

Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Laboratório de Computação Evolucionária

**Cálculo da Ampacidade de Linhas  
Aéreas de Energia Considerando a  
Influência da Camada Limite da  
Atmosfera**

por

Carlos Alexandre Meireles Do NASCIMENTO

Tese submetida à banca examinadora designada pelo colegiado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção de título de Doutor em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Dr. João Antônio de Vasconcelos

Junho/2009

## ***AGRADECIMENTOS***

Citar todos os nomes que contribuíram e participaram desse trabalho é uma tarefa gratificante para mim.

Um agradecimento especial à minha mulher, Ana Paula de Oliveira Gouvêa, por toda dedicação e amor em prover condições psicológicas, espirituais e afetivas para a realização dos trabalhos e estudos. À minha família, pelo apoio dedicado.

À CEMIG por ter investido na minha formação pessoal e no suporte material para a realização dos experimentos utilizados nesta tese.

À UFMG por ter disponibilizado a infra-estrutura necessária ao desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu orientador singular, pela dedicação e apoio na motivação durante o período de formação acadêmica e pelo aporte fundamental de conhecimento amplo para elevar o meu nível de desenvolvimento acadêmico e profissional.

A todos os colegas do Laboratório de Computação Evolucionária, CPDEE e da CEMIG que me auxiliaram a superar simultaneamente os desafios do dia-a-dia das atividades profissionais e da pós-graduação.

À ANEEL por meio do “Programa de P&D ANEEL” que permitiu investir na pesquisa de campo com uso de recursos do projeto de P&D162 da parceria Cemig Distribuição S.A e UFMG.

## **RESUMO**

A maximização da capacidade de transmissão de energia dos condutores é uma área de estudo importante e de grande interesse econômico para as empresas concessionárias do setor elétrico. Neste contexto se insere este trabalho, o qual tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma nova metodologia de cálculo de ampacidade baseada na utilização de informações geradas a partir do estudo numérico da camada limite da atmosfera ao longo de todos os vãos de uma dada linha aérea em operação. Esta nova metodologia apresenta as vantagens, primeiro de ser mais realista e segura, e segundo de permitir o aumento da ampacidade em relação às metodologias tradicionais durante a operação.

A utilização das informações numéricas da camada limite da atmosfera, aplicadas no cálculo de ampacidade de linhas aéreas de energia, é uma contribuição original desta tese. Este procedimento permite a identificação dos vãos críticos ao longo da linha aérea quanto à velocidade do vento -  $V_{cc}$ . Do projeto da linha aérea, é possível extrair o conjunto de vãos críticos quanto à distância entre o condutor aéreo e objeto aterrado mais próximo -  $V_{ce}$ . Fazendo a interseção entre os dois conjuntos é possível determinar os vãos mais críticos ao longo de toda a linha -  $V_c$ . Assim, o monitoramento do conjunto de vãos pertencente a  $V_c$  pode ser feito de forma muito menos onerosa, pois normalmente o  $V_c$  é reduzido se comparado ao total de vãos da linha aérea, sobretudo em regiões montanhosas.

A nova metodologia proposta, denominada de AmpCLA - *Metodologia de Cálculo da Ampacidade de Linhas Aéreas Considerando os Resultados de Simulações da Camada Limite da Atmosfera* - foi desenvolvida em quatro etapas: (i) investigação, experimental e numérica, da influência da regionalização da amplitude da velocidade do vento na região experimental de Acuruí-MG; (ii) desenvolvimento da nova metodologia de cálculo da ampacidade AmpCLA, que leva em consideração a influência da variação da amplitude da velocidade do vento ao longo de todos os vãos da linha aérea (iii) desenvolvimento de uma ferramenta computacional para suportar a metodologia AmpCLA; (iv) validação dessa nova metodologia por meio da comparação de resultados obtidos com dados monitorados em tempo real de uma linha aérea, em operação, na região de Acuruí-MG.

A conclusão da comparação desses resultados comprova, numérica e experimentalmente, a necessidade de se considerar a amplitude da velocidade do vento em todos os vãos da linha aérea para gerar conjuntamente um valor de ampacidade de forma mais precisa e segura, em comparação aos métodos tradicionais.

## ***ABSTRACT***

The thermal rating of overhead lines is an important area of research and great economic interest for electrical energy companies. In this context, this work proposes a new methodology of ampacity calculation based on the use of database generated from numerical study of the atmospheric boundary layer - ABL throughout all the spans of a given overhead transmission line. This new methodology presents the advantages: firstly, the results are more realistic and insurance, and secondly, it allows the thermal rating increasing in relation to traditional methodologies during the operation process.

The use of numerical data from atmospheric boundary layer analyses in the conductor thermal rating calculation is an original contribution of this thesis. This procedure allows the identification of the critical spans throughout the overhead transmission line path in terms of the wind speed -  $V_{cv}$ . From the transmission line project, it is also possible to extract the set of critical spans in terms of the distance between the conductor and the nearest grounded objects -  $V_{ce}$ . Making the intersection between the two sets, it is possible to determine the set of critical spans –  $V_c$  in terms of both criteria, i.e.,  $V_c = V_{cv} \cap V_{ce}$ . Thus, the set of spans belonging to  $V_c$  can be monitored in a way much less expensive because of the size of  $V_c$  is usually small if compared with the total number of spans of the overhead transmission line, especially in highlands.

The new methodology proposed in this thesis, called of AmpCLA – *Ampacity Calculation Methodology for Overhead Transmission Lines taking into account the Numerical Results of the Atmospheric Boundary Layer* - was developed in four stages: (I) experimental and numerical investigation were made to understand how the wind speed regionalization affects the thermal rating and ampacity values; (II) development of the new methodology of ampacity calculation - AmpCLA, that considers the influences of the wind speed amplitude variation along the entire line; (III) software development based on the AmpCLA methodology; (IV) AmpCLA validation through the comparison between results gotten with the new methodology and data monitored in real time of an overhead line, in real operation, in the Acuruí (MG), southeastern of Brazil.

The afore-mentioned comparison shows, numerically and experimentally, the necessity of considering the amplitude of the wind speed in all spans of the overhead line to generate a safer and more realistic ampacity value, in comparison to traditional methods.

## ÍNDICE ANALÍTICO

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>1</b>
<b>RESUMO</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE ANALÍTICO</b>	<b>4</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>12</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>14</b>
1.1 Objetivo Geral	17
1.2 Objetivos Específicos	17
1.3 Contribuições Científicas	18
1.4 Publicações Geradas	18
1.5 Estrutura do Texto	19
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>22</b>
2.1 Introdução	22
2.2 Formulação Clássica – Regime Permanente	24
2.2.1 Capacidade Térmica em Regime Permanente (Steady-state thermal rating)	24
2.2.2 Temperatura do Condutor em Regime Permanente	26
2.3 Formulação Regime Dinâmico	26
2.4 Modelo Matemático para o Cálculo das Taxas de Ganho e Perda de Calor por Unidade de Comprimento	28
2.4.1 Taxa de Ganho de Calor por Efeito Joule ( $P_j$ )	28
2.4.2 Taxa de Ganho de Calor por Radiação Solar ( $P_s$ )	29
2.4.3 Taxa de Perda de Calor por Convecção ( $P_c$ )	30
2.4.4 Taxa de Perda de Calor por Radiação ( $P_r$ )	32
2.5 Regimes de Operação na Ampacidade	32
2.5.1 Regime Normal	33
2.5.2 Regime de Emergência	34
2.6 Métodos de Cálculo de Ampacidade	35
2.6.1 Método Determinístico	36
2.6.2 Método Estatístico	37
2.6.3 Método Dinâmico	41
2.6.4 Método Híbrido	41
2.7 Comparação Experimental entre os Regimes de Operação e os Métodos de Cálculo de Ampacidade	41
2.8 Tratamento Estatístico do Perfil Térmico do Condutor	43
2.9 Padrão das Informações Climatológicas	46

<b>2.10</b>	<b>Risco Térmico</b>	<b>46</b>
<b>2.11</b>	<b>Estudo da Camada Limite da Atmosfera</b>	<b>49</b>
2.11.1	Modelo Matemático da CLA	51
2.11.2	Domínio e Análise da CLA	52
2.11.3	Condições de Contorno – Modelo $k-\varepsilon$	53
2.11.4	Condições de Contorno na Entrada	53
2.11.5	Condições de Contorno na Saída	54
2.11.6	Condições de Contorno no Solo (Parede)	54
2.11.7	Condições de Contorno de Simetria	54
2.11.8	Tratamento das Forças de Empuxo Verticais	54
2.11.9	Processamento da CLA	56
2.11.10	Domínio Computacional	57
2.11.11	Validação do modelo da CLA	57
2.11.12	Colina de Askervein	58
2.11.13	Região de Acuruí-MG	60
2.11.14	Resultados	62
<b>2.12</b>	<b>Conclusão</b>	<b>66</b>
<b>3</b>	<b>Metodologia de Cálculo de Ampacidade - AmpCLA</b>	<b>67</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>67</b>
<b>3.2</b>	<b>Metodologia LineAmps</b>	<b>68</b>
<b>3.3</b>	<b>Metodologia AmpCLA</b>	<b>69</b>
3.3.1	Etapas da Metodologia AmpCLA	69
3.3.2	Modelo Matemático da AmpCLA	70
<b>3.4</b>	<b>Processamento Computacional da CLA</b>	<b>71</b>
3.4.1	Critério para Localização do Vão Crítico	72
<b>3.5</b>	<b>Implementação Computacional da AmpCLA</b>	<b>76</b>
3.5.1	Entradas	77
3.5.2	Processos	78
3.5.3	Saídas	81
<b>3.6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>81</b>
<b>4</b>	<b>Aplicação da Metodologia AmpCLA – Caso Teórico</b>	<b>82</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>82</b>
<b>4.2</b>	<b>Parâmetros de Aplicação</b>	<b>83</b>
<b>4.3</b>	<b>Problema PPP</b>	<b>83</b>
<b>4.4</b>	<b>Problema PPNP</b>	<b>86</b>
<b>4.5</b>	<b>Cálculo do Fator de Correção - <math>F_c</math></b>	<b>87</b>
<b>4.6</b>	<b>Análise dos Resultados</b>	<b>87</b>
4.6.1	Ampacidade Determinística	88
4.6.2	Ampacidade Estatística	88
<b>4.7</b>	<b>Conclusão</b>	<b>91</b>
<b>5</b>	<b>Aplicação da Metodologia AmpCLA – Caso Real</b>	<b>92</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>92</b>

5.2	Etapa 1: Escolha dos Parâmetros da Linha _____	92
5.3	Etapa 2: Selecionar a região contendo a linha aérea _____	94
5.4	Etapa 3: Processamento da CLA _____	95
5.5	Etapa 4: Identificar os Vãos Críticos Climatológicos - Vcc _____	98
5.6	Etapa 5: Identificar os Vãos Eletricamente Críticos- Vce _____	99
5.7	Etapas 6, 7, 8 e 9 _____	100
5.8	Etapa 10: Cálculo da Ampacidade _____	101
5.8.1	Problema PPP _____	101
5.8.2	Problema PPNP _____	102
5.9	Cálculo do Fator de Correção _____	102
5.10	Conclusão _____	103
<b>6</b>	<b><i>Análise da Metodologia AmpCLA</i></b> _____	<b>104</b>
6.1	Introdução _____	104
6.2	Sítio Experimental de Acuruí-MG _____	105
6.2.1	Localização do Sítio Experimental de Acuruí-MG _____	105
6.2.2	Estação de Medição de Velocidade de Vento de Acuruí-MG _____	105
6.2.3	Sistema de Monitoramento de Temperatura e Corrente do Condutor _____	107
6.3	Análise dos Valores Numéricos e Medidos de Velocidade do Vento _____	109
6.4	Análise das Simulações de Velocidade do Vento e de Medições de Temperatura do Condutor nos Vãos da Linha _____	112
6.4.1	Simulações da Velocidade do Vento nos Vãos da Linha _____	112
6.4.2	Monitoramento da Temperatura do Condutor em Tempo Real _____	115
6.5	Análise Utilizando Imagens Digitais _____	117
6.6	Conclusão _____	119
<b>7</b>	<b><i>Análises Finais da Metodologia AmpCLA e dos Resultados</i></b> _____	<b>121</b>
7.1	Introdução _____	121
7.2	Análise da Modelagem Matemática AmpCLA _____	121
7.2.1	Análise do Fator de Correção _____	121
7.3	Análise do Cálculo da Ampacidade via AmpCLA _____	122
7.4	Análise dos Resultados de Validação do Modelo da Camada Limite Atmosférica _____	123
7.5	Análise dos Dados Adquiridos com o Sistema de Monitoramento de Temperatura do Condutor _____	124
7.6	Conclusão _____	124
<b>8</b>	<b><i>Conclusões</i></b> _____	<b>125</b>
<b>9</b>	<b><i>Referência Bibliográfica</i></b> _____	<b>128</b>
<b>APÊNDICE A.</b>	<b><i>Ajuste Estatístico</i></b> _____	<b>131</b>
	Introdução _____	131
	Ajuste Normal _____	131

Ajuste Log-Normal a Três Parâmetros _____	132
<b>APÊNDICE B. Exemplo de Ajuste Estatístico _____</b>	<b>134</b>
Introdução _____	134
Tratamento Estatístico do Perfil Térmico do Condutor _____	137
<b>APÊNDICE C. Simulação do Perfil Térmico do Condutor _____</b>	<b>139</b>
<b>APÊNDICE D. Resultados Disponíveis na Literatura _____</b>	<b>140</b>
Introdução _____	140
Caso 1: Influência climatológica medida em Linha Experimental _____	140
Análise dos Resultados _____	141
Caso 2: Influência climatológica medida em Linha Aérea em Operação _____	142
Análise dos Resultados _____	142
Análise dos Resultados _____	144
Caso 3: Comparação entre Simulações e Medições das Ampacidades Determinística e Probabilística _____	146
Análise dos Resultados _____	146
Conclusão _____	147
<b>APÊNDICE E. Sistema Computacional - AmpCLA _____</b>	<b>148</b>
Relacionamentos _____	149
Cálculo da Distribuição dos Dados Climatológicos _____	150
Cálculo do Perfil Térmico Condutor _____	151
Cálculo dos momentos estatísticos do Perfil Térmico do Condutor _____	152
Cálculo das funções de distribuição do Perfil Térmico do Condutor _____	154
Cálculo da Mudança de Estado da Linha _____	157
Cálculo das Ampacidades _____	158
<b>APÊNDICE F. Dados Simulados para as Estações de Vento em Acuruí-MG _____</b>	<b>159</b>

## **LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 2.1 DISPOSIÇÃO DO CONDUTOR SEGUNDO A RADIAÇÃO SOLAR [MORGAN, 1981] .....	30
FIGURA 2.2 RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS: TEMPERATURA DO CONDUTOR (T) E ALTURA OU DISTÂNCIA DO CONDUTOR AO SOLO (D).....	33
FIGURA 2.3 VISÃO SISTÊMICA DA MODELAGEM DE CÁLCULO EM FUNÇÃO DA SEGURANÇA OPERACIONAL E AMPACIDADE DAS LINHAS AÉREAS.....	36
FIGURA 2.4 PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR EM FUNÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA, CALCULADO PELO MÉTODO ESTÁTICO PARA DIFERENTES VALORES DE VELOCIDADE DE VENTO. NESTES CÁLCULOS, OS SEGUINTE PARÂMETROS FORAM CONSIDERADOS: TEMPERATURA AMBIENTE = 30°C, ÂNGULO DE ATAQUE DO VENTO = 90°C E RADIAÇÃO SOLAR = 1000 W/M <sup>2</sup> .....	37
FIGURA 2.5 DISTRIBUIÇÃO DAS OCORRÊNCIAS CONJUNTAS DA VELOCIDADE DO VENTO E TEMPERATURA AMBIENTE. ..	39
FIGURA 2.6 DISTRIBUIÇÃO DO PERFIL DE TEMPERATURA DO CONDUTOR CALCULADA PARA UMA CORRENTE DE 1 PU EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE E DA VELOCIDADE DO VENTO (DADOS OBTIDOS PARA UM CONDUTOR TIPO LINNET, COM RADIAÇÃO SOLAR IGUAL A 1000 W/M <sup>2</sup> E ÂNGULO DE ATAQUE DO VENTO EM RELAÇÃO AO CONDUTOR DE 90°). .....	39
FIGURA 2.7 RISCO TÉRMICO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO CONDUTOR PARA DIFERENTES VALORES DE CORRENTE ELÉTRICA DADOS EM PU. ....	40
FIGURA 2.8 CURVAS DO PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR VERSUS DADOS MONITORADOS: CONDIÇÃO DE CONTORNO ESTÁTICA NO CONDUTOR LINNET, TEMPERATURA AMBIENTE DE 30°C, ÂNGULO DE ATAQUE DO VENTO 90° E RADIAÇÃO SOLAR 1000 W/M <sup>2</sup> . ....	42
FIGURA 2.9 TENSÃO MECÂNICA E O PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR SIMULTANEAMENTE MONITORADOS PARA UM MESMO VÃO DE LINHA AÉREA. ....	45
FIGURA 2.10 ALTURA DO CONDUTOR AO SOLO E O PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR SIMULTANEAMENTE MONITORADOS NOS VÃOS ENTRE TORRES (4-5) E (33 – 34), RESPECTIVAMENTE. ....	45
FIGURA 2.11 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE (PDF) DO PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR. ....	47
FIGURA 2.12 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE ACUMULADA (CDF) DO PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR.....	48
FIGURA 2.13 RISCO TÉRMICO OU CDF ACUMULADA COMPLEMENTAR (1-CDF).....	48
FIGURA 2.14 ILUSTRAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FRONTEIRA. ....	52
FIGURA 2.15 DISCRETIZAÇÃO DE DOMÍNIO EM MALHA NÃO-ESTRUTURA. ....	57
FIGURA 2.16 DETALHES DA TOPOGRAFIA DA COLINA DE ASKERVEIN [TAYLOR, 1983, 1985 E 1987].....	58
FIGURA 2.17 TOPOGRAFIA DE ASKERVEIN. ....	59
FIGURA 2.18 TOPOGRAFIA DE ASKERVEIN DIGITALIZADA NO CFX.....	59
FIGURA 2.19 RESULTADOS DO MODELO NUMÉRICO CLA [VALLE, 2005] E OS VALORES MEDIDOS ASKERVEIN [TAYLOR P.A. AND TEUNISSEN, H.W., 1983]. ....	60
FIGURA 2.20 VISUALIZAÇÃO DIGITAL DA REGIÃO DA ACURUÍ-MG. ....	61
FIGURA 2.21 VISUALIZAÇÃO DA TORRE DE MEDIÇÃO DO VENTO QUE ESTÁ PRÓXIMA A UMA LINHA AÉREA NA REGIÃO DE ACURUÍ-MG.....	61

FIGURA 2.22 - (A) MALHA DIGITALIZADA DA REGIÃO DE ACURUI-MG, (B) AMPLIAÇÃO DA MALHA E (C) RESULTADO DOS VETORES DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO. ....	62
FIGURA 2.23 SIMULAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADE DO VENTO EM ACURUI-MG (PONTOS 1, 4 E 6). ....	63
FIGURA 2.24 VALORES MÉDIOS HORÁRIOS DA VELOCIDADE DO VENTO MEDIDOS NA REGIÃO DA ACURUI-MG. ....	64
FIGURA 2.25 MÉDIA DAS VELOCIDADES MÉDIAS DIÁRIAS DA VELOCIDADE DO VENTO NA REGIÃO DA ACURUI-MG. ....	65
FIGURA 2.26 VALORES MÉDIOS DIÁRIOS DA VELOCIDADE DO VENTO EM ACURUI-MG. ....	65
FIGURA 3.1 DOMÍNIO DE SIMULAÇÃO COM OS ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA DO VENTO. ....	72
FIGURA 3.2 PERFIL DO TERRENO E PLANTA DA LINHA AÉREA COM AS LOCALIZAÇÕES DOS VÃOS CRÍTICOS ELÉTRICOS – VCE (LINHA CHEIA). ....	73
FIGURA 3.3 VALORES EXPERIMENTAIS MÉDIOS DE VELOCIDADE DE VENTO E LOCALIZAÇÃO NA PLANTA DA LINHA AÉREA. ....	73
FIGURA 3.4 PERFIL E PLANTA COM A INTERSEÇÃO DO VÃO MAIS CRÍTICO DA LINHA AÉREA. ....	74
FIGURA 3.5 DIAGRAMA DO MODELO COMPUTACIONAL AMPCLA. ....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
FIGURA 4.1 REPRESENTAÇÃO DO PERFIL E PLANTA PLANO (PPP) DA LINHA HIPOTÉTICA. ....	82
FIGURA 4.2 REPRESENTAÇÃO DO PERFIL E PLANTA NÃO-PLANO (PPNP) ....	82
FIGURA 4.3 AMPACIDADE DETERMINÍSTICA CALCULADA PARA A O PROBLEMA PPP. ....	84
FIGURA 4.4 CURVAS AJUSTADAS LOG-NORMAL DO PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR VERSUS RISCO TÉRMICO. ....	85
FIGURA 4.5 REGIÃO DE DEFINIÇÃO DA AMPACIDADE ESTATÍSTICA EM FUNÇÃO DO RISCO TÉRMICO. ....	85
FIGURA 4.6 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DE AMPACIDADE OBTIDOS COM APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE CÁLCULO DETERMINÍSTICA E ESTATÍSTICA PARA AS REGIÕES PPP E PPNP. ....	90
FIGURA 4.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS VIA AMPCLA EM RELAÇÃO À AMPACIDADE DETERMINÍSTICA NO REGIME NORMAL (PPP E PPNP). ....	90
FIGURA 4.8 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS VIA AMPCLA EM RELAÇÃO À AMPACIDADE DETERMINÍSTICA NO REGIME DE EMERGÊNCIA (PPP E PPNP). ....	91
FIGURA 5.1 PERFIL E PLANTA DIGITAL DO CONDUTOR NA LINHA AÉREA 138 kV EM ESTUDO. ....	92
FIGURA 5.2 PERFIL E PLANTA ORIGINAL DE UM VÃO DA LINHA AÉREA 138 kV EM ESTUDO. ....	93
FIGURA 5.3 REGIÃO EXPERIMENTAL DE ACURUI-MG DIGITALIZADA, CONTENDO A LINHA AÉREA 138 kV. ....	94
FIGURA 5.4 TRECHO DA LINHA NA REGIÃO EXPERIMENTAL DE ACURUI-MG DIGITALIZADA. ....	95
FIGURA 5.5 VELOCIDADE DO VENTO NOS VÃOS DA LINHA AÉREA DE 138 kV. ....	99
FIGURA 5.6 DETERMINAÇÃO DOS VÃOS NÃO-DOMINADOS. ....	101
FIGURA 6.1 LOCALIZAÇÃO DO SÍTIO EXPERIMENTAL DE ACURUI-MG. ....	105
FIGURA 6.2 LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE VENTO E A LINHA AÉREA NO SÍTIO EXPERIMENTAL DE ACURUI-MG. ....	106
FIGURA 6.3 VISUALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE VELOCIDADE DE VENTO NO SÍTIO EXPERIMENTAL DE ACURUI-MG. ....	106
FIGURA 6.4 LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES POWER DONUT-2 NA REGIÃO DE ACURUI-MG. ....	107
FIGURA 6.5 LOCALIZAÇÃO DO SENSOR POWER DONUT-5106. ....	108
FIGURA 6.6 LOCALIZAÇÃO DO SENSOR POWER DONUT-5109. ....	108

