com esses parâmetros.

Os valores de erro encontrados nas simulações foram realmente muito bons, mas devem ser observados com cuidado. A pequena quantidade de dados históricos com que se contou para fazer as simulações neste trabalho - dados horários medidos por 31 dias consecutivos, resultando em 744 medições de cada variável - pode ter resultado em um sobre-treinamento do modelo, ou seja, o sistema de inferência difuso pode ter se ajustado extremamente aos dados do treinamento, provocando uma reprodução muito fiel do comportamento apenas destes pontos e uma perda da capacidade de extrapolação do sistema (estimação para pontos diferentes destes).

O grande diferencial deste modelo, que é o fato de ter sido criado a partir de dados históricos, também trouxe algumas limitações a ele. Como o problema de determinação do limite térmico de um condutor de uma linha de transmissão aérea é dependente de parâmetros sazonais, variando com a época do ano, a representatividade do modelo fica limitada a uma faixa temporal próxima ao intervalo onde foram medidos os dados históricos utilizados no seu treinamento. Neste trabalho foram empregados dados medidos por 31 dias consecutivos, ficando a estimação do modelo limitada a um

período do ano próximo a esse intervalo, período esse onde pode-se desconsiderar a sazonalidade dos parâmetros de entrada. Esse é o motivo que levou a restringir a estimação a no máximo uma semana a frente do período do ano onde foram medidos os dados de treinamento.

Por causa da sua faixa de representatividade restrita, o modelo deve ser treinado novamente a cada uma semana no máximo com os novos dados que foram medidos nesse período para que possa continuar reproduzindo com eficácia o comportamento do sistema real.

No caso do emprego de dados atmosféricos obtidos de centros de previsão do clima ou de estações meteorológicas distantes das linhas se faz necessário o uso de técnicas de transferência espacial de variáveis sobre os dados, levando assim em conta o efeito da diferença entre o relevo e a vegetação da área onde foram medidos os parâmetros atmosféricos e o relevo e a vegetação da área atravessada pela linha de transmissão.

A metodologia aqui proposta tem como finalidade o cálculo em tempo real e a estimação da temperatura superficial do condutor durante a operação em regime normal e de emergência. Como o sistema difuso se baseia em dados medidos em intervalos de uma hora, não é possível estimar o comportamento do condutor em condições de curto-circuito, cuja duração é bem inferior a uma hora.

6.5 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para a verificação da qualidade da estimação feita por meio do uso da metodologia aqui proposta, é necessário que se faça em um futuro estudo a comparação entre esta modelos lineares de previsão de séries temporais, além da comparação com modelos tradicionais de cálculo do limite térmico de linhas de transmissão.

Vários parâmetros do sistema de inferência difuso aqui empregado devem ser objeto de estudos futuros. Os principais são a utilização de outras funções de pertinência para elaboração dos grupos e o emprego de outras técnicas de determinação dos parâmetros conseqüentes das regras de inferência, como por exemplo uma rede neural, formando assim um sistema *neuro-fuzzy* (também conhecido como ANFIS).

Um ponto importante a ser estudado é o comportamento do modelo difuso aqui desenvolvido com a utilização de dados meteorológicos obtidos em intervalos de tempo menores, de 15 em 15 minutos ou até mesmo de 5 em 5 minutos. Os parâmetros atmosféricos de entrada do modelo tendem a apresentar dois comportamentos distintos quando medidos dessa forma. A radiação solar e a

temperatura ambiente tendem a apresentar um comportamento mais uniforme quando se considera medições realizadas com um intervalo de tempo menor. Já os dados de vento, principalmente em baixas velocidades, tendem a apresentar mais variações. A resposta do modelo a estes dados deve ser verificada.

A pesquisa desenvolvida em CIGRÉ (1998) com as empresas do setor de transmissão de vários países do mundo mostrou dados interessantes e de grande valia para estudiosos da área de carregamento de linhas. Uma pesquisa análoga a essa, baseada em um questionário com perguntas sobre os métodos utilizados pelas empresas de transmissão no Brasil, sobre os valores comumente empregados nos cálculos de ampacidade, sobre os tipos de cabos em uso nas linhas e principalmente sobre o que as empresas consideram como pontos fundamentais a serem desenvolvidos nessa área no futuro, serviria de base para que os estudos posteriores sejam voltados explicitamente para as características, necessidades e anseios do setor no Brasil.