FIGURA 6.7 DETALHE DA INSTALAÇÃO DO SENSOR POWER DONUT-5106 NO VÃO 50-51. ....	109
FIGURA 6.8 COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E SIMULADOS DAS ESTAÇÕES DE COLETA DE VELOCIDADE DO VENTO EM ACURUÍ-MG. A COLUNA EM AMARELO, REFERENTE À ESTAÇÃO NO. 2, IDENTIFICA A REFERÊNCIA UTILIZADA.....	111
FIGURA 6.9 VALORES SIMULADOS DE VELOCIDADE DO VENTO EM FUNÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO IMPOSTA PARA O VÃO 50. ....	113
FIGURA 6.10 VALORES SIMULADOS DE VELOCIDADE DO VENTO EM FUNÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO IMPOSTA PARA O VÃO 75. ....	113
FIGURA 6.11 COMPARAÇÃO ENTRE OS PERFIS MÉDIOS SIMULADOS PARA OS VÃOS 50 E 75 EM FUNÇÃO DA CONDIÇÃO DE CONTORNO IMPOSTA NA FRONTEIRA DA CLA. ....	114
FIGURA 6.12 COMPARAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS SIMULADOS ENTRE OS PERFIS MÉDIOS DE VELOCIDADE DE VENTO NOS VÃOS 50 E 75.....	114
FIGURA 6.13 VALORES DA TEMPERATURA DO CONDUTOR LINNET MONITORADOS NA LT 138 kV EM ACURUÍ-MG.....	115
FIGURA 6.14 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MÉDIOS DAS MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS DO CONDUTOR MONITORADAS NA LT 138 kV EM ACURUÍ-MG.....	116
FIGURA 6.15 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES MÁXIMOS DAS MÉDIAS HORÁRIAS DAS TEMPERATURAS DO CONDUTOR MONITORADAS NA LT 138 kV EM ACURUÍ-MG.....	116
FIGURA 6.16 MÉDIA DAS VELOCIDADES MÉDIA DIÁRIA DO VENTO NA REGIÃO DA ACURUÍ-MG. ....	117
FIGURA 6.17 VISUALIZAÇÃO EM PLANTA DAS ESTAÇÕES DE VENTO 3 E 5 NA REGIÃO DA ACURUÍ-MG.....	118
FIGURA 6.18 VISUALIZAÇÃO EM ELEVÇÃO DAS ESTAÇÕES DE VENTO 3 E 5 NA REGIÃO DA ACURUÍ-MG. ....	118
FIGURA 7.1 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE AMPACIDADE CALCULADOS UTILIZANDO O MÉTODO DETERMINÍSTICO E O ESTATÍSTICO, PARA REGIMES NORMAL E EM EMERGÊNCIA, EXTRAÍDOS DA TABELA 5.8. ....	123
FIGURA A. 1 FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE LOG-NOMAL A TRÊS PARÂMETROS (PDF). ....	132
FIGURA B. 1 PERFIL TÉRMICO PROBABILÍSTICO DO CONDUTOR TIPO LINNET. AMPACIDADE DE 1 PU E 1000 W/M <sup>2</sup> DE RADIAÇÃO SOLAR (VER APÊNDICE C).....	137
FIGURA B. 2 PERFIL TÉRMICO PROBABILÍSTICO DO CONDUTOR TIPO LINNET – AJUSTE NORMAL.....	138
FIGURA B. 3 PERFIL TÉRMICO PROBABILÍSTICO DO CONDUTOR TIPO LINNET – AJUSTE LOG-NORMAL-3P.....	138
FIGURA D. 1 DETALHES DA LT EXPERIMENTAL NOVA LIMA – BONSUCESSO DA CEMIG. ....	141
FIGURA D. 2 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NO PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR.....	141
FIGURA D. 3 DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA DAS TEMPERATURAS CALCULADA E MONITORADA NO CONDUTOR. ....	143
FIGURA D. 4 POSIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS NA LINHA.....	144
FIGURA D. 5 VISÃO ESPACIAL E PLANIFICADA DO PERFIL E PLANTA DA LINHA.....	144
FIGURA D. 6 PERFIS DE VELOCIDADE MÉDIA HORÁRIA DO VENTO (M/S).....	145
FIGURA D. 7 MÉDIA HORÁRIA DOS PERFIS DA TEMPERATURA AMBIENTE EM RELAÇÃO À ALTURA DO SOLO.....	145

FIGURA D. 8 AMPACIDADES CALCULADAS, MEDIDAS E OS VALORES MÁXIMOS REGISTRADOS.....	146
FIGURA E. 1 TELA INICIAL DO SISTEMA AMPCLA.....	148
FIGURA E. 2 TELA COM O RELACIONAMENTO DO PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR DO SISTEMA AMPCLA. ....	149
FIGURA E. 3 TELA COM O RELACIONAMENTO DO PERFIL RELACIONAL E MUDANÇA DE ESTADO DO CONDUTOR DO SISTEMA AMPCLA. ....	150
FIGURA E. 4 DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS CLIMATOLÓGICOS – NÚMERO DE OCORRÊNCIAS POR PERÍODO.....	151
FIGURA E. 5 CÁLCULO DO PERFIL TÉRMICO DE CONDUTOR - DADOS.....	151
FIGURA E. 6 CÁLCULO DO PERFIL TÉRMICO DE CONDUTOR - GRÁFICO. ....	152
FIGURA E. 7 CÁLCULO DOS MOMENTOS ESTATÍSTICOS DO PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR. ....	153
FIGURA E. 8 CÁLCULO DAS PDF DO PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR – DADOS BRUTOS. ....	154
FIGURA E. 9 CÁLCULO DAS PDF DO PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR – AJUSTE NORMAL.....	155
FIGURA E. 10 CÁLCULO DAS PDF DO PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR – AJUSTE LOG-NORMAL.....	156
FIGURA E. 11 PERFIL DIGITAL DA LINHA EM REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA PLANIFICADA.....	157
FIGURA E. 12 CÁLCULO DA AMPACIDADE DETERMINÍSTICA.....	158
FIGURA E. 13 CÁLCULO DA AMPACIDADE PROBABILÍSTICA.....	159

## ***LISTA DE TABELAS***

TABELA 2.1 FAIXA DE VALORES PARA O COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ( $\alpha_s$ ) .....	30
TABELA 2.2 VALORES DA VELOCIDADE DO VENTO SEGUNDO OS DIFERENTES TIPOS DE CONVECÇÃO. ....	31
TABELA 2.3 FAIXA DE VALORES PARA OS COEFICIENTES DE EMISSIVIDADE E. ....	32
TABELA 2.4 EXEMPLO DE PARÂMETROS USADOS NO REGIME NORMAL (138 kV). ....	34
TABELA 2.5 EXEMPLO DE PARÂMETROS USADOS NO REGIME EM EMERGÊNCIA DE 138 kV. ....	35
TABELA 2.6 PROBABILIDADE CONJUNTA: CLASSES DE TEMPERATURA AMBIENTE(x) E CLASSES DE VELOCIDADE DO VENTO(y). ....	38
TABELA 2.7 CÁLCULO DE AMPACIDADE EM VALORES EM PU PARA O CONDUTOR TIPO LINNET EM UMA LINHA TÍPICA DE 138 kV. ....	42
TABELA 2.8 VALORES GERAIS DE RUGOSIDADE. ....	54
TABELA 2.9 VALORES GERAIS DO NÚMERO DE FROUDE E O ESTADO DA ATMOSFERA CORRESPONDENTE. ....	56
TABELA 2.10 CONDIÇÕES DE CONTORNO UTILIZADAS NO CFX PARA O MODELO SIMPLIFICADO [TRIFONOPOULOS AND BERGELES, 1992].....	56
TABELA 2.11 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DE CADA LOCAL DE MEDIÇÃO EM ACURUÍ-MG. ....	62
TABELA 3.1 PARÂMETROS DA METODOLOGIA LINEAMPS (DEB, 2000).....	69
TABELA 3.2 PARÂMETROS DA METODOLOGIA AMPCLA.....	71
TABELA 3.3 DIAGRAMA DO MODELO COMPUTACIONAL AMPCLA. ....	76
TABELA 4.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA O PROBLEMA PPP.....	84
TABELA 4.2 AMPACIDADE DETERMINÍSTICA EM PU.....	87
TABELA 4.3 RESULTADOS OBTIDOS PARA O PROBLEMA (PPNP). ....	87
TABELA 4.4 COMPARAÇÃO DOS VALORES CALCULADOS DAS AMPACIDADES EM PU – PROBLEMAS PPP E PPNP.....	89
TABELA 5.1 PAR CLIMATOLÓGICO (VELOCIDADE DE VENTO E TEMPERATURA AMBIENTE) DA ESTAÇÃO OURO PRETO 1 (TOTAL 2730 REGISTROS HORÁRIOS). ....	93
TABELA 5.2 RESULTADOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO DA CLA NO VÃO 1.....	97
TABELA 5.3 RESULTADOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO DA CLA NA REGIÃO DE ACURUÍ-MG NOS PONTOS DE LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES CLIMATOLÓGICAS. ....	97
TABELA 5.4 RESULTADOS OBTIDOS COM A SIMULAÇÃO DA ABL. ....	98
TABELA 5.5 VÃOS CRÍTICOS CLIMATOLÓGICOS - VCC. ....	99
TABELA 5.6 VÃOS CRÍTICOS ELÉTRICO – VCE IDENTIFICADOS NO PERFIL E PLANTA ORIGINAL DA LINHA (VER FIGURA 5.2). ....	100
TABELA 5.7 RESULTADOS OBTIDOS PARA O PROBLEMA PPP. ....	101
TABELA 5.8 RESULTADOS OBTIDOS PARA O PROBLEMA PPNP.....	102
TABELA 5.9 RESULTADOS FINAIS PARA O PROBLEMA REAL.....	102

TABELA 6.1 COMPARAÇÃO ENTRE ALGUMAS CLASSES DE AMPLITUDE DE VELOCIDADE DO VENTO SIMULADAS E AS SUAS MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS CORRESPONDENTES EM ACURUI-MG.....	110
TABELA 6.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS AMPLITUDES DE VELOCIDADE DE VENTO SIMULADAS PARA OS VÃOS 50 E 75...	112
TABELA B. 1 PROBABILIDADE CONJUNTA DAS VARIÁVEIS ALEATÓRIAS: VELOCIDADE DO VENTO( $y$ ) E TEMPERATURA AMBIENTE( $x$ ) .....	135
TABELA B. 2 NÚMERO DE OCORRÊNCIAS: VELOCIDADE DO VENTO E TEMPERATURA AMBIENTE. ....	136
TABELA B.3 FREQUÊNCIA RELATIVA PERCENTUAL DOS PARES DE VELOCIDADE DO VENTO E TEMPERATURA AMBIENTE APRESENTADOS NA TABELA B.2. ....	136
TABELA B. 4 PERFIL TÉRMICO DO CONDUTOR ( $^{\circ}$ C) CALCULADO PARA O PAR <i>CENTRO DA CLASSE</i> DE VELOCIDADE DO VENTO E TEMPERATURA AMBIENTE APRESENTADOS NA TABELA B.2. ....	136
TABELA B. 5 PDF DA TEMPERATURA DO CONDUTOR ( $^{\circ}$ C) VIA DADOS BRUTOS E PARA UMA AMPACIDADE CONHECIDA. ....	137
TABELA C. 1 TABELA DO PERFIL TÉRMICO SIMULADO DO CONDUTOR. ....	139

# ***1 Introdução***

O uso de condutores aéreos para transmissão de energia elétrica é largamente utilizado em todo o mundo. Uma alternativa revolucionária como, por exemplo, o supercondutor em material cerâmico, ainda está em sua fase preliminar de aplicação devido principalmente ao elevado investimento envolvido nessa nova tecnologia.

Enquanto essa revolução tecnológica não estiver economicamente viável e disponível em larga escala industrial, a pesquisa por aperfeiçoamentos das linhas aéreas tradicionais continuará a receber investimentos nas áreas de distribuição e transmissão de energia.

Na prática, não é uma tarefa simples aperfeiçoar projetos elétricos nas áreas de distribuição e transmissão, uma vez que, os rendimentos elétricos desses projetos já são elevados.

Nesse cenário, será apresentado o desenvolvimento de uma nova metodologia de cálculo de ampacidade de linha aérea - AmpCLA, que é o objetivo geral dessa tese. Esta metodologia busca contribuir com a segurança da operação e com a possibilidade real de maximizar a capacidade de transmissão das linhas aéreas, devido à utilização de valores de velocidade do vento mais realistas para o cálculo da ampacidade.

O fato é que, historicamente as linhas aéreas foram sendo implantadas com foco principal na escolha ótima do tipo do condutor em função das características mecânicas e elétricas, mas sem considerar os estudos mais aprofundados sobre sua capacidade térmica.

A ampacidade, [MORGAN, 1982], é um termo técnico utilizado para definir a capacidade da linha em transportar energia elétrica, limitada pelo aquecimento dos seus condutores, o qual é devido à corrente elétrica associada à carga alimentada e às condições climatológicas, como velocidade e direção do vento, temperatura ambiente e a radiação solar.

Atualmente, o aumento concomitante de segurança e de ampacidade tem sido objeto de diversas pesquisas no setor elétrico [DRAGER, 2008], [ZHANG, P., 2008], [G.BRUNO, 2008] e [JAUFER, 2008]. Outro fator técnico que tem despertado interesse na exploração máxima da

capacidade das linhas aéreas em operação está relacionado principalmente à dificuldade de expansão de novos corredores para novas linhas. A sociedade atual impõe restrições contra a expansão das linhas aéreas através da necessidade de preservação ambiental e pela poluição visual, o que dificulta a realização de novos projetos.

Durante os últimos anos, estudos foram desenvolvidos objetivando conhecer melhor a modelagem e os parâmetros climatológicos utilizados no cálculo da ampacidade. Porém, ainda são tratados de forma limitada pelos projetistas de linhas aéreas, uma vez que, o estudo mais sofisticado sobre a variação climatológica, ao longo de todos os vãos, ainda não representa a prática utilizada nas metodologias de cálculo de ampacidade.

No Brasil, o desenvolvimento do tema pode ser facilmente observado através dos estudos e pesquisas já realizados conforme [REN-191/ONS, 2005], [BEZERRA, 1987], [MOREIRA, 2006], [IGNÁCIO, 2005], [NASCIMENTO, 2004], [FT DE AMPACIDADE, 1992], [FT DE AMPACIDADE, 1993], [DINIZ, 1995], [FURTADO, 1997-a], [FURTADO, 1997-b] e [MENEZES, 2001]. Entretanto, estes estudos ainda não conseguiram validar cientificamente o uso de uma metodologia de cálculo de ampacidade alternativa, que leve em consideração as alterações climatológicas ao longo de todos os vãos de uma dada linha aérea, em comparação à metodologia determinística que é largamente utilizada pela literatura atual [NBR-5422, 1985], [CIGRE Task Force B2.12.6, 2005] e [IEEE P738/D1, 2007].

A vantagem fundamental na busca de uma metodologia de cálculo da ampacidade mais realista está relacionada com a possibilidade de se aumentar a capacidade de transmissão nas linhas aéreas existentes [D. SÁNCHEZ, 2004] e [DOUGLASS, D.A., 2000]. Para isso, seria necessário aprimorar a avaliação dos parâmetros necessários ao modelo matemático para o cálculo da ampacidade e a metodologia propriamente dita. Para as novas linhas aéreas, as vantagens são poder explorar melhor a capacidade da linha e possivelmente reduzir o investimento na realização do projeto.

Atualmente, existem soluções viáveis para aumentar a ampacidade das linhas aéreas, como por exemplo:

- monitoramento em tempo real do condutor, que ainda é onerosa, uma vez que seria preciso uma supervisão ampla em vários vãos por desconhecer como é a variação do perfil térmico do condutor ao longo de toda linha aérea.
- técnicas de reestricamento, recondutoramento e reisolamento são também soluções plausíveis, mas de elevado investimento tendo em vista o custo dos desligamentos das linhas para a realização das obras, aquisição de novos materiais (condutor, isoladores e ferragens) e outras necessidades de projeto como inserção e reforço das estruturas.
- construção de novas linhas ou transformação de linhas de corrente alternada-CA para corrente contínua-CC, mas também de elevado custo financeiro devido às estações inversoras.

Todas essas possibilidades são viáveis quando requeridas, mas são soluções complexas, onerosas e morosas. Uma solução recomendável para aumentar a capacidade das linhas aéreas em operação é reavaliar a metodologia de cálculo da ampacidade utilizada. Esta reavaliação pode abrir uma janela real de ganho em segurança operacional e de aumento de capacidade, sem alterações significativas nos projetos dessas instalações.

Um novo conceito já implantado em alguns países da Europa, como na Itália [G.BRUNO, 2008], é o cálculo estatístico ou probabilístico da ampacidade. A principal barreira técnica dessa metodologia em aplicações reais está baseada na dificuldade de se obter informações precisas das principais variáveis da climatologia de uma determinada região, e de se estabelecer valores desses parâmetros na fase de projeto, os quais afetam diretamente o cálculo do perfil térmico do condutor em toda a extensão da linha aérea.

A validação científica do cálculo da ampacidade estatística conduz a um aumento de segurança operacional em função da inclusão de conceito do risco térmico envolvido na operação diária das linhas aéreas. Em algumas regiões de clima favorável ao resfriamento do condutor, um aumento considerável de 10% na ampacidade é possível de ser obtido, quando comparados ao método determinístico de cálculo [NBR-5422, 1985], [CIGRE TASK FORCE, 2005] e [IEEE P738/D1, 2007]. Essa melhoria obtida pelo método de cálculo de

ampacidade estatística é devida basicamente à exploração de condições climatológicas mais realistas do que aquelas utilizadas no cálculo determinístico. Mas, a restrição para a aplicação segura da metodologia estatística esbarra na mesma restrição do método determinístico de não se conhecer como é a variação climatológica ao longo de todos os vãos da linha aérea.

## ***1.1 Objetivo Geral***

Neste contexto, o objetivo geral dessa tese é analisar a influência da regionalização da amplitude da velocidade do vento na capacidade de transmissão das linhas aéreas, e propor a partir dessa base de informação uma nova metodologia para efetuar o cálculo da ampacidade.

Para isso, o estudo da influência da regionalização climatológica via estudo da camada limite da atmosfera, ao longo de todos os vãos de uma linha aérea, foi pesquisado na região experimental de Acuruí-MG, com aproximadamente 900 km<sup>2</sup> de área. Essa região foi simulada e monitorada em tempo real por meio da instalação de estações de medição da amplitude do vento e de sensores de medição do perfil térmico do condutor.

Assim, através das informações geradas em Acuruí-MG foi possível desenvolver e validar o uso de uma nova metodologia de cálculo da ampacidade, que leva em conta a variação climatológica ao longo de todos os vãos da linha aérea. Essa metodologia foi nomeada de metodologia AmpCLA “Metodologia de Cálculo da Ampacidade de Linhas Aéreas Considerando o Efeito da Camada Limite da Atmosfera”.

## ***1.2 Objetivos Específicos***

Os objetivos específicos dessa tese são vários. Dentre os mais importantes estão: (i) apresentação dos resultados experimentais relevantes e inovadores que foram obtidos durante a fase de desenvolvimento da metodologia de cálculo da ampacidade – AmpCLA, (ii) o desenvolvimento de uma modelagem computacional para suportar a metodologia

AmpCLA, e naturalmente, (iii) a formação de pessoal qualificado nesta área de conhecimento.

### ***1.3 Contribuições Científicas***

A tese a ser apresentada neste documento culminou com as seguintes contribuições científicas:

- nova metodologia de cálculo da ampacidade - AmpCLA que leva em consideração a variação climatológica ao longo de todos os vãos da linha aérea.
- uso de banco de dados com as amplitudes de velocidade de vento simuladas em sistema computacional em volume finito – Ansys CFX [CFX 5.5, 2002], em modelagem de microescala da CLA, e aplicado ao problema de ampacidade de linhas aéreas.
- identificação dos vãos críticos da linha aérea obtida por meio dos dados simulados da velocidade do vento na camada limite da atmosfera e pelo cálculo da distância elétrica vertical do condutor.

### ***1.4 Publicações Geradas***

Alem das contribuições científicas obtidas, geraram-se as seguintes publicações:

- Do Nascimento, C.A.M. and Vasconcelos, J.A. - AmpABL - Methodology of Ampacity Calculation in Overhead Line Considering the Effect of Atmospheric Boundary Layer – (IEEE Power Delivery submission – May,(2009).
- Do Nascimento, C.A.M., Castro, A.C., Lessa, M. F. V. e Vasconcelos, J.A. - “Uso de Tecnologia Wireless para Controle e Supervisão de Informações em Tempo Real na Operação de Linhas Aéreas de Energia”, XX SNPTEE – Recife, (2009).
- Do Nascimento, C.A.M., Castro, A.C., Paulino, Matoso, A. S., H. M., Gomes Jr, M. D., Mariano, S. L. S., Lessa, M. F. V., França, G. A. C. e Vasconcelos, J. A. -

“Controle e monitoramento de temperatura de condutores em linhas áreas de alta tensão”, CBA – Juiz de Fora - UFJF, (2008).

- Do Nascimento, C.A.M. and Vasconcelos, J.A. “Short term rating assessment are often based on actual weather parameters.” - Cigre Session 2008, Technical Meeting “Increasing capacity of overhead lines”, special report for group B2 - Overhead Lines: Question 1.3 - Paris, France. 24 - 29 August, (2008).
- Do Nascimento, C.A.M., Valle, R.M. and Vasconcelos, J.A. – “While using real time monitoring systems, how should one determine the best spans to be instrumented and how many spans should be instrumented?” - Cigre Session 2008, Technical Meeting “Increasing capacity of overhead lines”, special report for group B2 - Overhead Lines: Question 1.6, Paris, France. 24 - 29 August, (2008).
- Do Nascimento, C.A.M. e Vasconcelos, J.A., “Análise Sistêmica da Ampacidade de Linhas Aéreas de Transmissão nas Abordagens Determinística e Estatística”, Décimo Segundo Encontro Regional Íbero-americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu-PR, (2007).
- Valle, R.M. e Do Nascimento, C.A.M., “Introdução do Estudo da Camada Limite da Atmosfera em Projetos de Linhas Aéreas de Transmissão”, XVIII – SNPTEE – Curitiba/PR-Brasil, (2005).

## ***1.5 Estrutura do Texto***

A revisão teórica e o conteúdo técnico dessa tese estão descritos resumidamente conforme a seguir:

**Capítulo 2** – Esse capítulo apresenta a revisão bibliográfica iniciando-se pela formulação clássica utilizada no cálculo da ampacidade. O objetivo é apresentar o cálculo do perfil térmico do condutor que define a corrente elétrica associada à temperatura de operação do condutor, e conseqüentemente, definir a ampacidade da linha aérea. O comportamento físico do perfil térmico do condutor irá definir o regime de operação da linha, isto é, regime

normal ou de emergência. Estes dois regimes são basicamente governados em função da corrente de operação da linha e da distância do condutor ao solo, a qual é definida pela mudança de estado do condutor (expansão térmica e esforço mecânico no condutor). Para definir os regimes de operação da linha aérea é necessário definir os métodos para cálculo da ampacidade. Os métodos estão divididos em quatro grupos: (i) método em regime permanente ou estático, (ii) método estatístico ou quase-dinâmico, (iii) método dinâmico, e (iv) método híbrido. Para o cálculo da ampacidade por método do grupo (ii) será necessário apresentar o conceito de momento estatístico para a geração de função de distribuição do perfil térmico do condutor. Os métodos dos grupos (iii e iv) não são analisados nesse trabalho. Para concluir o capítulo 2, serão introduzidos os conceitos básicos para o processamento numérico da camada limite da atmosfera.

**Capítulo 3** – Esse capítulo apresenta primeiramente a metodologia LineAmps, proposta por Deb (DEB, 2000). Esta técnica foi utilizada como base para o desenvolvimento da nova metodologia AmpCLA, proposta nesta tese. Em seguida, a metodologia AmpCLA é apresentada juntamente com a discussão das principais diferenças de modelagem entre a LineAmps e AmpCLA. E por último, a modelagem computacional da AmpCLA é discutida.

**Capítulo 4** – Esse capítulo apresenta a aplicação da metodologia AmpCLA em dois casos teóricos diferentes em relação às características da topografia do terreno, construídos para avaliação da ampacidade obtida com ambos os métodos determinístico e estatístico. No primeiro caso, considera-se um terreno plano e no segundo um terreno irregular. A partir dos resultados obtidos nesta análise foi possível propor um fator de correção para a ampacidade calculada pelo método estatístico com base em dados de velocidade do vento oriundos de uma estação climatológica próxima à linha de transmissão.

**Capítulo 5** – Esse capítulo apresenta a aplicação da metodologia AmpCLA em uma linha aérea real, em operação, usando a mesma base de comparação construída no capítulo 4, isto é, os cálculos de ampacidade pelos métodos determinístico e estatístico. A partir dos resultados práticos obtidos neste capítulo é possível validar o uso da metodologia AmpCLA, que é criteriosamente analisada no capítulo 6.

**Capítulo 6** – Esse capítulo apresenta a validação da nova metodologia AmpCLA levando em consideração os resultados obtidos e os valores medidos em uma linha real, em operação, na região de estudo experimental em Acuruí-MG.

**Capítulo 7** – Esse capítulo apresenta as análises dos diversos resultados obtidos com a metodologia AmpCLA.

**Capítulo 8** – Esse capítulo apresenta as conclusões e destaca as propostas de continuidade da pesquisa na área de ampacidade de linhas aéreas.

Por último, as informações complementares, como os apêndices, foram incluídas para melhorar o entendimento sobre o cálculo da ampacidade de linhas aéreas e para apresentação de resultados experimentais relevantes que contribuem e reforçam para os objetivos propostos nessa tese.

## ***2 Revisão Bibliográfica***

### ***2.1 Introdução***

A ampacidade de linha aéreas de energia é um termo técnico utilizado para definir a capacidade da linha em transportar energia elétrica, limitada pelo aquecimento dos seus condutores, o qual é devido à corrente elétrica associada à carga alimentada e às condições climatológicas no entorno dos condutores, como: velocidade e direção de vento, temperatura ambiente, radiação solar, dentre outras de menor influência [CIGRE TASK FORCE B2.12.6, 2005], [NEIL, 1999], [STEPHEN R., 2000] e [MORGAN, 1982].

Estudos sobre ampacidade estão no foco atual das pesquisas do setor elétrico em função dos seguintes fatores:

- aumento das restrições ambientais e de poluição visual, impostas pela sociedade moderna, para se construir novas linhas;
- exigências regulatórias para melhorar o nível de segurança operacional das linhas aéreas objetivando minimizar os riscos de acidentes e de perda de receita;
- aumento na geração de energia a partir de fontes renováveis que utilizam as linhas existentes como meio de transporte;
- aumento de intercâmbio entre os mercados de energia.

Esses fatores colocam o cálculo da ampacidade das linhas aéreas como tema central de inúmeras pesquisas no setor elétrico mundial [DRAGER, 2008], [G.BRUNO, 2008], [JAUFER, 2008] e [WEIBEL, 2006]. Durante os últimos anos, estudos foram desenvolvidos objetivando conhecer melhor a modelagem e os parâmetros para o cálculo da ampacidade.

No Brasil, pesquisas realizadas têm contribuído com o desenvolvimento do tema [BEZERRA, 1987], [MOREIRA, 2006], [FT DE AMPACIDADE, 1992], [FT DE AMPACIDADE, 1993], [DINIZ, 1995], [FURTADO, 1997a], [FURTADO, 1997b] e [MENEZES, 2001]. Validações experimentais

em laboratório e em campo também foram realizadas, respectivamente conforme [NASCIMENTO, 2004] e [IGNÁCIO, 2005].

Esse capítulo apresenta a base de conhecimento sobre o cálculo da ampacidade por meio da formulação clássica em regime permanente, que é o método largamente utilizado no setor de transmissão. O regime transiente será apenas mencionado por meio de sua formulação clássica e que não faz parte do foco dessa tese [DOUGLASS, D.A., 1989], [HOLBERT, K.E., 2000] e [YAKILI, 2000].

A ampacidade da linha aérea, baseada na formulação clássica do cálculo do perfil térmico do condutor em regime permanente, é dada como sendo uma corrente elétrica máxima constante associada a uma determinada temperatura de operação do condutor.

A partir do perfil térmico de operação do condutor definem-se basicamente dois regimes de operação da linha aérea: regime normal e de emergência. Esses dois regimes estão condicionados a quatro fatores fundamentais:

- características elétrica e mecânica, do condutor da linha aérea, que por sua vez dependem diretamente do diâmetro do condutor;
- limite térmico de operação do condutor que corresponde à distância elétrica do condutor ao solo para segurança operacional, que é definida em normalização técnica pertinente [NBR 5422, 1985];
- potência elétrica a ser transportada;
- limite térmico máximo do condutor, isto é, evitar perda da vida útil das camadas de alumínio devido à elevação excessiva da temperatura do condutor [NASCIMENTO, 1999].

A partir desses fatores é possível selecionar um condutor com as características elétricas e com perfil térmico que atendam a um determinado projeto, supondo que não existam alterações climáticas significativas ao longo de todos os vãos da linha aérea.

Por outro lado, quando existir uma variação climática considerável ao longo das linhas aéreas [Do NASCIMENTO, 2008a], [Do NASCIMENTO, 2008b], [Do NASCIMENTO, 2008c] e

[Do NASCIMENTO, 2007], como deveriam ser definidos os parâmetros climatológicos em função de suas variações espaciais e temporais pelos modelos de cálculo de ampacidade considerando todos os vãos da linha aérea?

Dessa forma, a definição desses parâmetros climatológicos ainda é um problema complexo e sem solução na literatura.

## **2.2 Formulação Clássica – Regime Permanente**

A temperatura de operação dos condutores da linha aérea normalmente é calculada, em regime permanente, utilizando a seguinte equação de equilíbrio [MORGAN, 1982]:

$$P_J + P_M + P_S + k_I P_I = P_R + P_C + P_V \quad (2.1)$$

onde:

$P_J$	Taxa de ganho de calor por efeito Joule por unidade de comprimento	(W/m)
$P_M$	Taxa de ganho de calor por efeito ferro-magnético por unidade de comprimento	(W/m)
$P_S$	Taxa de ganho de calor por radiação solar por unidade de comprimento	(W/m)
$P_I$	Taxa de ganho de calor por efeito corona por unidade de comprimento	(W/m)
$P_R$	Taxa de perda de calor por radiação por unidade de comprimento	(W/m)
$P_C$	Taxa de perda de calor por convecção por unidade de comprimento	(W/m)
$P_V$	Taxa de perda de calor por vaporização por unidade de comprimento	(W/m)
$K_I$	Fator de ionização	(adimensional)

### **2.2.1 Capacidade Térmica em Regime Permanente (Steady-state thermal rating)**

A IEEE Std 738™-2006 define a Capacidade Térmica em Regime Permanente como sendo “a corrente elétrica constante para a qual a temperatura do condutor é igual à temperatura

máxima permitida para condições atmosféricas especificadas e para características do condutor sob a suposição de que o condutor se encontra em equilíbrio térmico”.<sup>1</sup>

Considerando na equação (2.1) apenas os termos mais significativos, isto é, desprezando as contribuições de  $P_M$ ,  $P_I$  e  $P_V$ , obtém-se:

$$P_J + P_S = P_R + P_C \quad (2.2)$$

ou

$$R(T_C)I^2 + P_S = P_R + P_C \quad (2.3)$$

Logo,

$$I = \sqrt{\frac{P_R + P_C - P_S}{R(T_C)}} \quad (2.4)$$

A corrente elétrica em regime permanente pode ser determinada simplesmente avaliando a equação (2.4), obtida a partir de (2.3), se se conhece a temperatura do condutor ( $T_c$ ), a sua resistência elétrica na temperatura  $T_c$  ( $R(T_c)$ ), e os parâmetros climatológicos ( $V$ ,  $T_a$ , etc.) em regime permanente, pois, com o conhecimento destes parâmetros, se pode determinar as perdas de calor devido à convecção e irradiação ( $P_c$  e  $P_r$ ), e o ganho de calor por radiação solar ( $P_s$ ).

Embora o cálculo possa ser realizado para qualquer temperatura do condutor e condições climatológicas, uma temperatura do condutor máxima permitida (exemplo 75 °C a 150 °C) e condições climatológicas “conservadoras” (exemplo, velocidade do vento entre 0,6 m/s até 1,2 m/s, temperatura ambiente no verão entre 30 °C a 45 °C) são frequentemente usadas para calcular a capacidade térmica em regime permanente.

---

<sup>1</sup> **Steady-state thermal rating:** The constant electrical current that would yield the maximum allowable conductor temperature for specified weather conditions and conductor characteristics under the assumption that the conductor is in thermal equilibrium (steady state).

### 2.2.2 Temperatura do Condutor em Regime Permanente

As taxas de perda de calor por convecção e radiação não são linearmente dependentes da temperatura do condutor, assim, a equação de equilíbrio térmico (2.2) pode ser resolvida para determinar a temperatura do condutor em termos da corrente e variáveis climáticas através de um processo iterativo, isto é, dada a corrente que circula pelo condutor, segue-se os seguintes passos:

- a) Assume-se uma temperatura inicial para uma corrente requerida do condutor e um dado erro de aproximação.
- b) Calculam-se as taxas de perdas de calor por convecção e irradiação e as taxas de ganho de calor por radiação solar e por efeito Joule.
- c) Calcula-se a corrente do condutor para esta temperatura inicial.
- d) Comparam-se os valores da corrente calculada com a corrente requerida que circula no condutor.
  - Se a diferença entre as correntes é menor que o erro assumido, pára-se o processo e a temperatura atual é a solução procurada.
  - Se a diferença entre as correntes é maior que o erro assumido, a temperatura inicial do condutor é então aumentada se o valor da corrente calculada é inferior ao valor da corrente do condutor. Caso contrário a temperatura é diminuída.
- e) Retorna-se ao passo b.

### 2.3 Formulação Regime Dinâmico

O regime dinâmico é sucintamente apresentado neste capítulo, uma vez que a metodologia AmpCLA utiliza o modelo de regime permanente descrito no item 2.2. No regime dinâmico, o fenômeno termodinâmico, regido pela equação de difusão (2.5), deve ser considerado na sua formulação.

$$\nabla^2 T + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

Em (2.5),  $\alpha$  é a difusão térmica e é dada por  $\alpha = \frac{k}{\gamma c_p}$  ( $m^2 / s$ ). Os novos parâmetros

introduzidos acima são:

T	Temperatura	(°C)
q	Taxa de calor por unidade de volume	(W / m <sup>3</sup> )

k	Condutividade térmica do condutor	(W / m °C)
t	Tempo	(s)
$\gamma$	Densidade de massa	(kg / m <sup>3</sup> )
$c_p$	Calor específico	(W . s / kg °C)

Por meio de manipulação algébrica, é possível mostrar que (2.5) se resume a (2.6), que por sua vez tem como solução (2.7), desde que efeitos menos relevantes, tais como os aquecimentos devido a fenômenos ferromagnéticos, ionização, evaporação, entre outros, sejam desconsiderados. E ainda que se considerem somente os efeitos preponderantes, tais como a variação da temperatura do filme do condutor no tempo, o efeito Joule e a radiação solar, como fontes de calor, e como perdas de calor para o meio circundante a convecção e irradiação na superfície do condutor [MORGAN, 1982], [ELECTRA-144,1992] e [ELECTRA-174,1992].

$$M c_p \frac{dT_{av}}{dt} = P_J + P_S + P_M - P_R - P_C \quad (2.6)$$

Em (2.6), os novos parâmetros introduzidos são:

M	Densidade linear de massa do condutor	(Kg / m)
$T_{AV}=(T_C + T_S)/2$	Temperatura média do condutor	(°C)
$T_C$	Temperatura do núcleo do condutor	(°C)
$T_S$	Temperatura superficial do condutor	(°C)

Através da escolha de um passo de tempo adequado ( $dt=\Delta t$ ), pode-se assumir a solução da integração da equação (2.6) por (2.7) [DEB, 2000]:

$$T_{av} = \sum_0^t \frac{(P_J + P_S + P_M - P_R - P_C) \Delta t}{M c_p} + T_I \quad (2.7)$$

Em (2.7),  $T_I$  é a temperatura inicial do condutor em °C.

## **2.4 Modelo Matemático para o Cálculo das Taxas de Ganho e Perda de Calor por Unidade de Comprimento**

Conforme já mencionado no item 2.2.1, no balanço térmico do condutor, as taxas de ganho de calor devido aos fenômenos ferromagnéticos ( $P_M$ ), à ionização (corona) ( $P_I$ ) e a taxa de perda de calor por vaporização ( $P_V$ ) são menos relevantes e, portanto, para simplificação do cálculo sob o regime permanente podem ser desconsideradas.

Apenas os termos preponderantes, taxas de ganho de calor por efeito Joule ( $P_J$ ) e por radiação solar ( $P_S$ ), e as taxas de perdas de calor por convecção ( $P_C$ ) e por radiação na superfície do condutor ( $P_R$ ), são considerados.

### **2.4.1 Taxa de Ganho de Calor por Efeito Joule ( $P_J$ )**

A taxa de ganho de calor gerado por efeito Joule, devido a uma corrente  $I$  é dada pela seguinte equação:

$$P_J = I^2 R(T_c) \quad (2.8)$$

Em (2.8),  $R(T_c)$  é a resistência do condutor na temperatura do condutor  $T_c$ , a qual pode ser avaliada pela seguinte expressão:

$$R(T_c) = K_J R_0 (1 + \alpha_0 T_m) \quad (2.9)$$

onde as grandezas intervenientes são:

$K_J$	Fator adimensional que leva em conta o aumento da resistência com a corrente alternada devido aos efeitos de superfície e de proximidade (para corrente contínua $K_J = 1$ )	(adimensional)
$R_0$	Resistência em corrente contínua por unidade de comprimento a uma temperatura de referência $T_o$	( $\Omega/m$ )
$\alpha_0$	Coeficiente de variação da resistência com a temperatura entre $T_o$ e $T_m$	( $1/^\circ C$ )
$T_m$	Variação de temperatura média da seção do condutor $(T_c + T_o)/2$	( $^\circ C$ )
$T_c$	Temperatura do condutor	( $^\circ C$ )
$T_o$	Temperatura de referência	( $^\circ C$ )

### 2.4.2 Taxa de Ganho de Calor por Radiação Solar ( $P_s$ )

A taxa de ganho de calor por radiação solar depende da latitude geográfica, da hora do dia e do dia do ano, conforme mostra a Figura 2.1. A taxa de ganho de calor por radiação solar é dada por (2.10) e sua formulação completa foi omitida neste texto, mas pode ser encontrada com mais detalhe em [MORGAN, 1982].

$$P_s = \alpha_s D \{ I_B [\text{sen}(\eta) + \pi/2 F \text{sen}(H_s) \cos^2(\xi/2)] + \pi/2 \cos^2(\xi/2) I_D (1+F) \} \quad (2.10)$$

Em (2.9), as grandezas intervenientes são:

$\alpha_s$	Coeficiente de absorção da superfície	(adimensional)
D	Diâmetro do condutor	(m)
$I_B$	Intensidade da radiação solar direta sobre uma superfície normal ao sol	(W/m <sup>2</sup> )
$\eta$	Ângulo entre o feixe de radiação solar e o eixo do condutor	(°)
F	Refletância da superfície do solo abaixo do condutor	(adimensional)
$H_s$	Altitude solar	(°)
$\xi$	Inclinação do condutor com a horizontal	(°)
$I_D$	Radiação difusa do céu sobre uma superfície horizontal	(W/m <sup>2</sup> )

onde:

$$\cos(\eta) = \text{sen}(H_s) \text{sen}(\xi) + \cos(H_s) \cos(\xi) \cos(\gamma_s - \gamma_L)$$

$$\text{sen}(H_s) = \text{sen}(\phi) \text{sen}(\delta_s) + \cos(\phi) \cos(\delta_s) \cos(s_z)$$

$$\text{sen}(\gamma_s) = \cos(\delta_s) \text{sen}(Z) / \cos(H_s)$$

$$\delta_s = \text{Declinação solar} = 23,4 \text{sen}[360 (284 + N^*)/365] \quad (^\circ)$$

$$\gamma_s = \text{Azimute solar} \quad (^\circ)$$

$$\gamma_L = \text{Azimute da Linha} \quad (^\circ)$$

$$\phi = \text{Latitude} \quad (^\circ)$$

$$\xi = \text{Inclinação do condutor com a horizontal} \quad (^\circ)$$

$$Z = \text{Hora angular do sol} \quad (\text{adimensional})$$

$$N^* = \text{Dia do ano} \quad (\text{adimensional})$$

$$F = \text{Grau de refletância ou albedo do solo} \quad (^\circ)$$

$$s_z = \quad (^\circ)$$

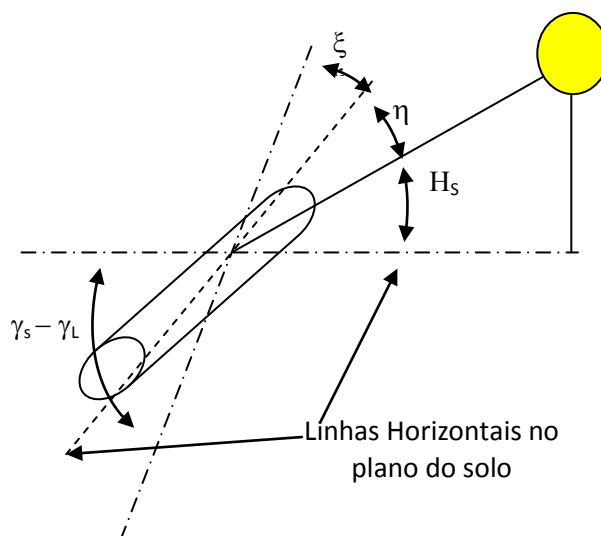


Figura 2.1 Disposição do condutor segundo a radiação solar [MORGAN, 1981]

### 2.4.2.1 Definição do Coeficiente de Absorção ( $\alpha_s$ )

O coeficiente de absorção  $\alpha_s$  avalia a taxa na qual a energia radiante é absorvida, por unidade de área da superfície, variando entre zero e um. Esse coeficiente pode variar segundo os valores sugeridos por [MORGAN, 1982] da Tabela 2.1, para condutor de Alumínio.

Tabela 2.1 Faixa de valores para o coeficiente de absorção ( $\alpha_s$ )

Superfície Lisa		Encordoadado	
Polida	0,13 – 0,33	Brilhosa	0,28 – 0,35
Fosca	0,24	Oxidada	0,55 – 0,60
Oxidada	0,43 – 0,65	Envelhecida (Rural)	0,38 – 0,48
Envelhecida	-	Envelhecida (Industrial)	0,78 – 0,93

### 2.4.3 Taxa de Perda de Calor por Convecção ( $P_c$ )

A taxa de perda por convecção é dada pela equação (2.11),

$$P_c = \pi \lambda_f (T_c - T_a) (Nu)_{D,f} \quad (2.11)$$

onde:

$\lambda_f$	Condutividade térmica do ar à temperatura do filme $T_f$	(W/(m°C))
D	Diâmetro do condutor	(m)
f	Propriedade de filme do ar tomada à $T_f$	(°C)
$T_f$	$t_f = (t_c + t_a) / 2$	(°C)

$T_c$	Temperatura superficial do condutor	(°C)
$T_a$	Temperatura ambiente	(°C)
$Nu$	Número de Nusselt	(adimensional)

No condutor, devido à velocidade do vento na sua superfície, surgem três tipos de convecções: natural, mista e forçada. A Tabela 2.2, sugerida por [MORGAN, 1982], mostra a faixa de valores da velocidade do vento para as quais os tipos de convecções se desenvolvem.