Apêndice A

Modelo Térmico Tradicional

O modelo aqui descrito é baseado no trabalho desenvolvido por Vincent T. Morgan. Ele possui uma boa precisão e uma relativa simplicidade, além de ser o modelo utilizado como base em diversos estudos e normas na área de determinação da capacidade operativa de linhas de transmissão e ampacidade (CIGRÉ, 1992; ANEEL, 2005a).

A.1 Equação Geral de Calor de um Condutor

A Equação Geral de Calor de um Condutor é apresentada a seguir:

$$\nabla^2 T + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{A.1})$$

Onde ∇^2 é o operador Laplaciano:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Passando a equação A.1 para coordenadas cilíndricas, tem-se:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{A.2})$$

Onde:

- T : temperatura do condutor;
 r : distância radial;
 φ : ângulo azimutal;
 z : distância axial;
 q : potência por unidade de volume;
 k : condutividade térmica do cabo;
 α : difusão térmica, dada por: $\alpha = \frac{k}{\gamma \cdot c_p}$;
 c_p : calor específico;
 γ : densidade do material do cabo.

De A.1 e A.2, tem-se:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\gamma \cdot c_p} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q \quad (\text{A.3})$$

Onde:

- λ : condutividade térmica.

A.2 Equação Diferencial da Temperatura do Condutor

Para efeitos práticos:

$$T_{AV} = \frac{T_C + T_S}{2} \quad (\text{A.4})$$

Onde:

- T_{AV} : temperatura média do condutor;
 T_C : temperatura no núcleo do condutor;
 T_S : temperatura na superfície do condutor.

Considerando A.4, pode ser obtida a seguinte equação, a partir de A.3:

$$M \cdot c_p \cdot \frac{dT_{AV}}{dt} = Q_j + Q_s + Q_m + k_i \cdot Q_i - P_r - P_c - P_w \quad (\text{A.5})$$

Onde:

- M : massa do condutor (Kg/m). É dada por: $M = \gamma \cdot A$;
 A : área do condutor (m^2);
 Q_j : calor ganho por Efeito Joule (W/m);
 Q_s : calor ganho por radiação solar (W/m);
 Q_m : calor ganho por Efeito Ferromagnético (W/m);
 Q_i : calor ganho por Efeito Corona (W/m);
 P_r : calor perdido por irradiação (W/m);
 P_c : calor perdido por convecção (W/m);
 P_w : calor perdido por efeito da evaporação de água na superfície do condutor (W/m);
 k_i : constante referente à difusão térmica.

A.3 Ampacidade em Regime Permanente

Em regime permanente, supõe-se:

- Temperatura do condutor constante por 1 hora;
- corrente no condutor constante por 1 hora;
- variáveis climáticas permanecem constantes por 1 hora.

Portanto: $\frac{dT_{AV}}{dt} = 0$ em A.5, resultando na equação de balanço de calor de um condutor:

$$Q_j + Q_s + Q_m + k_i \cdot Q_i - P_r - P_c - P_w = 0 \quad (\text{A.6})$$

Nem todos os termos dessa equação são fáceis de se estimar ou estão bem modelados. Por esses motivos e com o intuito de simplificar os cálculos envolvidos, alguns desses termos podem ser desprezados sem grandes prejuízos ao modelo térmico.

De acordo com Flores (1991), o efeito magnético em condutores com núcleos de aço, dependendo do número de camadas e do tipo do cabo, tende a ser desprezível, podendo-se assim, retirar da equação o termo Q_m .

Também de acordo com Flores (1991), na prática apenas uma pequena parcela do calor gerado pelo efeito Corona é difundido para o condutor, portanto a parcela de aquecimento provocada por este efeito (Q_i) também pode ser desprezada da equação acima.

A parcela de calor perdida por efeito da evaporação de água na superfície do condutor, por sua vez, apresenta uma grande dificuldade para ser modelada com precisão. Soma-se a isto o fato de que o agente causador deste efeito, a chuva, não se localiza sobre toda a extensão da linha de transmissão, mas apenas em alguns pontos isolados. Como o carregamento máximo da linha é determinado levando-se em conta toda a sua extensão, o fato de não estar chovendo em algum local faz com que este seja o caso crítico a ser levado em conta nos cálculos. Desta forma, a parcela P_w não é considerada na equação A.6.

Fazendo-se:

$$Q_j + Q_m = I^2 \cdot R_{AC}(T_c)$$

e desprezando os termos k_i , Q_i e P_w , tem-se:

$$I^2 \cdot R_{AC}(T_c) + Q_s = P_r + P_c \quad (\text{A.7})$$

$$I = \sqrt{\frac{P_r + P_c - Q_s}{R_{AC}(T_c)}} \quad (\text{A.8})$$

O problema de determinação do carregamento de linhas de transmissão se resume à resolução da equação A.8. Os termos constituintes dessa equação serão descritos a seguir.