Tabela 2.2 Valores da velocidade do vento segundo os diferentes tipos de convecção.

Tipos de Convecções	Velocidade do Vento (m/s)
Natural	< 0,2
Mista	>= 0,2 e < 0,6
Forçada	>= 0,6

O resfriamento por convecção natural ocorre com velocidade do vento baixa. Nesta condição, o número de Nusselt é calculado segundo equação (2.12),

$$(Nu)_{D,f} = A_1 (Gr Pr)_{D,f}^{m_1} \quad (2.12)$$

onde:

$Gr$	Número de Grashof	(adimensional)
$Pr$	Número de Prandtl	(adimensional)
$A_1, m_1$	Constantes que definem as faixas dos números de Rayleigh	(adimensional)

Para o resfriamento por convecção forçada e velocidade do vento agindo perpendicularmente ao eixo de um condutor cilíndrico liso, o número de Nusselt é dado por (2.13),

$$(Nu)_{D,f} = B_2 (Re)_{D,f}^{n_2} \quad (2.13)$$

onde:

$Re$	Número de Reynolds	(adimensional)
$B_2$	Coeficiente em função do número de Reynolds	(adimensional)
$n_2$	Coeficiente em função do grau de rugosidade da superfície do condutor (adimensional)	
$Nu$	Número de Nusselt	(adimensional)

#### 2.4.4 Taxa de Perda de Calor por Radiação (Pr)

A taxa de perda de calor por radiação representa apenas uma pequena parte do calor total dissipado no meio ambiente. Isto justifica o fato de que, para os cálculos de ampacidade, esta taxa é, na literatura, avaliada de forma aproximada por (2.14).

$$Pr = \pi D \varepsilon \sigma_B [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (2.14)$$

onde as grandezas estão descritas como a seguir:

D	Diâmetro do condutor	(m)
$\varepsilon$	Coefficiente de emissividade total	(adimensional)
$\sigma_B$	Constante de Stefan-Boltzmann = $5.6697 \times 10^{-8}$	(W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
T <sub>c</sub>	Temperatura superficial do condutor	(°C)
T <sub>a</sub>	Temperatura ambiente	(°C)

##### 2.4.4.1 Definição do Coeficiente de Emissividade

A emissividade  $\varepsilon$  fornece a capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação a um corpo negro ( $\varepsilon=1$ ), a qual depende do tipo de material da superfície e de seu acabamento. O coeficiente  $\varepsilon$ , para condutor de alumínio pode variar segundo a Tabela 2.3 [MORGAN, 1982].

Tabela 2.3 Faixa de valores para os coeficientes de emissividade  $\varepsilon$ .

Lisa		Encordoado	
Polida	0,04 – 0,08	Brilhosa	0,27 – 0,36
Fosca	0,18 – 0,25	Oxidada	0,20 – 0,50
Oxidada	0,10 – 0,20	Envelhecida (rural)	0,35 – 0,65
Envelhecida	0,35 – 0,90	Envelhecida (Industrial)	0,62 – 0,95

## 2.5 Regimes de Operação na Ampacidade

Em geral os sistemas de transmissão operam sob dois regimes distintos de operação, o normal e o de emergência. Esses dois regimes são governados pela corrente de operação da linha e pela distância do condutor ao solo, a qual é definida pelo perfil térmico do condutor.

### 2.5.1 Regime Normal

O regime normal é definido no projeto eletromecânico da linha aérea através de duas temperaturas do condutor, conforme mostra a Figura 2.2. A temperatura ( $T_{NP}$ ) do condutor na parte superior da Figura 2.2 define a temperatura normal de projeto da linha. A temperatura ( $T_{LP}$ ) define a temperatura limite de projeto da linha. As temperaturas ( $T_{NP}$ ) e ( $T_{LP}$ ) correspondem, respectivamente, às distâncias do condutor ao solo ( $D_{NP}$ ) e ( $D_{LP}$ ) para o regime normal. A temperatura máxima de projeto ( $T_{MP}$ ) define a altura ( $D_{mP}$ ).

Dessa forma, o par ( $T_{NP}$ ) e ( $T_{LP}$ ) define a ampacidade em regime normal ( $I_N$ ), que por sua vez está associada à altura do condutor ao solo ( $D_{NP}$ ) e ( $D_{LP}$ ), valores esses, obtidos através da coordenação dos riscos térmicos  $\{(RT_{NP}), (RT_{LP})\}$  e de falha de isolamento  $\{(RF_{NP}), (RF_{LP})\}$ .

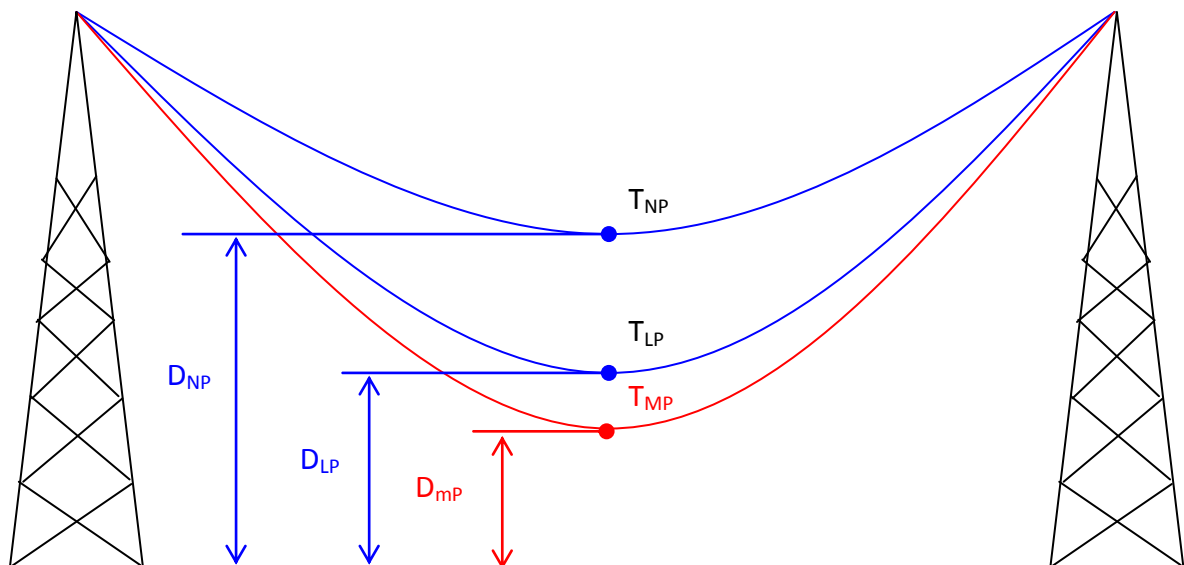


Figura 2.2 Relação entre as variáveis: temperatura do condutor ( $T$ ) e altura ou distância do condutor ao solo ( $D$ ).

Nota:

$T_{NP}$	Temperatura Normal de Projeto	( $^{\circ}\text{C}$ )
$D_{NP}$	Distância na Temperatura Normal de Projeto	(m)
$T_{LP}$	Temperatura Limite de Projeto	( $^{\circ}\text{C}$ )
$D_{LP}$	Distância Limite na Temperatura de Projeto	(m)
$T_{MP}$	Temperatura Máxima de Projeto	( $^{\circ}\text{C}$ )
$D_{mP}$	Distância Mínima na Temperatura Máxima de Projeto	(m)

A Tabela 2.4 mostra alguns valores típicos dos parâmetros de projeto para linhas aéreas em 138 kV que foram sugeridos por [FT AMPACIDADE, 1993]. Esses valores foram sugeridos de forma empírica.

Tabela 2.4 Exemplo de parâmetros usados no regime normal (138 kV).

Ampacidade	Normal de Projeto				Limite de Projeto			
Normal $I_N$	$T_{NP}$ 75 °C	$D_{NP}$ 7 m	$RT_{NP}$ 15%	$RF_{NP}$ $10^{-6}$	$T_{LP}$ 100 °C	$D_{LP}$ 6,25 m	$RT_{LP}$ 1%	$RF_{LP}$ $10^{-4}$

Nota:

- $RT_{NP}$  Risco térmico na temperatura normal de projeto
- $RF_{NP}$  Risco de falha da isolação na temperatura limite de projeto
- $RT_{LP}$  Risco térmico na temperatura limite de projeto
- $RF_{LP}$  Risco de falha da isolação na temperatura limite de projeto

### 2.5.2 Regime de Emergência

O processo de cálculo do regime de emergência é idêntico ao regime normal, com a ressalva de que são assumidos maiores riscos para permitir o aumento de ampacidade na emergência. Esse regime também é definido no projeto eletromecânico da linha através de duas temperaturas do condutor conforme foi mostrado na Figura 2.2. A temperatura do condutor ( $T_{LP}$ ) define a temperatura limite de projeto da linha. A temperatura ( $T_{MP}$ ) define a temperatura máxima do condutor da linha aérea. As temperaturas ( $T_{LP}$ ) e ( $T_{MP}$ ) correspondem respectivamente às distâncias do condutor ao solo ( $D_{LP}$ ) e ( $D_{MP}$ ).

Da mesma forma, o par ( $T_{LP}$ ,  $T_{MP}$ ) define uma ampacidade em regime de emergência ( $I_E$ ), que por sua vez está associada aos:

- (i) riscos térmicos ( $RT_{LP}$ ) e ( $RT_{MP}$ ) e
- (ii) riscos de falha ( $RF_{LP}$ ) e ( $RF_{MP}$ ), conforme mostra a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 Exemplo de parâmetros usados no regime em emergência de 138 kV.

Ampacidade	Limite de Projeto				Limite Máximo de Projeto			
Emergência	$T_{LP}$	$D_{LP}$	$RT_{LP}$	$RF_{LP}$	$T_{MP}$	$D_{MP}$	$RT_{MP}$	$RF_{MP}$
$I_E$	100 °C	6,25 m	5%	$10^{-4}$	120 °C	5,75 m	0,5%	$10^{-3}$

Nota:

- $RT_{LP}$  Risco térmico na temperatura limite de projeto
- $RF_{LP}$  Risco de falha da isolação na temperatura limite de projeto
- $RT_{MP}$  Risco térmico na temperatura máxima de projeto
- $RF_{MP}$  Risco de falha da isolação na temperatura máxima de projeto

## 2.6 Métodos de Cálculo de Ampacidade

Uma vez definidos os regimes de operação da linha aérea é necessário agora definir a modelagem matemática para o cálculo da ampacidade. Para isso é necessário observar que a ampacidade interage com as áreas de projeto e de operação da linha. A Figura 2.3 detalha uma visão sistêmica de como o método de cálculo de ampacidade pode influir no comportamento dos níveis de ampacidade e de segurança operacional.

Para distinguir os diferentes métodos de cálculo de ampacidade relativos às diversas ampacidades (Figura 2.3), será utilizada ao longo do texto a seguinte terminologia:

- Método Determinístico (ou estático) para o cálculo da ampacidade estática ou em regime permanente
- Método Estatístico (ou Quase-dinâmico) para o cálculo da ampacidade quando houver uma base de dados climatológicos que permita avaliar a distribuição estatística destes dados.
- Método Dinâmico para o cálculo da ampacidade quando houver variação temporal de alguma grandeza elétrica ou climatológica. Por exemplo, variação do valor da corrente elétrica, da temperatura do condutor, etc.
- Método Híbrido para o cálculo da ampacidade quando houver combinação dos dois últimos métodos

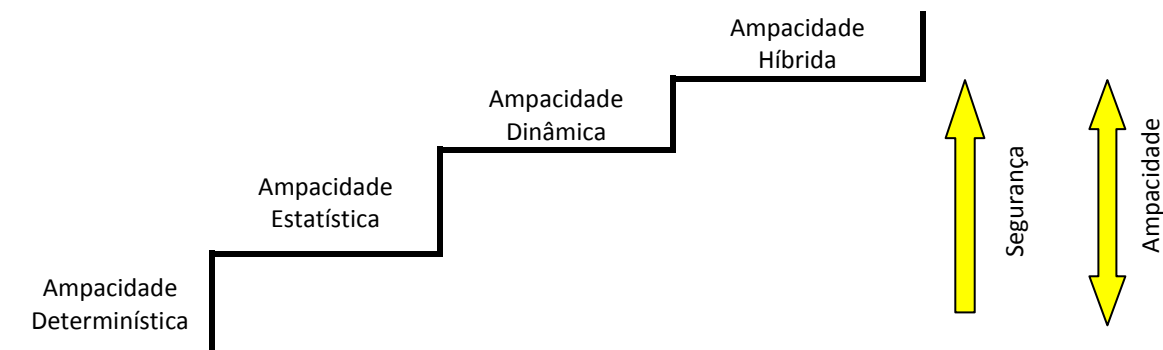


Figura 2.3 Visão sistêmica da modelagem de cálculo em função da segurança operacional e ampacidade das linhas aéreas.

De forma resumida, o método estático considera dados do clima conservadores durante o maior tempo de operação das linhas. Na literatura este método é também conhecido como método determinístico ou de regime permanente. O método estatístico trabalha com a base de conhecimento gerada a partir do histórico das informações climatológicas disponíveis de uma determinada região. Na literatura este método é também denominado de método probabilístico.

O método dinâmico trabalha conjuntamente com a supervisão em tempo real do clima e da altura condutor ao solo da linha e, finalmente, a técnica do método híbrido acopla os métodos, quase-dinâmico e dinâmico, em uma solução única para predição de ampacidade.

A seguir são apresentadas mais informações ilustrativas sobre os quatro métodos para cálculo da ampacidade.

### **2.6.1 Método Determinístico**

A metodologia estática para o cálculo da ampacidade é largamente utilizada na literatura. Esse método é obtido através da determinação de alguns parâmetros climatológicos conservadores, mas que em raras ocasiões não são seguros. A Figura 2.4 mostra um exemplo dos resultados obtidos através do processamento do método estático baseado na formulação de [MORGAN, 1982], sendo possível observar que:

- o perfil de temperatura do condutor possui correlação polinomial com a ampacidade;
- a velocidade do vento tem grande contribuição na variação do perfil térmico do condutor, e conseqüentemente na ampacidade.

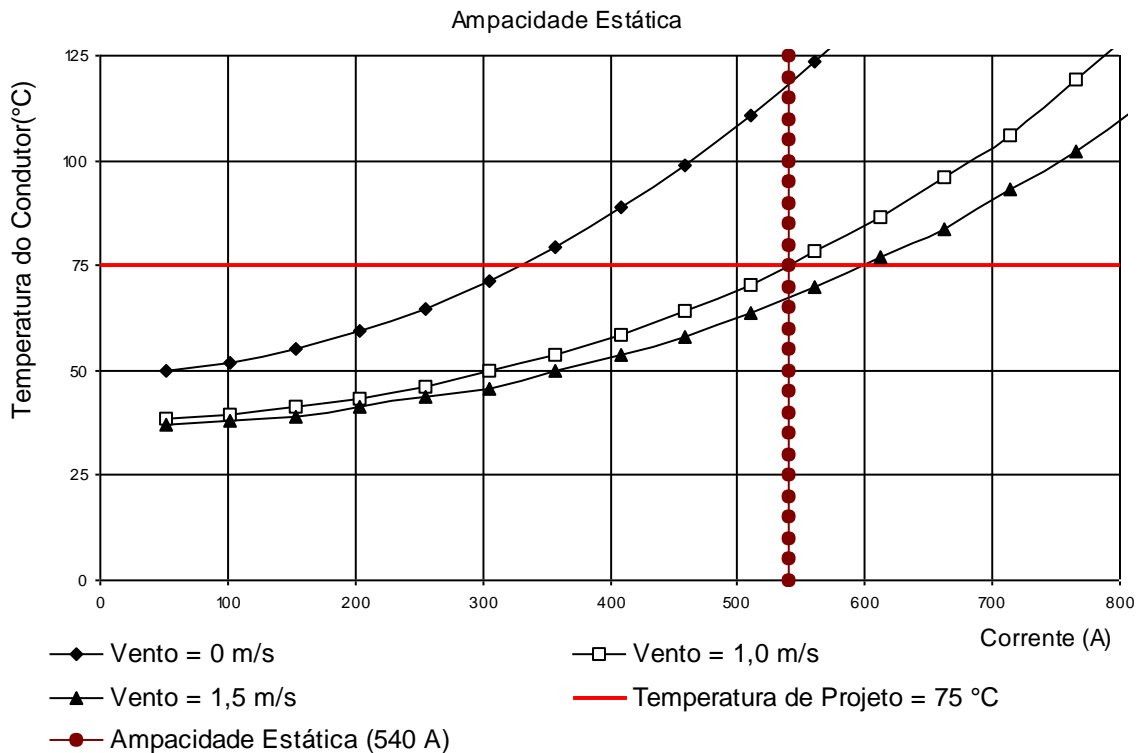


Figura 2.4 Perfil térmico do condutor em função da corrente elétrica, calculado pelo método estático para diferentes valores de velocidade de vento. Nestes cálculos, os seguintes parâmetros foram considerados: Temperatura Ambiente = 30°C, Ângulo de ataque do vento = 90°C e Radiação Solar = 1000 W/m<sup>2</sup>.

### 2.6.2 Método Estatístico

As variáveis climatológicas são de natureza probabilística e como tal deveriam ser consideradas na análise da ampacidade. O método estatístico, proposto em [ZHANG, P., 2008], [SIWY, 2006], [FT AMPACIDADE, 1993], [FT AMPACIDADE, 1992] e [SWATEK, 2004], difere do estático (ou regime permanente) pelo emprego de dados climatológicos obtidos de base histórica, os quais são analisados estatisticamente. A função densidade de probabilidade do perfil térmico do condutor é avaliada utilizando-se de uma base de dados climatológica e empregando o método de regime permanente.

O tratamento estatístico é realizado utilizando-se da base de dados, dos valores médios e de desvio padrão, das curvas da função densidade de probabilidade (pdf: acrônimo do termo *probability distribution function*), função distribuição cumulativa (cdf: acrônimo do termo *cumulative distribution function*) e do complemento da função distribuição cumulativa (1-cdf). A idéia é ao invés de definir valores constantes para as variáveis climatológicas conforme método estático o faz, realiza-se o estudo da distribuição climatológica para uma determinada região e um determinado período de amostragem. A (cdf) para o perfil térmico do condutor fornece a probabilidade da temperatura não exceder determinado valor de temperatura de referência ( $T_{ref}$ ). Obviamente, a probabilidade da temperatura do condutor exceder o valor  $T_{ref}$  é (1-cdf), o qual fornece na verdade o risco térmico de a temperatura do condutor exceder o valor de referência  $T_{ref}$ . As formulações matemáticas para o cálculo do risco térmico serão vistos no item 2.11.

A Tabela 2.6 mostra as variáveis climatológicas de maior interesse na ampacidade, isto é, a velocidade de vento e a temperatura ambiente. Estas variáveis influenciam o perfil térmico do condutor e como se sabe são variáveis aleatórias. Uma forma possível de realizar o tratamento estatístico é por meio da distribuição conjunta de probabilidade dessas duas variáveis climatológicas. A Figura 2.5 mostra um exemplo da distribuição conjunta da velocidade do vento e temperatura ambiente para uma base com o histórico de uma estação de coleta de dados climatológicos. A Figura 2.6 mostra o perfil de temperatura do condutor calculado conforme [MORGAN, 1982] na mesma base das informações climatológicas da Figura 2.5, para valores constantes de: corrente 1 PU, condutor LINNET 336 MCM, 1000 W/m<sup>2</sup> de radiação solar e 90° ângulo de ataque do vento em relação ao condutor.

Tabela 2.6 Probabilidade conjunta: classes de temperatura ambiente(x) e classes de velocidade do vento(y).