A.4 Resistência elétrica do condutor

O termo $R_{AC}(T_c)$ representa a resistência que o condutor apresenta, a uma dada temperatura, à passagem da corrente elétrica alternada. Essa resistência representa as perdas elétricas do cabo pela presença dos efeitos Joule e Ferromagnético. Ela pode ser obtida a partir de tabelas fornecidas pelo fabricante do cabo de resistências em função de algumas temperaturas. Normalmente o valor correspondente à temperatura exata do condutor naquele momento não está presente na tabela ou o fabricante fornece apenas a resistência em uma temperatura de referência, sendo então necessário o uso da seguinte expressão:

$$R_{AC}(T_c) = R_{AC} \cdot [1 + \alpha_{AC} \cdot (T_c - T_0)] \quad (\text{A.9})$$

Onde:

R_{AC} : resistência AC do condutor em uma temperatura de referência T_0 (Ω/m);

α_{AC} : coeficiente de variação da resistência ($^{\circ}C^{-1}$);

T_c : temperatura do condutor ($^{\circ}C$);

T_0 : temperatura de referência do condutor ($^{\circ}C$).

De acordo com Flores (1991), α_{AC} pode ser calculado através de:

$$\alpha_{AC} = \frac{R_{AC}(T_{R2}) - R_{AC}(T_{R1})}{R_{AC}(T_{R1}) \cdot [T_{R2} - T_{R1}]} \quad (A.10)$$

Onde:

T_{R1} : temperatura de referência 1 ($^{\circ}C$);

T_{R2} : temperatura de referência 2 ($^{\circ}C$);

$R_{AC}(T_{R1})$: resistência do condutor à temperatura T_{R1} (Ω/m);

$R_{AC}(T_{R2})$: resistência do condutor à temperatura T_{R2} (Ω/m).

Recomenda-se utilizar como referências as resistências obtidas às temperaturas de $25^{\circ}C$ e $75^{\circ}C$ para T_{R1} e T_{R2} , respectivamente (FLORES, 1991).

Em alguns casos os fabricantes podem fornecer a resistência e o coeficiente de variação para corrente contínua. Nestas circunstâncias, todos os termos referentes a corrente alternada (sub-índice AC) das equações A.8, A.9 e A.10 são substituídos por pelos mesmos termos referentes a corrente contínua (sub-índice DC). Também deve-se fazer a conversão da corrente encontrada pela equação A.8 de contínua para alternada. Isso é necessário pois a resistência à passagem de corrente alternada em condutores com núcleos magnéticos (núcleos de aço) é maior que a resistência à passagem de corrente contínua. Deb (2000) apresenta uma descrição detalhada do efeito causador disso. A metodologia de conversão apresentada a seguir é descrita em ANEEL (2005a) e depende da quantidade de tentos de alumínio que o condutor possui.

A.4.1 Condutores com 3 camadas de tentos de alumínio

$$I_{AC} = \frac{I_{DC}}{\sqrt{1,0123 + 2,36 \cdot 10^{-5}}} \quad (A.11)$$

A.4.2 Condutores com 1 ou 2 camadas de tentos de alumínio

$$I_k = \frac{I_{DC}}{A} \quad (\text{A.12})$$

Com A sendo a área da seção transversal do condutor. Dependendo do valor de I_k , calcula-se I_{AC} de diferentes maneiras:

- Se $I_k \leq 0,742$:

$$I_{AC} = I_{DC} \quad (\text{A.13})$$

- Se $0,742 < I_k \leq 2,486$:

$$I_{AC} = \frac{I_{DC}}{\sqrt{1 + 0,02 \cdot B_1}} \quad (\text{A.14})$$

Com:

$$B_1 = 25,62 - 133,9 \cdot I_k + 288,8 \cdot I_k^2 - 334,5 \cdot I_k^3 + 226,5 \cdot I_k^4 - 89,73 \cdot I_k^5 + 19,31 \cdot I_k^6 - 1,744 \cdot I_k^7$$

- Se $2,486 < I_k \leq 3,908$:

$$I_{AC} = \frac{I_{DC}}{\sqrt{1 + 0,02 \cdot B_2}} \quad (\text{A.15})$$

Com:

$$B_2 = 2,978 - 22,02 \cdot I_k + 24,87 \cdot I_k^2 - 11,64 \cdot I_k^3 + 2,973 \cdot I_k^4 - 0,4135 \cdot I_k^5 + 0,02445 \cdot I_k^6$$