→Y				
X ↓	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>n</sub>	% Marginal
x <sub>1</sub>	f(x <sub>1</sub> , y <sub>1</sub> )	f(x <sub>1</sub> , y <sub>2</sub> )	f(x <sub>1</sub> , y <sub>n</sub> )	f <sub>x<sub>1</sub></sub> = Σ f(x <sub>1</sub> , y <sub>n</sub> )
x <sub>2</sub>	f(x <sub>2</sub> , y <sub>1</sub> )	f(x <sub>2</sub> , y <sub>2</sub> )	f(x <sub>2</sub> , y <sub>n</sub> )	f <sub>x<sub>2</sub></sub> = Σ f(x <sub>2</sub> , y <sub>n</sub> )
x <sub>m</sub>	f(x <sub>m</sub> , y <sub>1</sub> )	f(x <sub>m</sub> , y <sub>2</sub> )	f(x <sub>m</sub> , y <sub>n</sub> )	f <sub>x<sub>m</sub></sub> = Σ f(x <sub>m</sub> , y <sub>n</sub> )
% Marginal	f <sub>y<sub>1</sub></sub> = Σ f(x <sub>m</sub> , y <sub>1</sub> )	f <sub>y<sub>2</sub></sub> = Σ f(x <sub>m</sub> , y <sub>2</sub> )	f <sub>y<sub>n</sub></sub> = Σ f(x <sub>m</sub> , y <sub>n</sub> )	Σ f <sub>x<sub>m</sub></sub> = Σ f <sub>y<sub>m</sub></sub> = 1

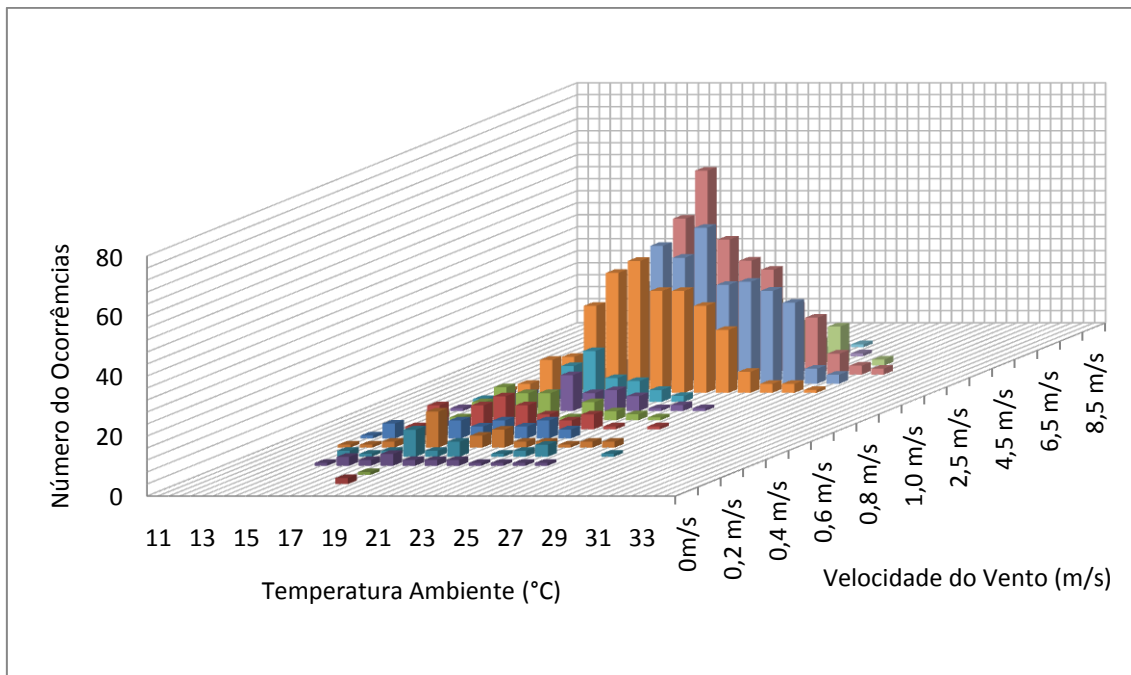


Figura 2.5 Distribuição das ocorrências conjuntas da velocidade do vento e temperatura ambiente.

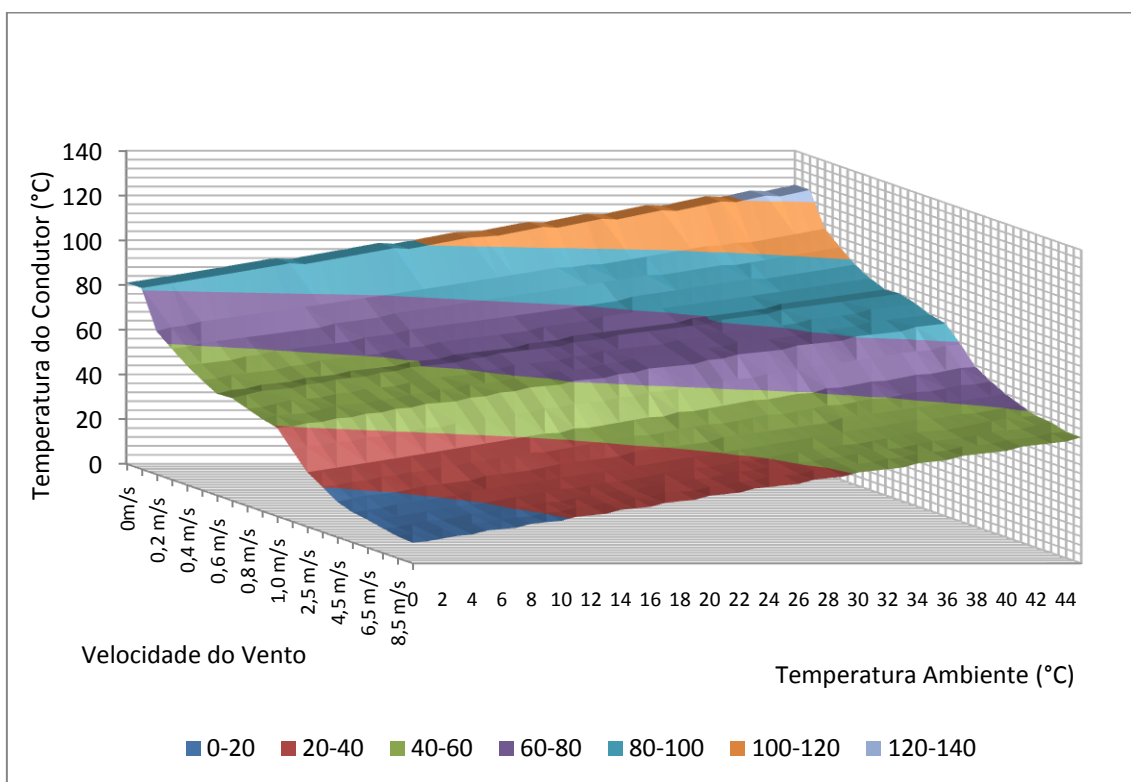


Figura 2.6 Distribuição do perfil de temperatura do condutor calculada para uma corrente de 1 PU em função da temperatura ambiente e da velocidade do vento (dados obtidos para um condutor tipo LINNET, com radiação solar igual a  $1000 \text{ W/m}^2$  e ângulo de ataque do vento em relação ao condutor de  $90^\circ$ ).

No processamento quase-dinâmico no problema de ampacidade, é preciso correlacionar o perfil de temperatura do condutor (Figura 2.6) com as informações do histórico da climatologia de uma determinada região (Figura 2.5). Essa correlação é sintetizada através de funções de distribuições de probabilidade (pdf's) do perfil térmico do condutor.

A partir dessas “pdf's” e de manipulações algébricas simples, geram-se as funções de distribuição cumulativa – “cdf's” e suas complementares, “1-cdf's”, que permitem avaliar o risco térmico do condutor de forma direta. O risco térmico é uma das variáveis necessárias para o cálculo do método quase-dinâmico.

A Figura 2.7 mostra um exemplo das curvas de risco térmico (ou “1-cdf”) para diversos valores de corrente elétrica (de 0,6 até 1,4 PU ) fluindo em um condutor tipo “LINNET”, para dados climatológicos oriundos de uma estação climatológica na condição “Verão-Dia”, conforme metodologia sugerida em [FT DE AMPACIDADE, 1993]. A partir dessas informações é possível encontrar qualquer curva de ampacidade probabilística, dado que a temperatura do condutor e o risco térmico são informações definidas pelo projeto da linha.

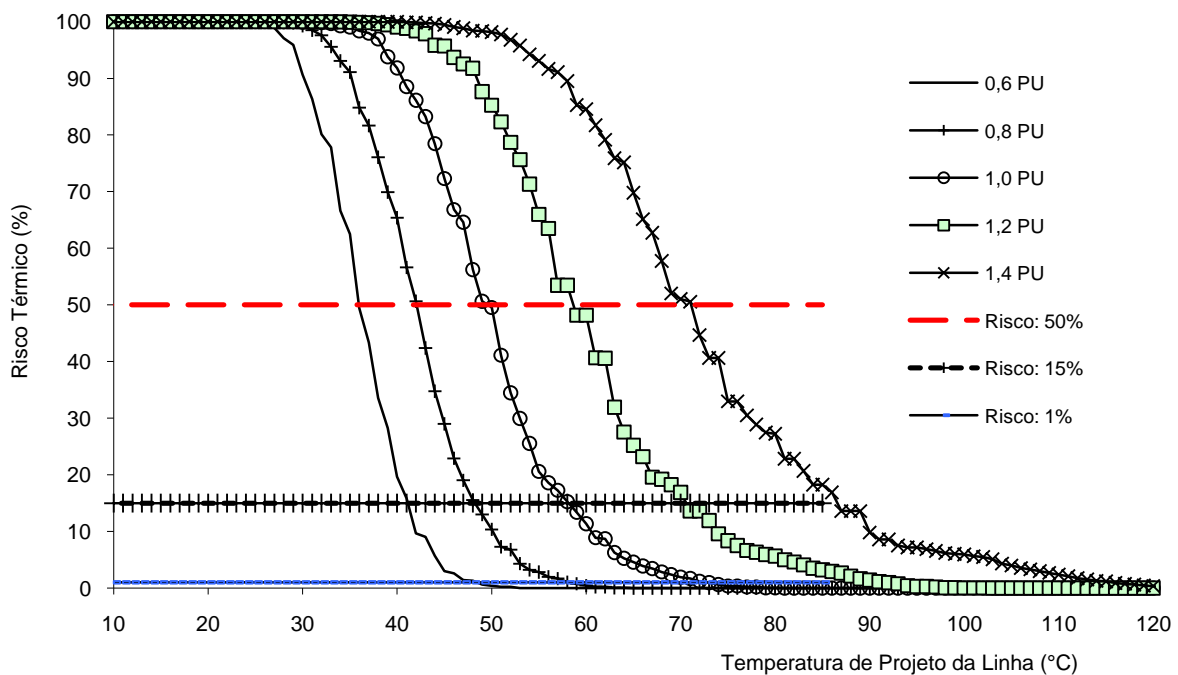


Figura 2.7 Risco térmico em função da temperatura do condutor para diferentes valores de corrente elétrica dados em PU.

### **2.6.3 Método Dinâmico**

O cálculo da ampacidade dinâmica segue os mesmos conceitos do método quase-dinâmico, mas com a possibilidade de se considerar os parâmetros das condições de contorno variáveis no tempo. Isto é, a equação de equilíbrio térmico passa a considerar o termo da variação temporal (2.5) e todas as outras parcelas que afetam o perfil térmico do condutor. Esta análise não será aprofundada neste texto por não ser parte do escopo dessa tese. Aos leitores interessados nesta discussão recomenda-se a leitura da referência [DEB, 2000].

### **2.6.4 Método Híbrido**

No método híbrido, a ampacidade é correlacionada com as grandezas históricas monitoradas em tempo real. Essas grandezas permitem construir uma série temporal e através da utilização de técnicas da inteligência artificial fornecer previsões sobre a ampacidade da linha. Em [Da SILVA, 2005] é mostrado um exemplo utilizando filtro de Kalman para previsão de até 24 horas. Existem várias técnicas que podem ser aplicadas para desenvolver o método híbrido conforme mencionado em [Da SILVA, 2001] e [DEB, 2000], mas que não fazem parte do escopo dessa tese.

## **2.7 Comparação Experimental entre os Regimes de Operação e os Métodos de Cálculo de Ampacidade**

A Tabela 2.7 mostra um exemplo que compara as ampacidades calculadas pelos métodos, determinístico e estatístico, e para os regimes de operação normal e de emergência. Observa-se, através dos resultados gerados, que houve um ganho significativo no regime normal de operação de 20 % (de 1 para 1,2 PU), e houve por outro lado uma redução no regime de emergência de aproximadamente 15% (de 1,5 para 1,3 PU). Esses resultados retratam como a modelagem adotada no método de cálculo tem grande influência nos resultados finais da ampacidade.

Em geral será verificado esse comportamento quando se comparar os resultados de cálculo entre os métodos estático e quase-dinâmico.

Tabela 2.7 Cálculo de ampacidade em valores em PU para o condutor tipo LINNET em uma linha típica de 138 kV.

Ampacidade - Método Estático (PU)		Ampacidade - Método Quase-Dinâmico (PU)	
Normal	Emergência	Normal	Emergência
1,0	1,5	1,2	1,3

NOTA: 1 PU = 510 A.

Dois fatores importantes emergem desta análise da Tabela 2.7 se o cálculo da ampacidade pelo método quase-dinâmico for executado:

- no regime normal, há possibilidade de aumento da ampacidade na ordem de até 20%, e
- no regime de emergência, o aumento da segurança operacional se dá às custas de uma redução da ampacidade da ordem de 15%, ambos em relação ao método estático.

Uma constatação que pode ser verificada através da Figura 2.8 é o aumento do gradiente de temperatura do condutor em função do aumento da ampacidade para as três classes de velocidades de vento. A leitura da Figura 2.8 deve ser feita especificando qual é a temperatura de projeto da linha e, com este valor, determinar qual a ampacidade que poderia ser conduzida para uma dada velocidade de vento fixa.

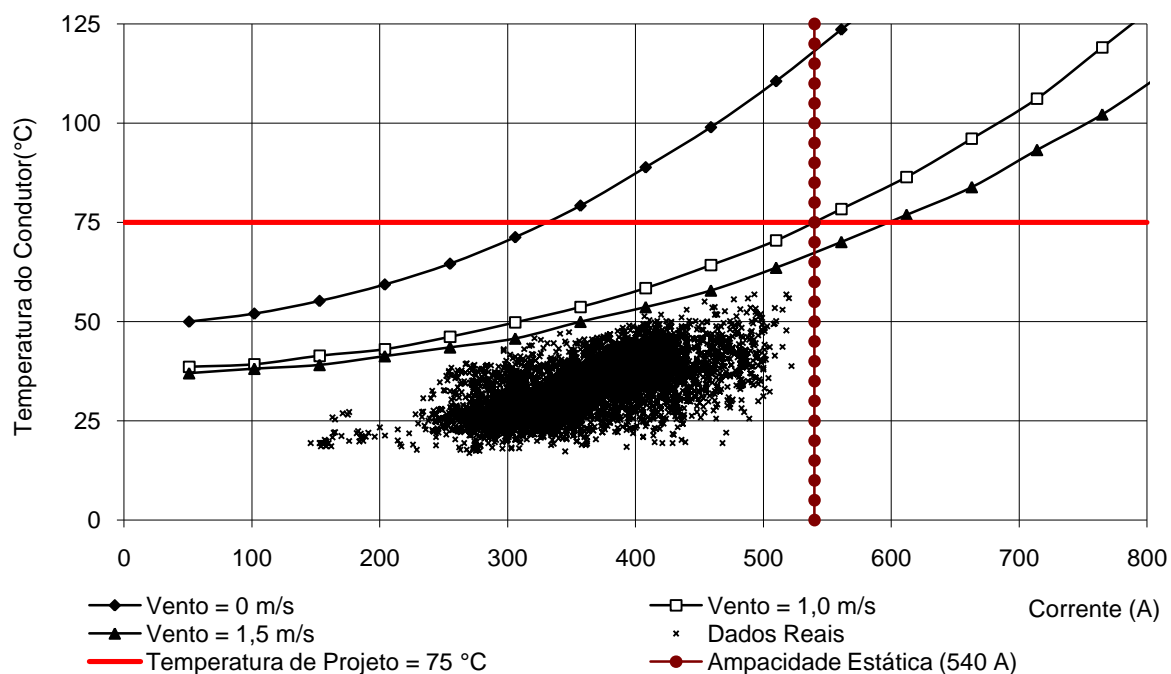


Figura 2.8 Curvas do perfil térmico do condutor versus dados monitorados: Condição de contorno estática no condutor LINNET, temperatura ambiente de 30°C, ângulo de ataque do vento 90° e radiação solar 1000 W/m<sup>2</sup>.

Notadamente, a ampacidade estática é definida utilizando um único valor de velocidade do vento, normalmente entre 0,5 e 1 m/s. Não é a prática dos projetistas utilizarem a velocidade de vento nula, devido à elevação dos custos de projeto e de operação da linha, uma vez que, o vento nulo tem baixa probabilidade de ocorrer. Mas, na hipótese de ocorrer um período de calmaria dos ventos, (vento quase nulo), a probabilidade de violação da altura do condutor ao solo aumenta consideravelmente.

Por outro lado, através da mesma Figura 2.8 é possível observar que os valores monitorados da corrente da linha estão distantes da curva “0 m/s”, o que comprova a teoria de que é raro encontrar ventos quase nulos no meio ambiente.

Dessa forma, a velocidade do vento poderia ser adotada a 1,5 m/s sem violação da altura do condutor ao solo. A prática de projeto atual não utiliza uma velocidade do vento maior que 1,0 m/s, conforme recomendação técnica em [NBR-5422, 1985] utilizado para o cálculo estático de ampacidade.

Essa simples mudança na definição do vento elevaria em 11%, de (540 A - 1,0 m/s) para (600 A - 1,5 m/s), na ampacidade estática dessa linha, observando que a temperatura de projeto não mudaria, isto é, permaneceria o mesmo projeto eletromecânico da linha a 75 °C.

## ***2.8 Tratamento Estatístico do Perfil Térmico do Condutor***

Conforme mostrado no Item 2.6, o cálculo da ampacidade por meio dos métodos quase-dinâmico, dinâmico e híbrido requer a manipulação de funções de distribuição de probabilidade – “pdf’s” e de suas funções complementares de densidade de probabilidade acumulada - “1-cdf’s” [PEEBLES, P.Z., 1993], [PAPOULIS, A., 1991] e [GUMBEL, E.J., 1958].

A obtenção do perfil térmico estatístico do condutor está detalhada no Apêndice A. O cálculo do perfil térmico do condutor utilizado é o regime permanente e a posteriori aplica-se o ajuste estatístico para melhorar a precisão dessas informações.

O perfil térmico da temperatura do condutor pode ser obtido de duas formas, direta ou indireta, a partir de medições obtidas em campo em relação ao condutor. A forma direta tem maior precisão nas informações, mas possui maior complexidade na forma de medição em função do condutor estar no potencial da linha [FURTADO, 1998].

Por outro lado, a forma indireta requer uma confiável base de dados climatológicos e formulação analítica para o cálculo do perfil térmico do condutor. Na condição ideal, o valor calculado deve se aproximar do perfil térmico real do condutor, embora várias simplificações sejam assumidas no processo de cálculo.

Outra forma de obter diretamente o perfil térmico do condutor é através do uso da equação de mudança de estado [CHISHOLM, 2004] e [CHISHOLM, 2003]. A correlação entre alguns parâmetros da linha aérea, como a força mecânica de esticamento do condutor ou a sua altura ao solo (flecha do condutor) em um determinado vão, com a temperatura do condutor são técnicas alternativas e viáveis para se obter o perfil térmico do condutor com boa precisão.

Em [NASCIMENTO, 2003] são apresentadas algumas correlações entre essas variáveis do projeto eletromecânico da linha aérea utilizando a medição direta dos sistemas de monitoramento em tempo real. Outros trabalhos disponíveis na literatura detalham melhor esse assunto em [SEPPA, 1995], [CHILHOLM, 1989] e [FURTADO, 1999]. A Figura 2.9 mostra a correlação inversa entre o perfil térmico e as forças mecânicas de esticamento monitoradas no mesmo vão. A Figura 2.10 mostra a correlação inversa entre o perfil térmico e a altura do condutor ao solo, monitorados em vãos distantes em uma linha.

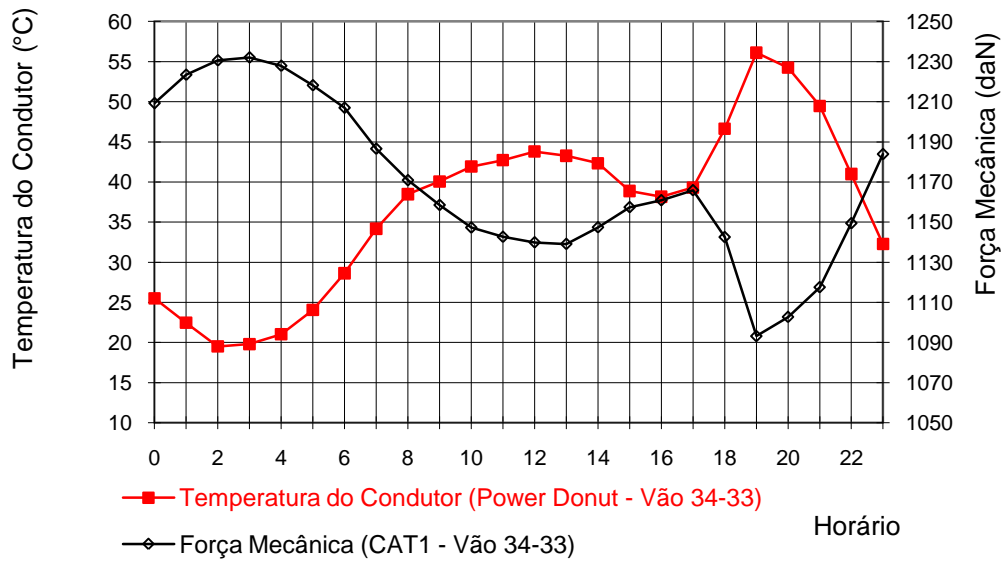


Figura 2.9 Tensão mecânica e o perfil térmico do condutor simultaneamente monitorados para um mesmo vão de linha aérea.

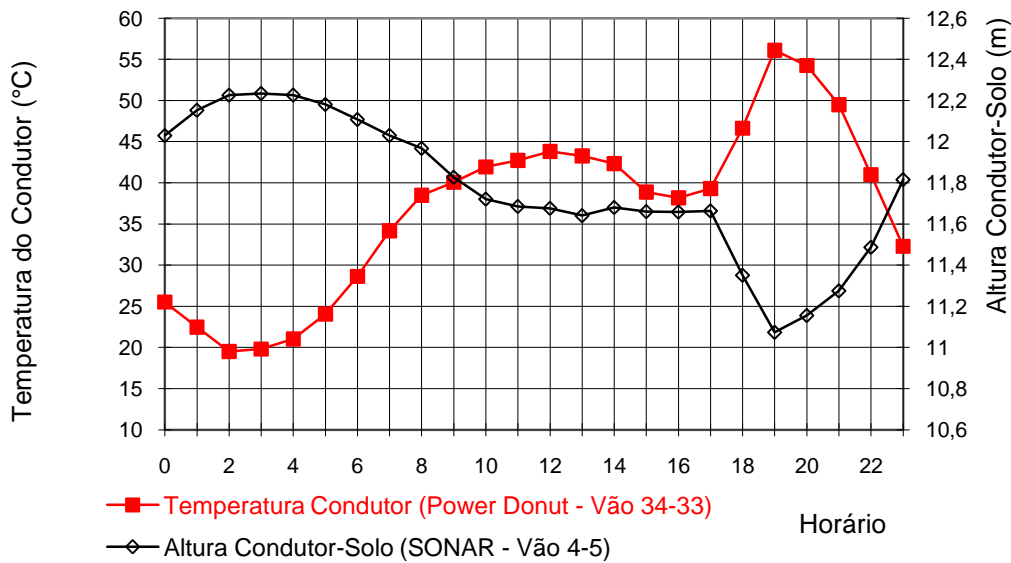


Figura 2.10 Altura do condutor ao solo e o perfil térmico do condutor simultaneamente monitorados nos vãos entre torres (4-5) e (33 – 34), respectivamente.