- Se $I_k > 3,908$:

$$I_{AC} = \frac{I_{DC}}{\sqrt{1,1}} \quad (\text{A.16})$$

A.5 Ganho de Calor por Aquecimento Solar

De acordo com o modelo de Vincent Morgan, o ganho de calor por aquecimento solar do condutor pode ser calculado pela equação A.17.

$$Q_s = \alpha_s \cdot D \cdot \left\{ I_b \cdot \left[\text{sen}(\eta) + \frac{\pi}{2} \cdot F \cdot \text{sen}(H_s) \cdot \cos^2\left(\frac{\xi}{2}\right) \right] + I_d \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \cos^2\left(\frac{\xi}{2}\right) \cdot (1 + F) \right\} \quad (\text{A.17})$$

Onde:

- α_s : coeficiente de absorção solar do condutor;
- D : diâmetro do condutor (m);
- I_b : intensidade da radiação solar direta sobre uma superfície normal ao Sol (W/m^2);
- I_d : intensidade da radiação solar difusa do céu sobre uma superfície horizontal (W/m^2);
- η : ângulo do raio solar em relação ao eixo do condutor ($^\circ$);
- F : reflectância do solo sob o condutor;
- H_s : altura solar ($^\circ$);
- ξ : inclinação com a horizontal ($^\circ$).

Em ANEEL (2005a) é dito que o valor do coeficiente de absorção solar do condutor α_s varia entre 0,27 e 0,95 respectivamente para cabos novos e envelhecidos. Em Flores (1991) pode ser encontrada a tabela proposta por Morgan com os valores de α_s para vários tipos de condutores em diversas condições de conservação. O valor sugerido em CIGRÉ (1992) é de 0,50 quando não se conhece a situação do condutor.

O valor da reflectância F da superfície do solo sob a linha de transmissão é definido por meio da tabela A.1.

Os valores de I_b e I_d podem ser medidos em campo ou determinados por meio das equações A.18 e A.20 e do conhecimento de alguns parâmetros relativos às condições da atmosfera e à posição do

Tabela A.1: Reflectância do solo sob a linha de transmissão (FLORES, 1991)

Reflectância	Superfície sob a linha
0,05	Água
0,1 - 0,2	Floresta
0,1 - 0,2	Área urbana
0,1 - 0,2	Gramma
0,1 - 0,2	Culturas diversas
0,6 - 0,8	Gelo e neve

sol.

$$I_b = CN \cdot [I_{b0} + 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot Hg \cdot (1353 - I_{b0})] \quad (\text{A.18})$$

Onde:

CN : constante de transparência da atmosfera;

I_{b0} : intensidade da radiação solar direta ao nível do mar sobre uma superfície normal ao sol (W/m^2);

Hg : altitude em relação ao nível do mar (m).

O valor de I_{b0} é determinado pela equação A.19. Já a constante de transparência da atmosfera CN é determinada consultando-se a tabela A.2.

$$I_{b0} = 1280 \cdot \frac{\text{sen}(Hs)}{\text{sen}(Hs) + 0,314} \quad (\text{A.19})$$

Tabela A.2: Constante de transparência da atmosfera (FLORES, 1991)

CN	Condições da atmosfera
0,0 - 0,5	Céu muito encoberto
0,5 - 0,7	Céu encoberto
0,7 - 0,9	Atmosfera clara
0,9 - 1,1	Atmosfera muito clara
1,1 - 1,3	Condições raras

$$I_d = I_t - I_b \cdot \text{sen}(Hs) \quad (\text{A.20})$$

Onde o valor de I_t é dado por:

$$I_t = \frac{I_b \cdot \text{sen}(Hs) \cdot (CN + CB) \cdot (\text{sen}^2(Hs) + 0,0222)}{CA \cdot CN \cdot \text{sen}^2(Hs)} \quad (\text{A.21})$$

Sendo que:

$$CA = 1,865 + 0,430 \cdot \text{sen}^2(Hs) \quad (\text{A.22})$$

$$CB = 1,037 + 0,467 \cdot \text{sen}^2(Hs) \quad (\text{A.23})$$

No cálculo da altura solar Hs utiliza-se a equação a seguir:

$$\text{sen}Hs = \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta_s + \cos\delta_s \cdot \cos z \quad (\text{A.24})$$

Onde:

ϕ : latitude da linha(°);

δ_s : declinação solar (°);

z : hora angular (°).

O valor de δ_s é encontrado por:

$$\delta_s = 23,45 \cdot \text{sen}\left(360 \cdot \frac{284 + N}{365}\right) \quad (\text{A.25})$$

Com a variável N sendo o dia do ano, variando entre 1 e 365. Já a hora angular z pode ser determinada pela equação A.26.

$$z = (H_t - 12) \cdot 15 + (LG_1 - LG) + \frac{corr}{4} \quad (\text{A.26})$$

Onde:

- H_l : hora legal (horas);
 LG_1 : longitude do local da linha de transmissão ($^\circ$);
 LG : longitude legal ($^\circ$);
 $corr$: correção devido a perturbações na velocidade da Terra.

O parâmetro de correção varia com o dia do ano e é encontrado com o seguinte polinômio:

$$corr = -3,2995746 - 0,8508616 \cdot N + 1,925202 \cdot 10^{-2} \cdot N^2 - 1,491815 \cdot 10^{-4} \cdot N^3 + 4,802821 \cdot 10^{-7} \cdot N^4 - 5,445097 \cdot 10^{-10} \cdot N^5 \quad (A.27)$$

O valor do ângulo do raio solar em relação ao eixo do condutor é dado por:

$$\cos \eta = \cos(H_s - \xi) \cdot \cos(Y_l - Y_s) \quad (A.28)$$

Onde:

- Y_l : azimute da linha ($^\circ$);
 Y_s : azimute do sol ($^\circ$).

Determina-se o azimute do sol por meio de:

$$\text{sen} Y_s = \frac{\cos \delta_s \cdot \text{senz}}{\cos H_s} \quad (A.29)$$

Os valores de inclinação do condutor com a horizontal ξ , coeficiente de absorção solar do condutor α_s , reflectância do solo sob o condutor F , constante de transparência da atmosfera CN , altitude H_g , latitude ϕ e longitude LG_1 da linha de transmissão, dia do ano N , longitude legal LG , hora legal H_l e azimute da LT Y_l são os dados de entrada necessários para o cálculo do aquecimento solar do condutor utilizando esta metodologia.

De acordo com a norma brasileira em vigor NBR 5422 (ABNT, 1985) e com ANEEL (2005a), deve-se utilizar valores medidos da radiação solar incidente global (radiação direta mais radiação difusa) na altura da linha de transmissão. Por ser um valor obtido em campo, não necessita de nenhum tipo de correção para o local de passagem da LT. A norma ainda recomenda que na falta desses dados medidos, se utilize 1000 W/m^2 como valor para a radiação solar nos cálculos de determinação da corrente limite de operação da linha.

No caso da utilização de dados medidos no local da passagem da linha, a equação A.17 se simplifica bastante, tomando a forma mostrada na equação A.30, a qual é recomendada em ANEEL (2005a) para o cálculo do ganho de calor por aquecimento pelo sol do cabo. Ela também é basicamente a mesma descrita em Deb (2000), onde a única diferença é que o termo correspondente a radiação solar global aparece como a soma da radiação solar direta com a radiação solar difusa.

$$Q_s = \alpha_s \cdot D \cdot I_t \quad (\text{A.30})$$

Onde:

- α_s : coeficiente de absorção solar do condutor;
- D : diâmetro do condutor (m);
- I_t : radiação solar incidente global(W/m²).

A.6 Perdas de Calor por Irradiação

Todo corpo aquecido emite e perde calor por meio da emissão de radiação eletromagnética, principalmente na forma de radiação infravermelha, para o ambiente ao seu redor. Em um condutor aéreo, esse processo é representado matematicamente pela equação A.31.

$$P_r = \frac{\pi}{2} \cdot D \cdot \sigma \cdot \left\{ \epsilon_g \cdot \left[(T_c + 273)^4 - (T_g + 273)^4 \right] + \epsilon_d \cdot \left[(T_c + 273)^4 - (T_d + 273)^4 \right] \right\} \quad (\text{A.31})$$

Onde:

- D : diâmetro do cabo condutor (m);
- σ : constante de Stephan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m².K⁴);
- ϵ_g : emissividade do condutor voltado à terra;
- ϵ_d : emissividade do condutor voltado ao céu;
- T_c : temperatura do condutor (°C);
- T_g : temperatura da terra (°C);
- T_d : temperatura do céu (°C).

De acordo com Flores (1991), pode-se fazer as seguintes considerações:

- $\varepsilon_g = \varepsilon_d = \varepsilon =$ emissividade do condutor;
- $T_g = T_d = T_a =$ temperatura ambiente.