Nessa trabalho, a temperatura do condutor será diretamente monitorada no condutor de uma linha em operação e utilizada como a variável de análise da pesquisa de campo e de validação das simulações.

## 2.9 Padrão das Informações Climatológicas

O padrão dos dados climatológicos utilizados no cálculo do perfil térmico do condutor seguiu a padronização recomendada na literatura, em especial as recomendações em [NBR5422, 1985]. De forma resumida, estas recomendações são:

- A velocidade e direção do vento devem ter períodos de integração de média igual ou superior a 10 minutos e medidos à altura de referência de 10 metros a partir do solo.
- A radiação solar e a temperatura do ar devem representar o valor médio do período de 10 minutos.
- Para representar as sazonalidades do clima, o perfil térmico do condutor deve ter um período mínimo de amostragem de 3 anos.

## 2.10 Risco Térmico

O termo risco térmico é definido como sendo a probabilidade da temperatura do condutor exceder um determinado valor durante um dado período de tempo. Ou em outras palavras, é o risco ou a probabilidade da temperatura do condutor exceder o valor da temperatura de projeto da linha.

As Equações 2.15, 2.16 e 2.17 mostram, respectivamente, as formulações matemáticas da função densidade de probabilidade de distribuição normal (“cdf”), a função distribuição acumulada “cdf” e a função de distribuição acumulada complementar “1-cdf”.

$$f(T_c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(T_c - T_{med})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2.13)$$

$$P(T_c \leq T_{ref}) = \int_{-\infty}^{T_{ref}} f(T) dT \quad (2.14)$$

$$P(T_c > T_{ref}) = 1 - \int_{-\infty}^{T_{ref}} f(T) dT \quad (2.15)$$

onde:

$f(T_c)$	função densidade de probabilidade da temperatura do condutor	(%)
$T_{med}$	Temperatura média do condutor	(°C)
$\sigma$	desvio padrão do conjunto de dados da temperatura do condutor	(°C)
$T$	Variável aleatória contínua da temperatura do condutor	(°C)
$T_{ref}$	Limite para a variável aleatória da temperatura do condutor ou a temperatura de projeto da linha	(°C)

As Figuras 2.11, 2.12 e 2.13 mostram, respectivamente, a representação gráfica da função densidade de probabilidade de distribuição normal e as representações correspondentes da função de distribuição acumulada e de sua função complementar.

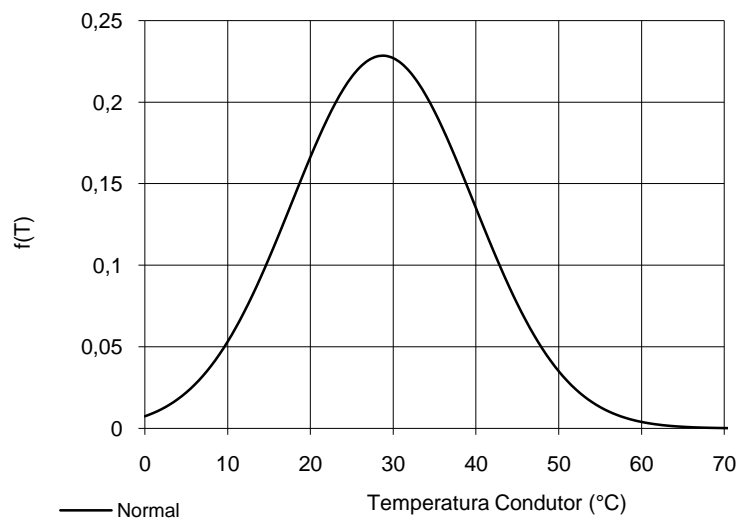


Figura 2.11 Função densidade de probabilidade (pdf) do perfil térmico do condutor.

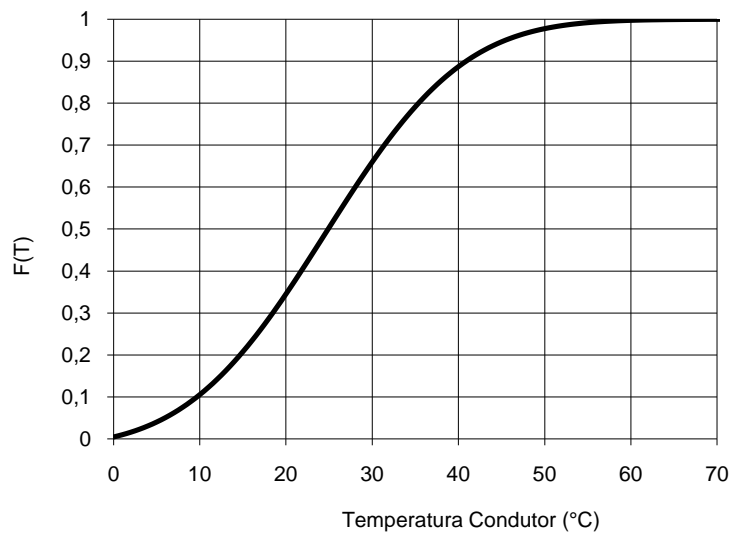


Figura 2.12 Função densidade de probabilidade acumulada (cdf) do perfil térmico do condutor.

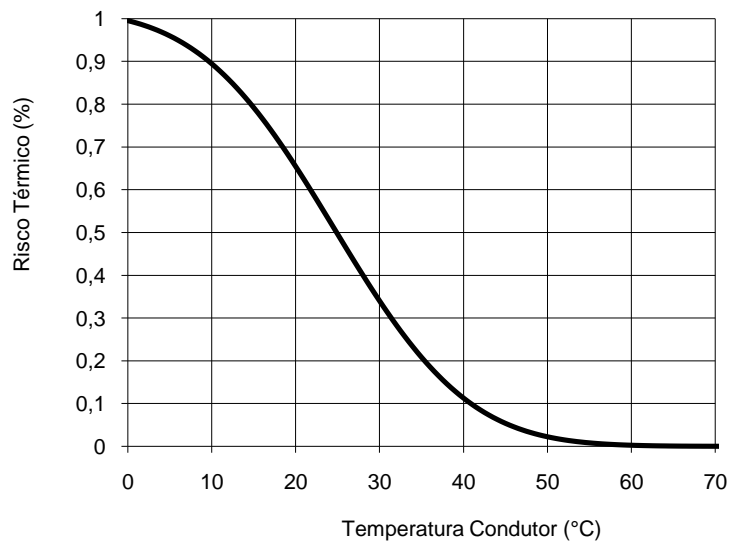


Figura 2.13 Risco térmico ou cdf acumulada complementar (1-cdf).

Ao leitor interessado no assunto, no Apêndice B são apresentados com detalhes alguns ajustes estatísticos aplicados no perfil térmico do condutor.

## ***2.11 Estudo da Camada Limite da Atmosfera***

Um ponto relevante para melhoria do processo de cálculo de ampacidade está focado na necessidade de se estabelecer ao longo de todos os vãos de uma dada linha aérea quais valores de parâmetros climatológicos (velocidade do vento, temperatura ambiente e radiação solar) serão definidos para se utilizar no modelo de cálculo.

O monitoramento das condições climatológicas ao longo de toda a linha aérea por meio de estações climatológicas é de custo proibitivo, sobretudo para linhas aéreas longas. Assim, um ponto de partida plausível para se trabalhar na determinação da velocidade do vento, que é o parâmetro climatológico de maior influência no cálculo da ampacidade, **conforme mostra dados experimentais no apêndice D**, é a utilização dos estudos numéricos da camada limite da atmosfera - CLA<sup>2</sup> para a região onde se encontra a linha de transmissão. Para isto, é preciso ter a topografia digital do terreno, medidas de velocidade do vento e alguns pontos sobre a fronteira da região para fins de se estabelecer com certa acuidade as condições de contorno do problema. Também é desejável que se tenha valores reais de medições da velocidade do vento no interior da região para fins de validação de um modelo numérico e para aferir, de forma qualitativa, a precisão dos resultados simulados.

Estudos numéricos mais recentes sobre a CLA para aplicação em superfícies terrestre complexas podem ser encontrados em [TAYLOR, 1983]. No caso da aplicação da CLA em topografias de linhas aéreas de energia no Brasil, [VALLE, 2005] mostrou os primeiros resultados gerados para essa área por meio do processamento em modelagem de microescala da região experimental de Acurui-MG e considerando um regime estacionário da CLA.

A região da CLA é definida como sendo uma fina camada da atmosfera, adjacente à superfície terrestre (até 2 km de altura) [MARTINS, M.A., 2002], em que o escoamento do

---

<sup>2</sup> A Camada Limite Atmosférica (CLA), também conhecida como Camada Limite Planetária (CLP), possui altura típica de 1 km, localiza-se na baixa troposfera e por isto sofre diretamente a influência da superfície. A CLA é a camada inferior da troposfera, em contato direto com a superfície terrestre, que apresenta uma escala de altura de 1 a 2 km (durante o dia) e entre 0 e 100 m (durante a noite).

vento atmosférico apresenta um elevado número de Reynolds. Esse escoamento ocorre em diferentes escalas, onde cada escala, descrita em termos de domínio computacional, utiliza modelos distintos.

Esses modelos utilizam as equações constitutivas gerais [UCHIDA, T. and ONYA – 1999], apresentando diferenças apenas nas simplificações do conjunto de termos fonte, que depende principalmente do domínio computacional e da estratificação térmica.

As equações que regem estes escoamentos geofísicos são as equações de continuidade, de conservação de quantidade de movimento, de conservação de energia e de conservação da espécie química.

Os modelos para simulação dos campos de velocidade de vento são classificados em quatro classes de modelos: circulação global, predição de climas, meso-escalas [UCHIDA, T. and ONYA – 1999] e micro-escala, tais como:

- Modelos de circulação global: utilizam domínios entre 200 e 500 km e são utilizados para analisar os campos de velocidade de vento sobre a superfície terrestre.
- Modelos de predição de clima: utilizam domínios entre 50 e 100 km e são utilizados para resolver problemas de frentes climáticas.
- Modelos de meso-escalas: utilizam domínios típicos entre 2 a 50 km e são empregados no estudo dos campos de velocidade de vento sobre topografias.
- Modelos micro-escala: utilizam domínios reduzidos e são empregados no estudo da regionalização dos campos de velocidade de vento sobre a superfície terrestre. Esses modelos utilizam as mesmas equações constitutivas gerais com mais ou menos simplificações nos seus termos fonte.

### 2.11.1 Modelo Matemático da CLA

O modelo matemático da CLA é definido pelas equações de (2.18) a (2.21) que representam, respectivamente, a conservação da massa, quantidade de movimento, equação de estado e equação de energia sob a decomposição de Reynolds e a aproximação de Boussinesq [Y.Q. Zang, 1996], [D.A. Trifonopoulos and G.C. Bergeles, 1992] e [G.A.A. Moreira, 2008]

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \forall i = 1, 2, 3. \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\delta p}{\rho_0} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - S_w \quad (2.17)$$

$$\frac{\delta p}{\rho_0} = -\frac{\delta T}{T_0} \quad (2.20)$$

$$c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{Pr_T} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + Q \quad (2.21)$$

onde:

$u_i$	i-ésima componente cartesiana da velocidade do vento	(m/s)
$x_i$	i-ésima coordenada cartesiana	(m)
$\rho_0$	massa específica de referência	(kg/m <sup>3</sup> )
$p$	pressão	(N/m <sup>2</sup> )
$k$	energia cinética por unidade de massa	(m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
$t$	tempo	(s)
$\nu_t$	viscosidade efetiva	(m <sup>2</sup> /s)
$S_w$	Termo fonte	(m/s <sup>2</sup> )
$c_p$	capacidade térmica do ar a pressão constante	(W . s/kg °C)
$T$	Temperatura	(°C)
$Pr_T$	número de Prandtl turbulento	(adimensional)
$Q$	Taxa de geração de energia	(W/m)

O termo  $S_w$ , definido em (2.18), representa o termo de flutuação.

A definição do termo de flutuação caracteriza diversos modelos disponíveis na literatura. Usualmente, os modelos apresentados por [UCHIDA, T. and ONYA – 1999], [HUSER, A., NILSEN, P.J., and SKATUN, H. – 1997] e [MONTAVON, C. – 1998] utilizam a aproximação de Boussinesq e os modelos de turbulência são derivados do modelo  $k-\varepsilon$  [ZHANG, Y.Q. – 1996].

### 2.11.2 Domínio e Análise da CLA

A simulação da camada limite da atmosfera é feita sobre um domínio que possui na sua base o solo, com vegetação, água e ou construções, que colocam dificuldades para o movimento da camada de ar. O topo do domínio deve ser considerado alto o suficiente para que se possam considerar condições de fronteira tipo Neumann natural, sem que com isto haja perda de precisão nos resultados. Na entrada do domínio a condição de fronteira para modelo turbulento pode ser conforme o modelo  $k-\varepsilon$ , e o perfil da velocidade na entrada com distribuição logarítmica. Nas laterais se tem condição de simetria e na saída a condição de saída. A Figura 2.14 as superfícies do domínio onde as condições de fronteira devem ser definidas.

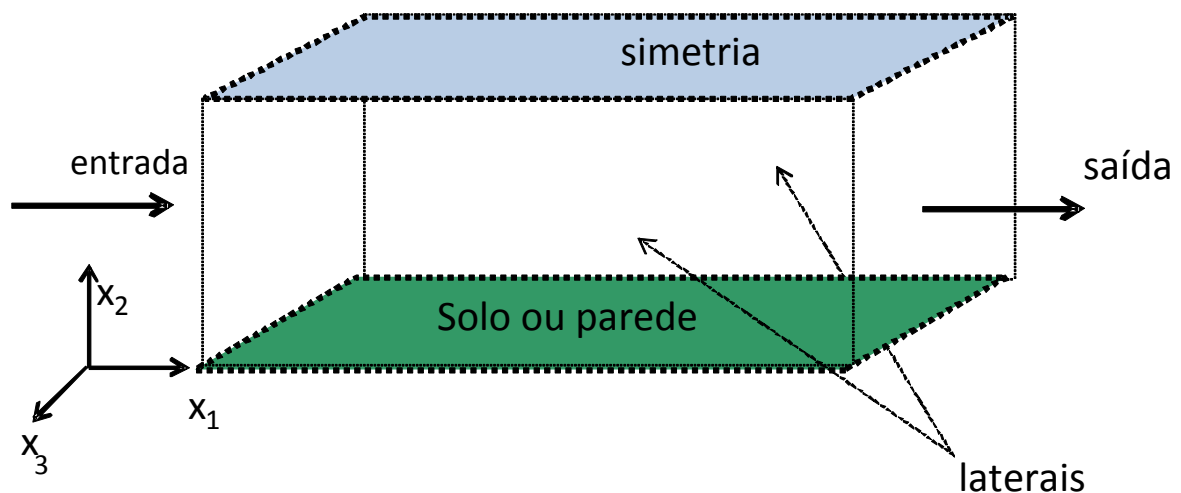


Figura 2.14 Ilustração das condições de fronteira.

### 2.11.3 Condições de Contorno – Modelo k-ε

As condições de contorno utilizadas na CLA pelo modelo de turbulência k-ε estão associadas à energia cinética turbulenta k, e à sua taxa de dissipação ε. Neste modelo, as condições de entrada são dadas por (2.22) e (2.23)

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (2.22)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa x_2} \quad (2.23)$$

onde:

$u_*$	velocidade de fricção	(m/s)
k	constante de Von Karman (k=0,41)	(adimensional)
$C_\mu$	constante empírica	(adimensional)
$x_2$	altura	(m)

### 2.11.4 Condições de Contorno na Entrada

O perfil de velocidade na entrada é dado por (2.24).

$$u(x_2)_{in} = u_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{x_2}{x_{2,o}}\right)}{\ln\left(\frac{x_{2,ref}}{x_{2,o}}\right)} \quad (2.24)$$

onde:

$u(x_2)_{in}$	velocidade dada pelo perfil logarítmico modificado	(m/s)
$u_{ref}$	velocidade de referência obtida a uma altura de 10m	(m/s)
$x_{2,ref}$	altura de referência igual a 10m	(m)
$x_{2,o}$	comprimento aerodinâmico da rugosidade	(m)

Valores típicos de rugosidade são apresentados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 Valores gerais de rugosidade.

$X_{2,0}$ (m)	Parâmetros
1	Cidade
0,3	Floresta
0,03	Gramma baixa
0,0001	Água

### 2.11.5 Condições de Contorno na Saída

O perfil de velocidade na saída é dado por condição de derivada nula para todas as grandezas envolvidas, conforme (2.25).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= 0 \quad \forall i = 1, 2, 3 \\ \frac{\partial k}{\partial x_j} &= 0 \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} &= 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

onde:

$j$  é a direção normal a superfície, isto é,  $j=1$  saída e  $j=3$  laterais.

### 2.11.6 Condições de Contorno no Solo (Parede)

O perfil de velocidade no solo é considerado sem deslizamentos conforme (2.26).

$$u_1 = u_2 = u_3 = 0 \quad (2.26)$$

### 2.11.7 Condições de Contorno de Simetria

O perfil de velocidade na simetria é dado por (2.26).

$$u = U_\infty \quad (2.27)$$

### 2.11.8 Tratamento das Forças de Empuxo Verticais

As forças de empuxo são consideradas no termo fonte da equação da conservação de quantidade de movimento (2.19), o qual é dado por (2.28).

$$S_w = \frac{g \cdot \delta\rho}{\rho_0} \delta_{2i} = \frac{g \cdot (\rho - \rho_0)}{\rho_0} \delta_{2i} \quad (2.28)$$

onde:

$S_w$	termo fonte	(m/s <sup>2</sup> )
$g$	aceleração da gravidade	(m/s <sup>2</sup> )
$\rho$	massa específica do meio	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_0$	massa específica de referência	(kg/m <sup>3</sup> )
$\delta_{2i}$	delta de Kronecker ( $\delta_{2i} = 1$ para $i = 2$ , $\delta_{2i} = 0$ para $i = 1,3$ )	(adimensional)

Segundo [TRIFONOPOULOS and BERGELES, 1992], ao se considerar o gradiente de densidade constante durante a simulação, o número de Froude pode ser relacionado dor (2.29).

$$Fr = \frac{U_\infty}{(g \cdot L \cdot \Delta\rho / \rho_0)^{1/2}} \quad (2.29)$$

onde:

$U_\infty$	representa a velocidade desenvolvida acima de 500 metros	(m/s)
$\Delta\rho$	variação entre a base do terreno ao seu topo	(kg/m <sup>3</sup> )
$L$	desnível	(m)
$g$	aceleração da gravidade	(m/s <sup>2</sup> )

Desta forma, o termo fonte em relação à direção  $x_2$  (altura), introduzido na equação da conservação de quantidade de movimento, pode ser escrito conforme (2.30).

$$S_w = \frac{U_\infty^2 \cdot \rho_0}{L \cdot Fr^2} \quad (2.30)$$

onde:

$U_\infty$	velocidade a uma altura de 500m	(m/s)
$\rho_0$	massa específica de referência ( $\rho_0 = 1.185 \text{ kg/m}^3$ )	(kg/m <sup>3</sup> )
$L$	comprimento característico (altura da maior elevação)	(m)

Finalmente, a intensidade das forças de empuxo devido aos efeitos térmicos do solo é obtida através de valores atribuídos ao número de Froude. A Tabela 2.9 mostra a relação entre o estado da atmosfera e a faixa de valores atribuídos ao número de Froude. Resumidamente, as condições de fronteira e de turbulência são apresentadas na Tabela 2.10.

Tabela 2.9 Valores gerais do número de Froude e o estado da atmosfera correspondente.

Fr	Estado da Atmosfera
> 1000	CLA Neutra
10 < Fr < 1000	CLA Estável
-100 < Fr < 10	CLA Instável

Tabela 2.10 Condições de contorno utilizadas no CFX para o modelo simplificado [TRIFONOPOULOS and BERGELES, 1992].

Contorno	u1	u2	u3	K	$\varepsilon$
Entrada (inlet)	$u(x_2)_{in} = u_{ref} \cdot \ln\left(\frac{x_2}{x_{2o}}\right) / \ln\left(\frac{x_{2ref}}{x_{2o}}\right)$	$u_2 = 0$	$u_3 = 0$	$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}$	$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa x_2}$
Fronteira de saída (outlet)	$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} = 0$	$\frac{\partial u_2}{\partial x_1} = 0$	$\frac{\partial u_3}{\partial x_1} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x_1} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} = 0$
Solo (wall)	Parede sem deslizamento acoplada com funções de parede do modelo de turbulência			$\frac{\partial k}{\partial x_2} = 0$	$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z}$
Fronteiras laterais	$\frac{\partial u_1}{\partial x_3} = 0$	$\frac{\partial u_2}{\partial x_3} = 0$	$\frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x_3} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_3} = 0$
Céu (Symmetry)	$u_1 = U_\infty$	$\frac{\partial u_2}{\partial x_2} = 0$	$\frac{\partial u_3}{\partial x_2} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x_2} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_2} = 0$

### 2.11.9 Processamento da CLA

A modelagem e a simulação do escoamento da CLA foram realizadas por meio do emprego do pacote computacional Ansys CFX. Resumidamente, este software possui as seguintes características:

- discretização das equações de conservação pelo método de volumes finitos;
- resolve problemas laminares e turbulentos na forma tridimensional;
- utiliza malhas não-estruturadas e híbridas;
- resolve problemas conjugados de calor e escoamento de fluidos, entre outras.

### **2.11.10 Domínio Computacional**

A utilização de malhas não-estruturadas permite que refinamentos sejam aplicados próximos às superfícies onde ocorrem grandes variações de velocidade do vento. A solução do problema em uma dada região de interesse pelo método de volumes finitos consiste em integrar as equações (2.17 a 2.20) e depois aplicá-las ao domínio discretizado em volumes finitos oriundos da discretização. A Figura 2.15 ilustra uma malha típica em torno do solo.