Portanto, a partir de A.31, chega-se a:

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot \left[(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right] \quad (\text{A.32})$$

A emissividade do condutor varia de 0,27 para condutores novos até 0,95 para condutores envelhecidos instalados em ambiente industrial. Flores (1991) apresenta uma tabela para determinação da emissividade. Em CIGRÉ (1992) o valor sugerido para utilização é de 0,50 quando a condição da superfície do condutor é desconhecida.

A.7 Perdas de Calor por Convecção

A perda de calor por convecção é aquela que ocorre devido ao efeito de resfriamento provocado pelo vento quando passa pelo condutor. Ela é determinada por meio da seguinte fórmula:

$$P_c = h \cdot \pi \cdot D \cdot (T_c - T_a) \quad (\text{A.33})$$

Onde:

- h : coeficiente de transferência de calor da superfície do condutor para o ambiente ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);
- T_c : temperatura do condutor ($^\circ\text{C}$);
- T_a : temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$).

O valor do coeficiente médio de transferência convectivo de calor h depende das dimensões e forma geométrica do condutor e de propriedades físicas do ar e por isso é calculado de forma empírica com dados experimentais (FLORES, 1991). Em Deb (2000) encontra-se uma fórmula para o cálculo de h baseada no modelo do IEEE (1993). No modelo de Vincent T. Morgan utilizado como base de comparação neste trabalho e descrito em Flores (1991) e no modelo usado em ANEEL (2005a), a equação acima é utilizada na seguinte forma:

$$P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_c - T_a) \cdot Nu \quad (\text{A.34})$$

Onde:

λ_f : condutividade térmica do ar (W/m.°C);

Nu : número de Nusselt.

Sabe-se que:

$$\lambda_f = 2,42 \cdot 10^{-2} + 7,2 \cdot 10^{-5} \cdot T_f \quad (\text{A.35})$$

Onde T_f representa a temperatura média da película de ar que envolve o condutor, dada por:

$$T_f = \frac{(T_c + T_a)}{2} \quad (\text{A.36})$$

A velocidade do ar é um dos parâmetros de maior importância na determinação das perdas de calor por convecção, sendo representada no cálculo do número de Nusselt presente na equação A.34. Por isso normalmente divide-se o cálculo em três faixas, de acordo com a velocidade do vento (FLORES, 1991; ANEEL, 2005a):

A.7.1 Convecção Natural

A convecção natural é aquela que ocorre quando a velocidade do vento é nula. Neste caso o número de Nusselt depende de dois parâmetros: o número de Prandtl e o número de Grashof, os quais são definidos respectivamente pelas equações A.37 e A.38.

$$Pr = 0,715 - 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot T_f \quad (\text{A.37})$$

$$Gr = \frac{D^3 \cdot (T_c - T_a) \cdot g}{(T_f + 273) \cdot \nu_f^2} \quad (\text{A.38})$$

Onde:

g : aceleração da gravidade (m/s²);

ν_f : viscosidade cinemática do ar (m²/s).

Em Deb (2000), a viscosidade cinemática do ar é calculada através da expressão:

$$v_f = v_{f0} \cdot \left[1 - H \cdot \frac{(6,5 \cdot 10^{-3})}{288,16} \right]^{-5,2561} \quad (\text{A.39})$$

Onde:

H : altitude (m);

v_{f0} : viscosidade cinemática do ar ao nível do mar (m^2/s).

O valor v_{f0} é calculado através da seguinte equação:

$$v_{f0} = 1,32 \cdot 10^{-5} + 9,5 \cdot 10^{-8} \cdot T_f \quad (\text{A.40})$$

Em Flores (1991) considerou-se v_f igual ao valor v_{f0} . Essa aproximação não se mostra adequada, pois para altitudes entre 0m e 800m, apresenta uma diferença de até 10% em relação ao valor encontrado através da equação A.39 devido a diferença na densidade do ar. Em ANEEL (2005a) também foi feita a mesma aproximação no cálculo da viscosidade cinemática do ar, mas em contrapartida foi considerada a densidade relativa do ar no cálculo das perdas de calor por convecção forçada. Optou-se por utilizar neste trabalho a expressão de Deb (2000), a qual considera o efeito da altitude tanto na convecção natural quanto na forçada.