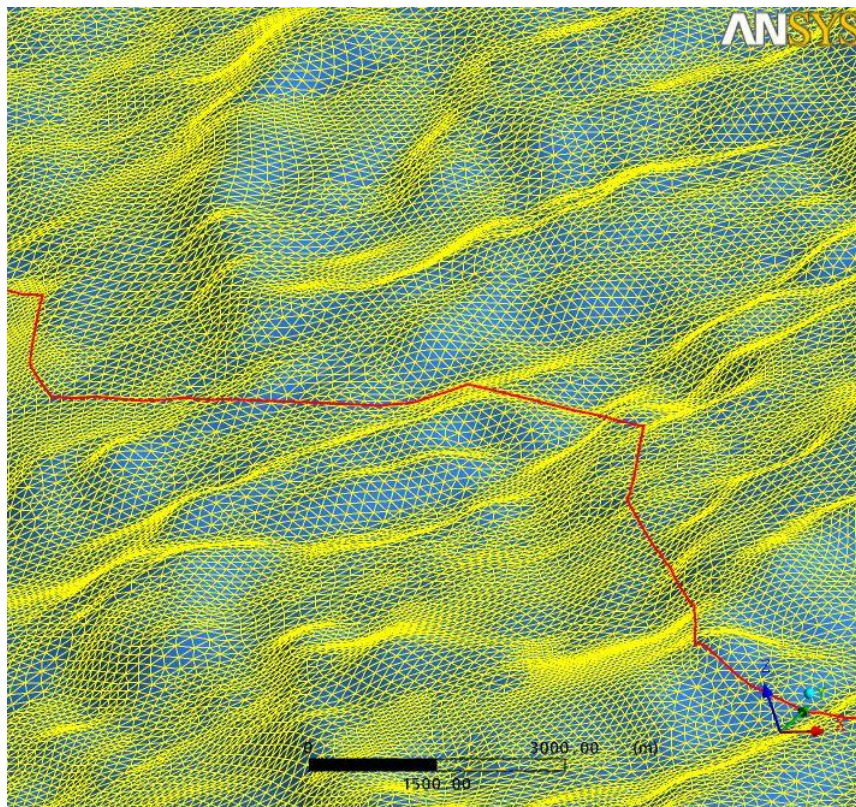


Figura 2.15 Discretização de domínio em malha não-estruturada.

### **2.11.11 Validação do modelo da CLA**

O modelo matemático da CLA pode ser validado para algumas geometrias simples, como por exemplo, escoamento horizontal sobre um terreno com baixa elevação em forma de sino por meio da comparação entre resultados de simulações numéricas e de solução analítica exata, obtida através da teoria de ondas lineares de montanha, conforme descrito em [MONTAVON, C., 1998]. Para problemas com geometrias complexas, a validação do modelo

utiliza a comparação qualitativa entre os resultados experimentais e as simulações numéricas das amplitudes de velocidade de vento, conforme sítio de Askervein [TAYLOR P.A. and TEUNISSEN, H.W., 1985] a ser apresentado de forma resumida a seguir.

### **2.11.12 Colina de Askervein**

Com a evolução da capacidade computacional de processamento numérico, o modelo matemático da CLA foi validado utilizando os dados experimentais da colina de Askervein (Veja Figura 2.16). Essa região é composta por uma colina isolada, suave, e sua forma é aproximadamente elíptica, com vegetação baixa e rugosidade variável. A colina tem 116m de altura e está localizada na costa oeste da ilha de South Uist - Outer Hebrides na Escócia. O conjunto completo de dados coletados em Askervein e os detalhes referentes à sua topografia encontram-se disponíveis em [TAYLOR P.A. and TEUNISSEN, H.W., 1983].



Figura 2.16 Detalhes da topografia da colina de Askervein [TAYLOR, 1983, 1985 e 1987].

A Figura 2.17 apresenta as curvas de nível da topografia da colina de Askervein. Os resultados numéricos apresentados na Figura 2.18 em dégradé de cores mostra o pré-processamento com a topografia digitalizada.

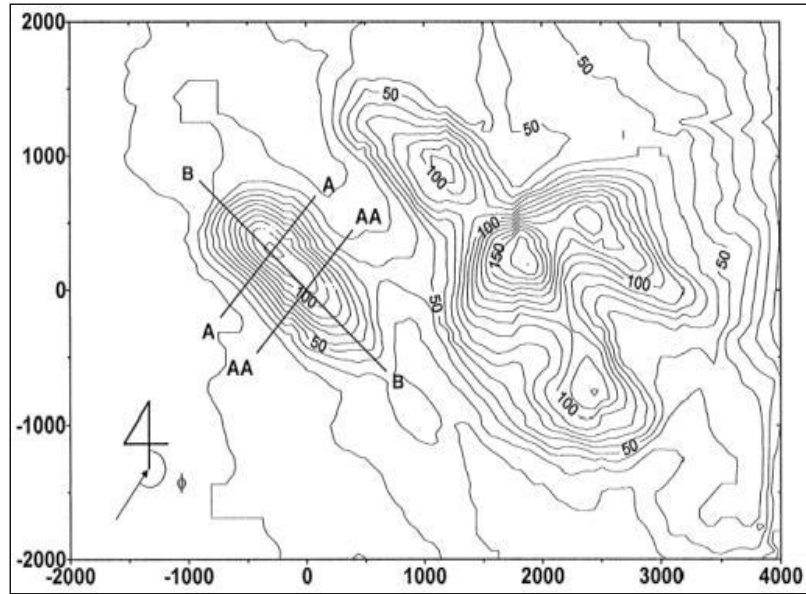


Figura 2.17 Topografia de Askervein.

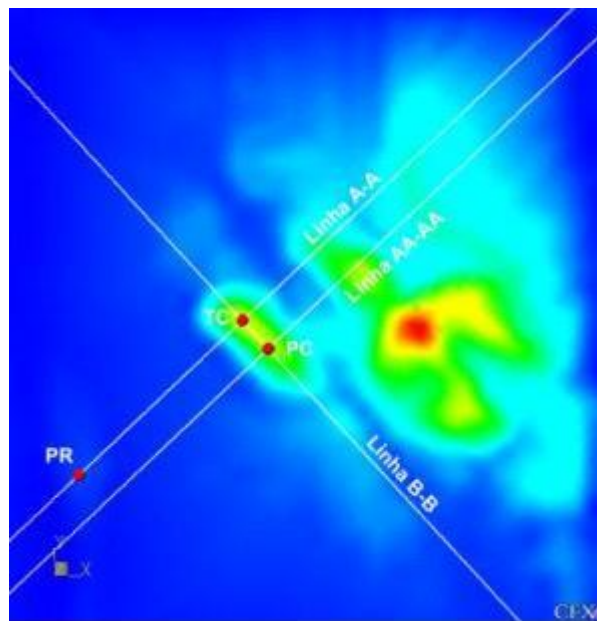


Figura 2.18 Topografia de Askervein digitalizada no CFX.

A Figura 2.19 compara os resultados simulados para a velocidade relativa do vento utilizando o modelo da CLA [VALLE, 2005] com aqueles obtidos com medições em Askervein ao longo da linha A-A [RAITHBY, G.D., 1985]. Este valor representa quantas vezes a velocidade local do vento é maior que a velocidade de referência, dada por (2.31). Os resultados obtidos para o número de Froude maior que 1000 são considerados aceitáveis para o estudo da

ampacidade em regime permanente. Dessa forma, o modelo CLA proposto em [TAYLOR P.A. and TEUNISSEN, H.W., 1983] e reproduzido por [VALLE, 2005] foi selecionado para uso na nova metodologia de cálculo da ampacidade - AmpCLA.

$$ARV = \frac{V_{local}}{V_{ref}} - 1 \quad (2.31)$$

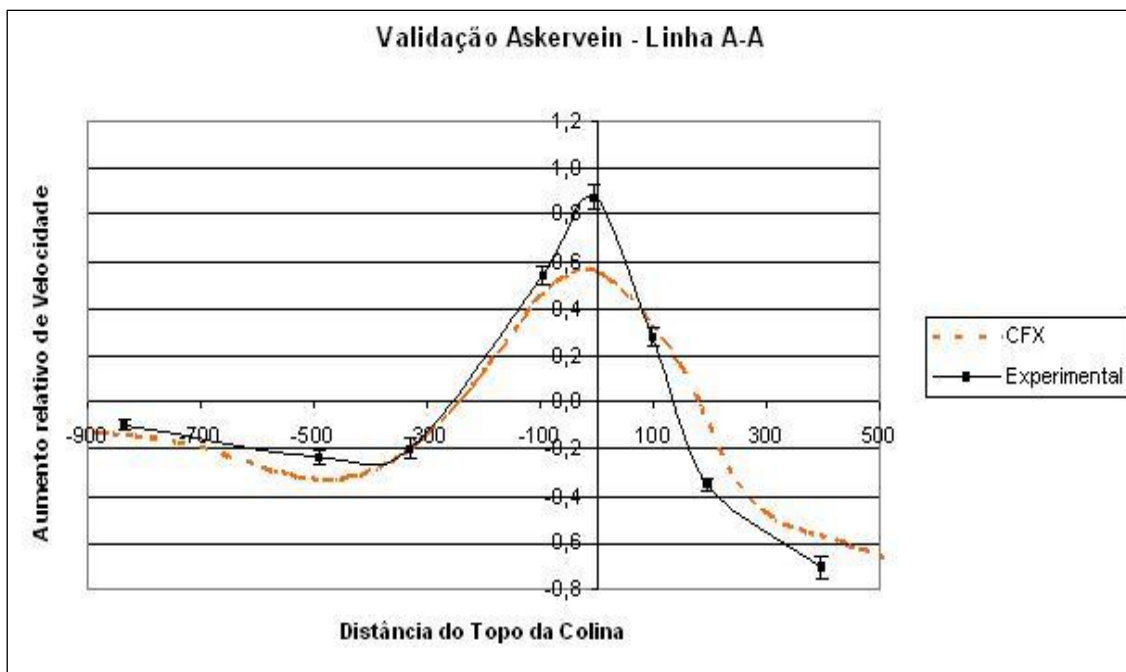


Figura 2.19 Resultados do modelo numérico CLA [VALLE, 2005] e os valores medidos Askervein [TAYLOR P.A. and TEUNISSEN, H.W., 1983].

### 2.11.13 Região de Acuruí-MG

No Brasil, Acuruí-MG foi a região selecionada para o desenvolvimento da parte experimental do estudo da CLA e utilizada também para validação da metodologia AmpCLA. Essa região foi instrumentalizada para permitir a medição da amplitude da velocidade e direção do vento em 8 (oito) pontos distintos, sendo 6 (seis) pontos na fronteira e 2 (dois) pontos internos. Essa região encontra-se distante de 50 km da cidade de Belo Horizonte-MG, Brasil. Os sensores de velocidade e direção do vento foram constituídos por anemômetros digitais tipo Second Wind - modelo 2000S com partes móveis e foram instalados à altura de referência de 10 metros, conforme recomendação internacional.

A Figura 2.20 apresenta o mapa topográfico de Acuruí-MG, digitalizado no sistema computacional Ansys CFX [CFX-5.5 , 2002]. Os pontos indicados pelos números de 1 (um) a 8 (oito) se referem aos locais de medição de velocidade de vento.

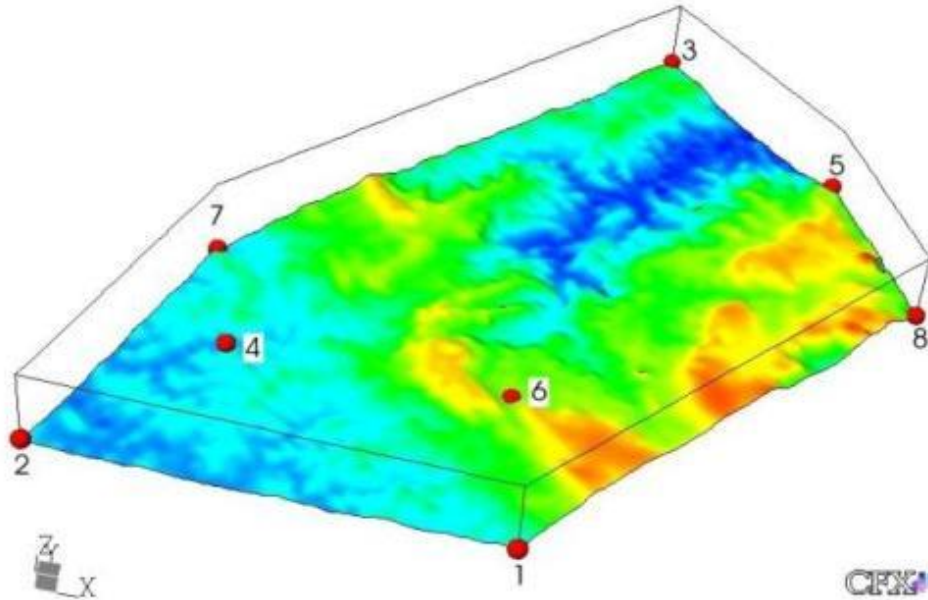


Figura 2.20 Visualização digital da região da Acuruí-MG.

A Figura 2.21 mostra detalhes de um dos locais de medição (ponto 4), próximo da linha aérea, que será objeto das simulações em casos reais de aplicação da metodologia AmpCLA.



Figura 2.21 Visualização da torre de medição do vento que está próxima a uma Linha Aérea na região de Acuruí-MG.

A Tabela 2.11 detalha a localização geográfica de cada estação de coleta de dados na região de estudo.

Tabela 2.11 Localização geográfica de cada local de medição em Acuruí-MG.

Ponto	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	-20° 12' 41,9"	-43° 38' 17,1"	1123,0
2	-20° 14' 23,2"	-43° 44' 14,6"	1085,2
3	-20° 00' 33,5"	-43° 36' 58,1"	915,5
4	-20° 07' 18,9"	-43° 41' 13,8"	1414,0
5	-20° 02' 18,5"	-43° 33' 24,5"	785,7
6	-20° 06' 28,6"	-43° 36' 31,8"	952,6
7	-20° 06' 14,6"	-43° 44' 44,3"	1167,0
8	-20° 05' 44,3"	-43° 29' 52,5"	1311,0

### 2.11.14 Resultados

O modelo da CLA utilizado em Acuruí-MG foi o hidrodinâmico e em regime permanente, isto é, efeitos transientes e térmicos não foram levados em consideração conforme [VALLE, 2005]. Com essas simplificações, o custo computacional da CLA se tornou viável.

A Figura 2.22 apresenta um exemplo de simulação, isto é, em 2.22(a) é mostrada a malha da superfície topográfica de Acuruí-MG, em 2.22(b) a ampliação dessa malha para detalhar a formação dos volumes finitos na superfície topográfica, e 2.22(c) os resultados obtidos em termos de vetores de intensidade e direção da velocidade do vento.

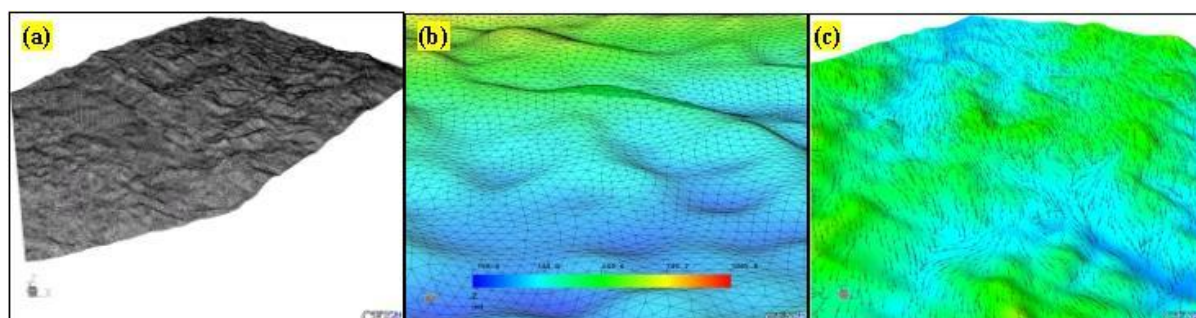


Figura 2.22 - (a) Malha digitalizada da região de Acuruí-MG, (b) ampliação da malha e (c) resultado dos vetores de velocidade e direção do vento.

A Figura 2.23 mostra as curvas de velocidade do vento em função da altura do solo para 3 (três) pontos distintos (pontos 1, 4 e 6 conforme identificação dos pontos na Figura 2.20).

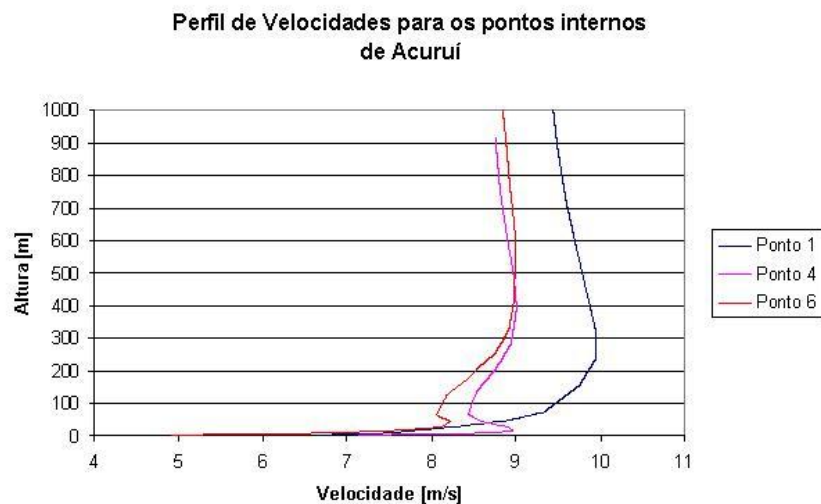


Figura 2.23 Simulação do perfil de velocidade do vento em Acuruí-MG (pontos 1, 4 e 6).

Nota-se que no ponto 1, por se tratar de uma superfície mais baixa e plana, o perfil de velocidade do vento não apresenta regiões de aceleração da velocidade, permanecendo num perfil parabólico bem desenvolvido. Já nos pontos internos, 4 e 6, aparecem acelerações devido às irregularidades do terreno. Essas alterações geradas na amplitude da velocidade do vento devem ser consideradas durante o processo de cálculo da ampacidade. Essa é a principal diferença proposta pela metodologia AmpCLA frente às metodologias tradicionais de cálculo de ampacidade disponíveis na literatura, que ainda não levam em conta o uso das informações simuladas da CLA no cálculo de ampacidade.

Para reforçar a necessidade do uso dos dados simulados da CLA para descrever o comportamento físico da amplitude da velocidade do vento ao longo de todos os vãos de uma dada linha aérea, é mostrado nas Figuras 2.24 a 2.26 um resumo sobre o comportamento temporal e espacial dos dados obtidos pelas estações de vento em Acuruí-MG, conforme detalhado a seguir:

- A Figura 2.24 mostra os valores médios horários da velocidade do vento nos oito pontos de medição experimental. Uma constatação exploratória a partir desses dados é que nenhum dos locais tem o mesmo perfil de vento.
- A Figura 2.25 mostra os valores médios da velocidade do vento dos pontos de medição, que confirmam a teoria da variação da amplitude do vento na CLA.

- A Figura 2.26 mostra, durante um período de dados, os valores médios diários da velocidade do vento dos oito pontos de medição. A constatação exploratória confirma mais uma vez que existem alterações significativas nas amplitudes médias diárias da velocidade do vento para cada local analisado.

Essas constatações experimentais motivaram a proposição de um método de cálculo de ampacidade em que se considera o efeito da variação da amplitude da velocidade do vento ao longo de todos os vãos da linha aérea.

Recentemente, [JAUFER, 2008] chegou a essa mesma conclusão através de estudos realizados na Áustria, fato esse que reforça a relevância do uso das informações da CLA no cálculo da ampacidade de linhas aéreas.

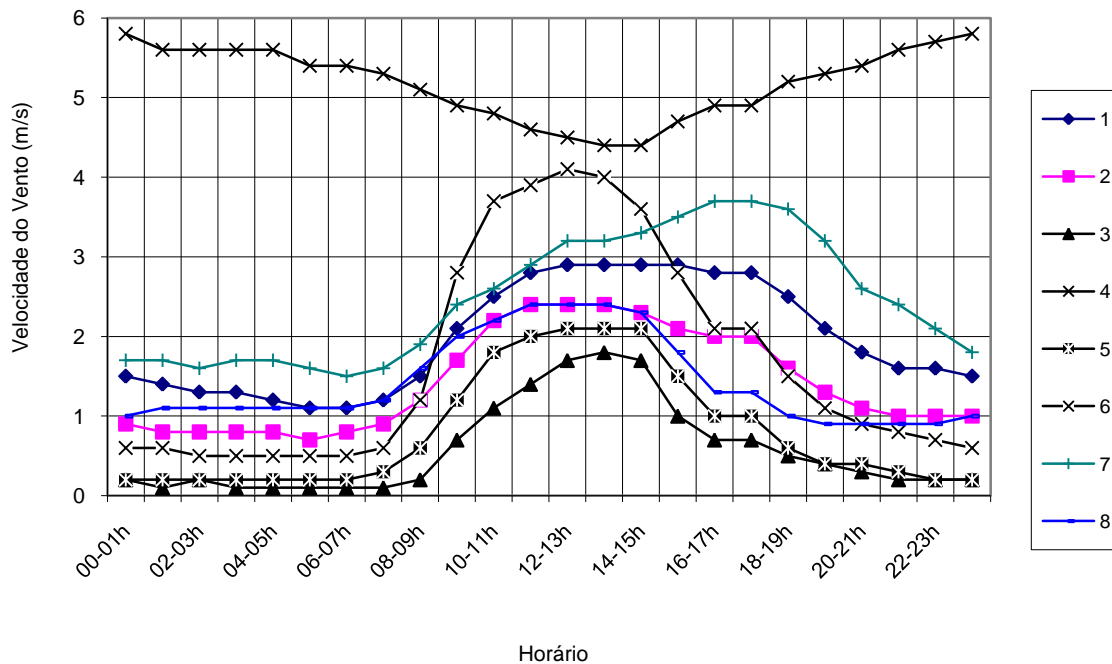


Figura 2.24 Valores médios horários da velocidade do vento medidos na região de Acuruí-MG.