Uma vez definidos os termos acima, calcula-se o número Nusselt por meio de:

$$Nu = A_2 \cdot (Gr \cdot Pr)^{m_2} \quad (\text{A.41})$$

Os parâmetros A_2 e m_2 variam de acordo com o produto $(Gr \cdot Pr)$ e seus valores podem ser escolhidos pela tabela A.3:

Tabela A.3: Determinação de A_2 e m_2 (ANEEL, 2005a)

Faixa de ($Gr \cdot Pr$)		A_2	m_2
De	Até		
10^2	10^4	0,850	0,188
10^4	10^6	0,480	0,250

A.7.2 Convecção Forçada

A convecção forçada é aquela que ocorre na presença de vento acima de 0,5 m/s. Nesta situação, o Número de Nusselt depende de dois parâmetros diferentes dos utilizados no caso da convecção natural e, com isso, a sua determinação se faz por meio da equação A.42. Os efeitos da turbulência do vento e do balanço do cabo não são considerados por terem pouca importância nos resultados finais (IEEE, 1993).

$$Nu = B_2 \cdot Re^{m_2} \quad (\text{A.42})$$

Sendo Re o Número de Reynolds, o qual é definido como:

$$Re = \frac{D \cdot V_v}{\nu_f} \quad (\text{A.43})$$

Onde:

V_v : velocidade do vento (m/s);

D : diâmetro do condutor (m).

Os coeficientes B_2 e m_2 presentes na equação A.42 são determinados de acordo com a faixa de atuação do Número de Reynolds e do coeficiente de rugosidade do condutor e podem ser obtidos da tabela A.4. O coeficiente de rugosidade do condutor pode ser determinado pela equação A.44.

$$Rr = \frac{d}{2 \cdot (D - d)} \quad (\text{A.44})$$

Tabela A.4: Determinação de B_2 e m_2 (ANEEL, 2005a)

Faixa de Rugosidade	Faixa de Re	B2	m2
$0,05 < Rr < 0,718$	$100 < Re < 2650$	0,641	0,471
$Rr < 0,05$	$2650 < Re < 5 \cdot 10^4$	0,178	0,633
$0,05 < Rr < 0,718$	$2650 < Re < 5 \cdot 10^4$	0,048	0,800

Nos cálculos acima foi considerado que o vento incide perpendicularmente ao condutor. Normalmente isso não acontece e é fato que as perdas por convecção diminuem conforme o ângulo de

incidência do vento se afasta da direção perpendicular ao cabo. Por isso se faz necessário corrigir o Número de Nusselt por meio da equação A.45:

$$Nu_{Dv} = Nu_{Dv=90^\circ} \cdot (A_1 + B_2 \cdot (\text{sen}Dv)^{m_1}) \quad (\text{A.45})$$

Onde:

$$\begin{cases} \text{para } 0^\circ \leq Dv \leq 24^\circ : & A_1=0,42; B_2=0,68; m_1=1,08; \\ \text{para } 24^\circ < Dv \leq 90^\circ : & A_1=0,42; B_2=0,58; m_1=0,90. \end{cases}$$

A.7.3 Convecção Mista

Considera-se convecção mista aquela que ocorre com velocidade baixa de vento, entre 0 m/s e 0,5 m/s. Neste caso, ocorrem simultaneamente a convecção natural e a forçada. O cálculo das perdas por convecção mista é dado pelo maior valor entre os seguintes itens, retirados da metodologia descrita em ANEEL (2005a):

1. Fixa-se um ângulo de incidência igual a 45° e calcula-se as perdas por convecção conforme as equações A.34 e A.44;
2. Calcula-se o valor das perdas por convecção com a equação A.34 e com $Nu_{Dv} = 0,55 \cdot Nu_{Dv=90^\circ}$;
3. Usa-se a equação A.34 com Nu calculado pela equação A.41.

Em IEEE (1993) recomenda-se não considerar a convecção mista nos cálculos de perdas de calor pelo condutor, pois a medição de valores baixos de velocidade do vento (abaixo de 3 m/s) é normalmente inexata devido à inércia dos aparelhos utilizados para este fim. Este efeito é percebido nos dados de velocidade do vento utilizados por Flores (1991).

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Nota Técnica N°038/2005-SRT/ANEEL*. Brasília - Brasil, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa N° 191 de 12 de Dezembro de 2005*. Brasília - Brasil, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR5422: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica*. Rio de Janeiro - Brasil, 1985.

BOSIGNOLI, R.; FILHO, J. I. da S. Predição da ampacidade máxima de LT's em curto e médio prazos. *XV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 1999.

CHIU, S. Fuzzy model identification based on cluster estimation. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, v. 2, n. 3, 1994.

CHIU, S. Method and software for extracting fuzzy classification rules by subtractive clustering. p. 461–465, 1996.

CIGRÉ. CIGRÉ WG12-22: Thermal State of Overhead Line Conductors. *ELECTRA*, n. 121, p. 51–67, Outubro 1992.

CIGRÉ. *CIGRÉ SC22: Survey on Future Use of Conductors*. France, Setembro 1998.

COSENTINO, A. et al. *Critérios e Procedimentos para o Cálculo da Ampacidade Estatística de Linhas Aéreas de Transmissão com Cabos Alumínio-Aço: Versão final da etapa 2*. [S.l.], 1993.

COX, E. *The Fuzzy Systems Handbook*. London-UK: AP Professional, 1999.

DEB, A. K. *Power Line Ampacity System: theory, modeling and applications*. 1. ed. Boca Raton, Florida-USA: CRC Press, 2000.

DOUGLASS, D. A.; MOTLIS, Y.; SHEPPA, T. O. *IEEE's Approach Increasing Transmission Line Ratings in North America*. New York - USA, 1999.

FLORES, P. H. *Cálculo Probabilístico da Ampacidade de Linhas Aéreas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-Brasil, 1991.

FURTADO, T. A. et al. Avaliação dos modelos determinístico e estatístico para carregamento da LT Arcos-Divinópolis 2 138kV, utilizando sistema de monitoramento em tempo real. *XIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 1997.

GUETTER, A. K.; HOFFMANN, J. N.; MELLO, J. L. S. Parâmetros meteorológicos aplicáveis para o projeto de linhas de transmissão no paraná. *XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2005.

GUILLAUME, S. Designing fuzzy inference systems from data: An interpretability-oriented review. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, v. 9, n. 3, p. 426–443, 2001.

GUIRELLI, C. R. et al. Desenvolvimento de um sistema computacional de previsão de carga baseado em redes neurais e inteligência artificial através de sensores implantados no sistema de transmissão de energia. *II CITENEL - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, p. 1148–1153, 2003.

IEEE. *IEEE Std 738-1993*: IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors. New York - USA, 1993.

JUNIOR, A. B.; RIBEIRO, F. S.; RAMOS, D. S. Cálculo probabilístico da ampacidade de LT's aéreas. *XIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 1997.

KLIR, G. J. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: theory and applications*. New Jersey-USA: Prentice-Hall Inc., 1995.

KOSMANN, C. Avaliação de ampacidade estatística da LT 138kV Joinville/Eletrosul - Joinville IV. *XIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 1997.

MATHWORKS INC. *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. versão 2.2.3. EUA, Março 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Balanço Energético Nacional 2005: Ano-base 2004*. Brasília - Brasil, 2005.

NOGUEIRA, M. M.; AZZAM, G.; SOUZA, F. L. A. Carregamento de linhas de transmissão aéreas: Dos critérios determinísticos à monitoração em tempo real. *XVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2001.

OLIVEIRA, C. M. F. de. *Recapacitação de Linhas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-Brasil, 2000.

PEDRYCZ, W. *Knowledge-Based Clustering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

RESENDE, S. O. *Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações*. Barueri-Brasil: Ed. Manole, 2003.

ROYCHOWDHURY, S.; PEDRYCZ, W. A survey of defuzzification strategies. *International Journal of Intelligent Systems*, v. 16, p. 679–695, 2001.

SEPPA, T. O. et al. Application of real time thermal ratings for optimizing transmission line investment and operating decisions. *CIGRÉ 22-301 Session 2000*, 2000.

SHMIDT, N. P. Comparison between IEEE and Cigré ampacity standards. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 4, p. 1555–1562, 1999.

SHRESTHA, P.; PHAM, K. A computer program to perform dynamic thermal analysis for bare overhead conductors during short-time overload conditions. *IEEE Technical Applications Conference and workshops Northcon95*, p. 207–211, Outubro 1995.

SOUZA, F. L. A. de et al. Técnicas de transferência espacial de variáveis climáticas como ferramenta objetiva na otimização dos sistemas elétricos de potência - um cotejamento técnico-econômico no sistema light. *XVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, 2001.

STEPHEN, C. R. Description of state of the art methods to determine thermal rating of lines in real-time and their application in optimizing power flow. *CIGRÉ 22-304 Session 2000*, 2000.

STOFT, S. Power system economics. In: _____. New York-USA: IEEE Press, 2002. cap. 5.2, p. 382–388.

VARANASI, R. K. *Dakotas Wind Transmission Study, Task 2, Potential Transmission Technologies to Increase Power Transfers*. [S.l.], 2005.

WANG, L.-X.; MENDEL, J. M. Generating fuzzy rules by learning from examples. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. 22, n. 6, p. 1414–1427, 1992.

WU, H. C.; LU, C. N. Automatic fuzzy model identification for short-term load forecast. *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, v. 146, n. 5, p. 477–482, 1999.