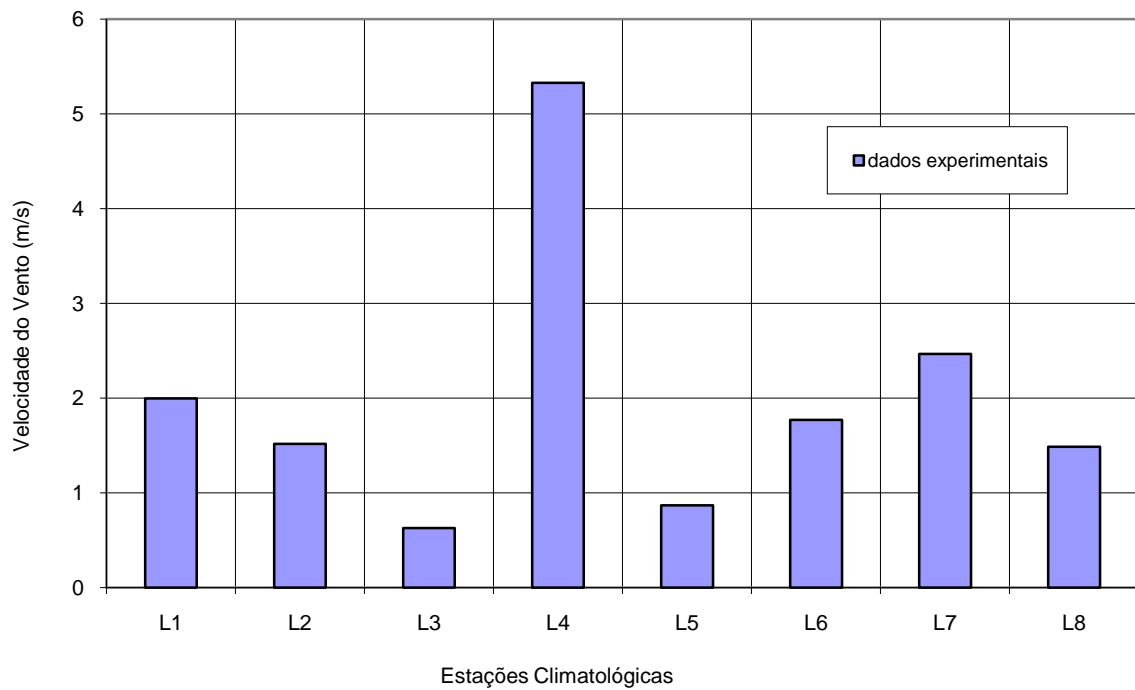


Figura 2.25 Média das velocidades médias diárias da velocidade do vento na região de Acuruí-MG.

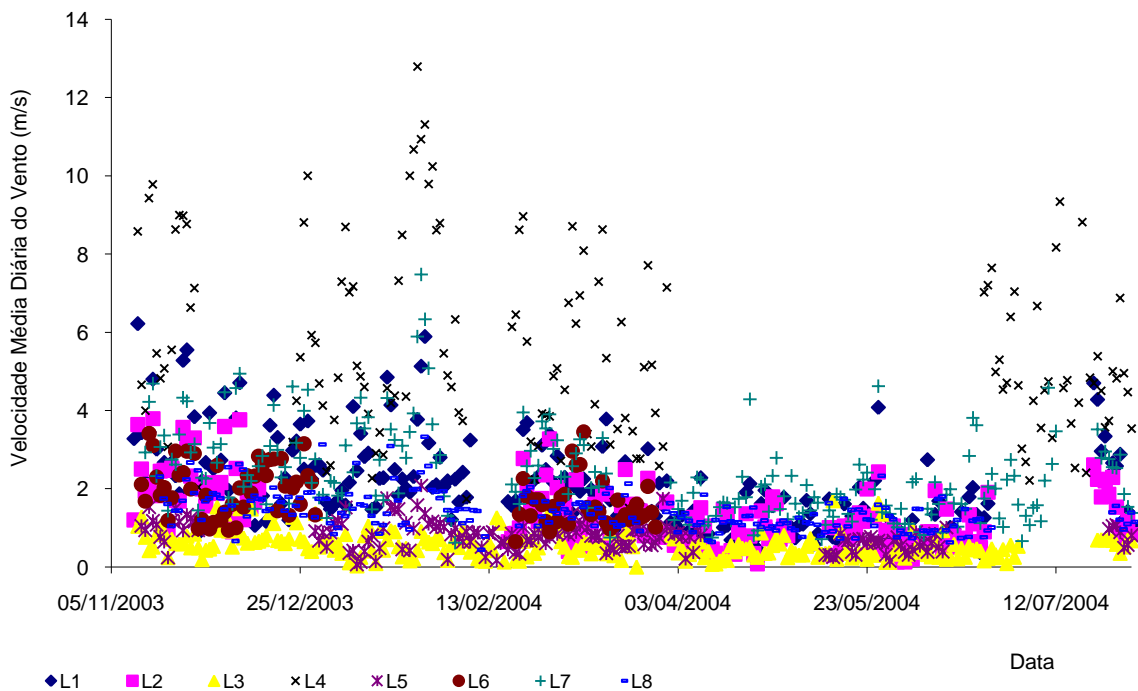


Figura 2.26 Valores médios diários da velocidade do vento em Acuruí-MG.

## ***2.12 Conclusão***

Esse capítulo introduziu os conceitos gerais para se realizar o cálculo da ampacidade de linhas aéreas, com destaque para a amplitude de velocidade do vento que requer um tratamento criterioso para melhorar a precisão do cálculo da ampacidade. E ainda explorou os conceitos básicos para a modelagem matemática e numérica da camada limite da atmosfera – CLA.

Através de constatações experimentais obtidas em Acuruí-MG foi possível comprovar a necessidade de se implementar um método de cálculo de ampacidade, onde se considere a variação da amplitude do vento ao longo de todos os vãos da linha aérea. No Apêndice D são mostradas algumas pesquisas nessa linha de estudo.

Uma forma plausível seria efetuar o cálculo da ampacidade considerando a influência da velocidade do vento no perfil térmico dos condutores ao longo de todos os vãos da linha aérea, por meio do uso de banco de dados gerado a partir da simulação da camada limite da atmosfera – CLA. Esta é uma contribuição científica incorporada na forma da metodologia AmpCLA, a ser apresentada no próximo capítulo.

## ***3 Metodologia de Cálculo de Ampacidade - AmpCLA***

### ***3.1 Introdução***

A metodologia AmpCLA, originalmente proposta nesta tese, inclui o uso de banco de dados, contendo valores numéricos da amplitude da velocidade do vento, obtidos com simulações da CLA, no cálculo da ampacidade como diferencial às outras metodologias disponíveis na literatura. A metodologia AmpCLA, como será mostrada no decorrer deste capítulo, torna o método de cálculo da ampacidade mais preciso, devido ao fato de se considerar a influência climatológica de forma regionalizada em todos os vãos de uma dada linha de transmissão aérea. Esta característica é desconsiderada pelas metodologias tradicionais, principalmente devido à falta de estações climatológicas distribuídas ao longo dos vãos da linha e à falta de uma ferramenta computacional que permita utilizar as informações das simulações da CLA através de uma metodologia criteriosa e consistente.

A relevância científica da metodologia AmpCLA se deve à sua característica de permitir, através do uso da modelagem numérica da CLA, a possibilidade de identificar quais são os vãos mais críticos quanto ao dados climáticos para o cálculo da ampacidade (com interesse especial em regiões com velocidade de ventos com intensidade menor que o valor de referência definido em normalização técnica) onde serão definidos os vãos críticos climatológicos -  $V_{cc}$ . Dessa forma, o cálculo da ampacidade via AmpCLA permite considerar, na fase de projeto, valores da amplitude do vento vão a vão em uma dada linha aérea. A falta de aplicação desse critério, em algumas raras situações, pode colocar a operação da linha aérea sob risco ou pode, no caso contrário, não se utilizar a máxima capacidade de transmissão de energia disponível dos condutores, pois, não se estaria considerando as condições reais da amplitude da velocidade do vento favoráveis ao resfriamento do condutor (velocidade dos ventos com intensidade acima do valor de referência).

Na AmpCLA a determinação da amplitude da velocidade do vento ao longo dos vãos da linha aérea, consiste de:

- regime permanente de processamento da CLA,
- uso das informações simuladas da CLA para atmosfera neutra, isto é, Número de Froude maior que 1000, em uma dada região geográfica de interesse, e que deve conter todos os vãos da linha aérea,
- uso de dados históricos de estações climatológicas para validação dos dados simulados da CLA,
- comparação dos resultados simulados e calculados com dados monitorados em tempo real para a etapa de validação.

Com essas novas características, a metodologia AmpCLA, a ser apresentada no item 3.3, torna-se mais complexa de ser processada, mas com certeza essa complexidade é justificável, uma vez que, o cálculo a ser gerado é mais preciso e seguro do que a prática corrente descrita na literatura sobre a ampacidade de linhas aéreas. A metodologia AmpCLA se baseia na metodologia LineAmps [DEB, 2000] com algumas diferenças, as quais são descritas a seguir.

### ***3.2 Metodologia LineAmps***

Em [DEB, 2000] foi definido o problema da ampacidade por meio das equações de (3.1 a 3.3), cujos parâmetros são mostrados na Tabela 3.1. A interpretação física dessas equações considera que a ampacidade máxima calculada para uma determinada linha aérea é a menor corrente elétrica, no instante  $t$ , entre todas as  $J$  seções da linha (vãos), que pode fluir sem ultrapassar a temperatura de projeto do condutor.

Para se obter uma precisão aceitável da aplicação da metodologia LineAmps é requerido o uso de diversas estações climatológicas espaçadas ao longo da linha aérea. Mas de forma prática, o custo de se instalar e manter várias estações climatológicas operando ao longo da linha aérea não é viável economicamente. A falta de dados pelo não monitoramento torna impreciso o cálculo de ampacidade para as regiões com condições climatológicas atípicas próximas à linha aérea.

$$\forall_l I_{l,t} = \min(I_{l,j,t}) \quad (3.1)$$

$$I_{l,j,t} = f(Ws_{k,j,t}, Wd_{k,j,t}, Ta_{k,j,t}, Sr_{k,j,t}, Tc_{l,j}, C_{l,j}, D_{l,j}) \quad (3.2)$$

$$Tc_{l,j} \leq T \max_{l,j} \quad (3.3)$$

Tabela 3.1 Parâmetros da Metodologia LineAmps (DEB, 2000).

Variável	Descrição
<i>I</i>	Ampacidade (Ampères)
<i>Ws</i>	Velocidade do Vento
<i>Wd</i>	Direção do Vento
<i>Ta</i>	Temperatura Ambiente
<i>Sr</i>	Radiação Solar
<i>Tc</i>	Temperatura do Condutor.
<i>C</i>	Tipo de Condutor
<i>D</i>	Direção da Linha Aérea
<i>L</i>	1,2,3,...,L: Linhas Aéreas
<i>J</i>	1,2,3,...,J: Seções da linha (vãos)
<i>T</i>	1,2,3, ..., T: Tempo
<i>K</i>	1,2,3, ..., K: Estações Climatológicas

### 3.3 Metodologia AmpCLA

A metodologia AmpCLA foi concebida utilizando-se de simulações da CLA e de observações sobre o comportamento de medições experimentais da velocidade do vento na região de Acuruí-MG. Para isso, as seguintes bases digitais de informações foram analisadas:

- base de dados com valores históricos da velocidade do vento, medidos com a utilização de oito estações climatológicas;
- banco de dados obtido com simulações numéricas da CLA;
- informações de projeto de uma linha aérea de 138 kV, utilizada para demonstrar a aplicação da AmpCLA.

#### 3.3.1 Etapas da Metodologia AmpCLA

A metodologia AmpCLA foi desenvolvida com base em dados de velocidade do vento, obtidos por meio de simulações da camada limite atmosférica, para determinação do conjunto de vãos críticos -  $V_c$ , e posterior cálculo da ampacidade. A metodologia AmpCLA pode ser resumida no seguinte conjunto de etapas:

- 1) Selecionar os parâmetros da linha aérea a ser estudada.
- 2) Discretizar o domínio de estudo, isto é, a região topográfica digitalizada contendo todos os vãos da linha aérea, utilizando um malhador apropriado.
- 3) Efetuar simulações da CLA para o domínio discretizado na etapa 2, utilizando as condições de fronteira apropriadas.
- 4) Identificar os Vãos Críticos Climatológicos –  $V_{cc}$ , a partir das menores amplitudes de velocidade do vento simuladas na etapa 3.
- 5) Identificar no projeto da linha os Vãos Críticos do ponto vista elétrico -  $V_{ce}$ .
- 6) Selecionar os vãos críticos não-dominados por meio da interseção do conjunto de vãos  $V_{ce}$  e  $V_{cc}$  e aplicação do critério de não-dominância. Armazenar o conjunto de vãos resultante em um vetor  $V_c$ .
- 7) Calcular a temperatura do condutor para o conjunto de vãos pertencentes ao conjunto  $V_c$  utilizando o método iterativo em regime permanente conforme descrito no Capítulo 2 e considerar a velocidade de vento calculada em  $V_{cc}$  conforme etapa 4.
- 8) Recalcular as distâncias livres no conjunto de vãos  $V_c$  utilizando a temperatura do condutor obtida na etapa 7.
- 9) Identificar o pior caso, isto é, de menor distância livre.
- 10) Calcular a ampacidade final da linha para o vão crítico identificado na etapa 9.

Esta metodologia tem a vantagem de permitir a identificação do(s) vão(s) crítico(s) sem a necessidade de monitoramento de nenhum vão da linha aérea. Uma vez encontrado o vão crítico pode-se agora monitorar a temperatura do condutor através de um sensor tipo Power Donut [Do Nascimento, 2008c] e calcular a ampacidade em tempo real. O custo financeiro do monitoramento fica extremamente reduzido em relação às outras metodologias, pois se espera que o número de vãos críticos seja pequeno quando comparado com o número total de vãos da linha aérea.

### **3.3.2 Modelo Matemático da AmpCLA**

A construção da nova modelagem matemática AmpCLA, proposta nessa tese, foi derivada de (3.1 e 3.2). Esta modelagem considera a influência climatológica em todos os vãos da linha

aérea a partir da simulação numérica da CLA e possibilita incluir os riscos térmicos no processo de cálculo conforme requer o método estatístico de ampacidade.

As duas equações representativas da metodologia AmpCLA, tendo como base as equações (3.1 e 3.2), são (3.4 e 3.5):

$$\forall_l AmpCLA_{l,t} = \min(I_{l,j,t}) \quad (3.4)$$

$$I_{l,j,t} = f(PC_{k,j,t}, Tc_{l,j}, C_{l,j}, R_{l,j}) \quad (3.5)$$

Tabela 3.2 Parâmetros da Metodologia AmpCLA

Variável	Descrição
AmpCLA	Ampacidade (Ampères)
PC	Parâmetros climatológicos: Amplitude de Velocidade do Vento, Direção do Vento, Temperatura Ambiente e Radiação Solar
Tc	Temperatura do Condutor.
C	Tipo de Condutor
R	Risco Térmico em percentual de Violação da Temperatura do Condutor
L	1,2,3,...,L: Linhas Aéreas
J	1,2,3,...,J: Vãos das Linhas Aéreas
T	1,2,3,...,T: Hora do Dia
K	1,2,3,...,K: Volume de controle gerado pelo estudo da CLA correspondente ao "j" vão da linha

### 3.4 Processamento Computacional da CLA

A simulação da CLA foi realizada no âmbito dessa tese utilizando sistema computacional CFX da ANSYS. A metodologia de simulação consistiu dos seguintes pontos:

- 1) condição de contorno logarítmica com valor de referência da velocidade do vento definido a 10 metros de altura do solo e igual a 1 (m/s), conforme (2.24);
- 2) direção do vento em relação à referência geográfica segundo os seguintes ângulos de incidência (45; 135; 225; 315°C) (veja Figura 3.1);
- 3) atmosfera neutra, isto é, número de Froude superior a 1000;
- 4) rugosidade da região considerada constante para vegetação tipo grama;
- 5) regime permanente de processamento da CLA.

Foram realizadas quatro simulações, uma para ângulo de incidência do domínio. Após as simulações, foram identificados os vãos críticos climatológicos da linha aérea, isto é, quais

vãos possuíam velocidade do vento inferior a 1 (m/s). Naturalmente, maior número de ângulos de incidência poderia ser considerado para maior precisão na determinação do conjunto de vãos críticos climatológicos.

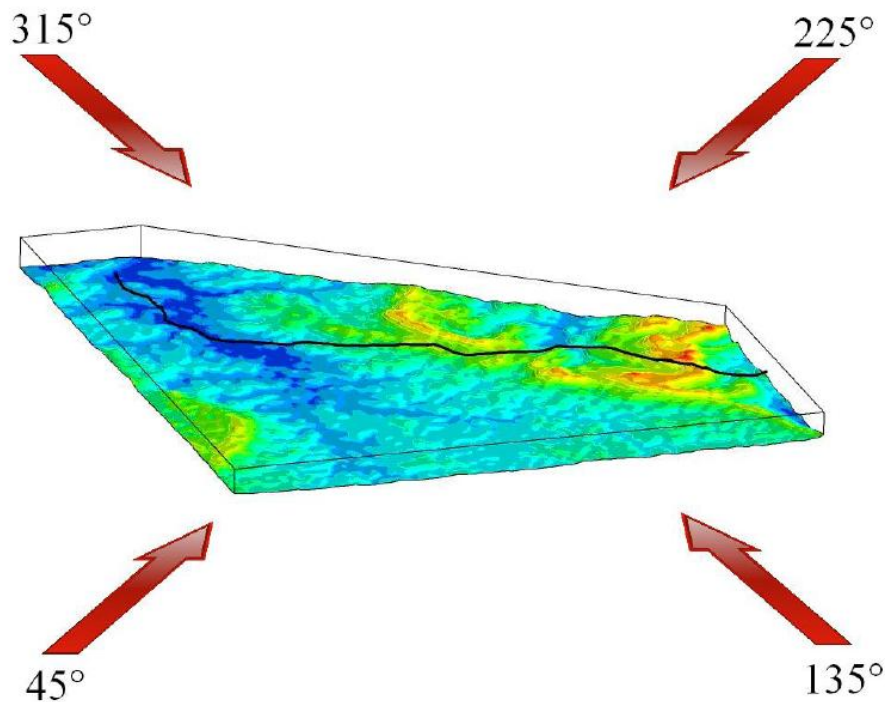


Figura 3.1 Domínio de simulação com os ângulos de incidência do vento.

### **3.4.1 Critério para Localização do Vão Crítico**

Para realizar o cálculo da Ampacidade via metodologia AmpCLA é necessário definir um critério técnico para localização do vão crítico da linha aérea [Do NASCIMENTO, 2008b], conforme interseção dos seguintes fatores:

- $V_{ce}$  Vão Crítico Elétrico (conforme ilustração na Figura 3.2);
- $V_{cc}$  Vão Crítico Climatológico (conforme exemplo mostrado na Figura 3.3);

A Figura 3.3 mostra como pode ser identificado o Vão Crítico Climatológico -  $V_{cc}$ . A estação “Local\_V3” possui o menor perfil médio de velocidade de vento e sendo assim, todos os vãos da linha aérea sob essa região de influência da estação “Local\_V3” estarão sujeitos a um

perfil térmico do condutor mais elevado, uma vez que, a corrente ao longo da linha é a mesma. Os dados climatológicos são da estação de Belo Horizonte – MG (COA-BH).

Dessa forma, com a aplicação da interseção das informações contidas nas Figuras 3.2 e 3.3 é possível obter a Figura 3.4, que sintetiza a região onde estará o vão mais crítico da linha aérea.

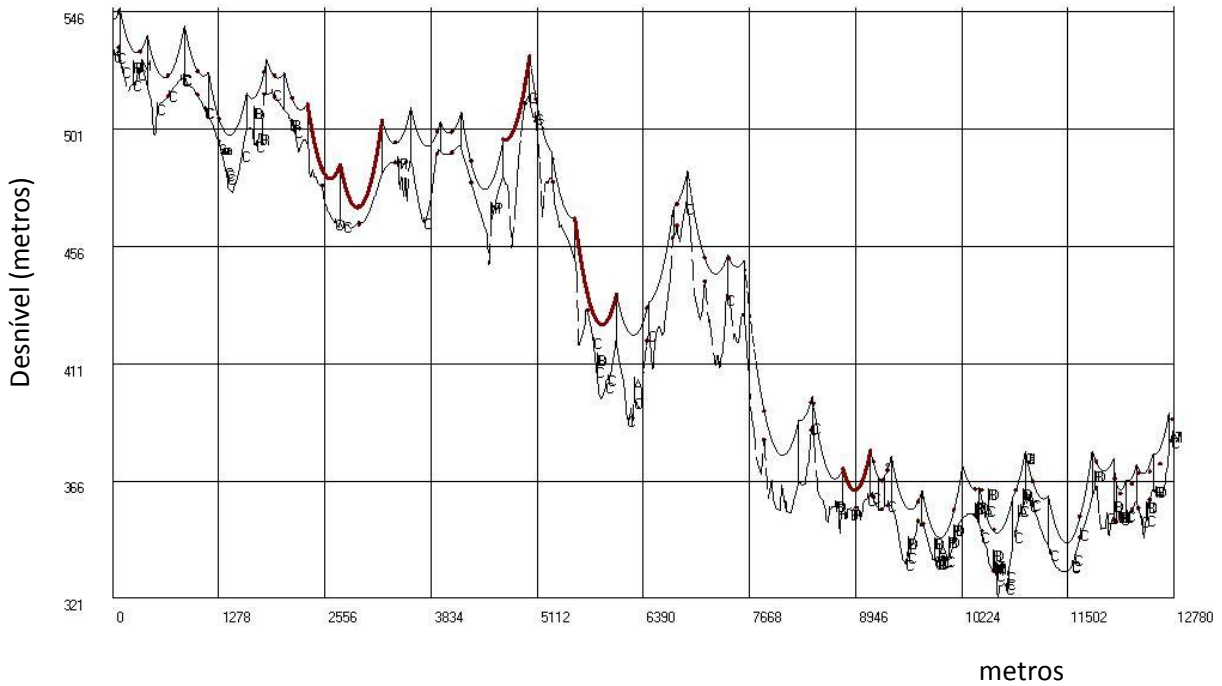


Figura 3.2 Perfil do terreno e planta da linha aérea com as localizações dos vãos críticos elétricos – Vce (linha cheia).

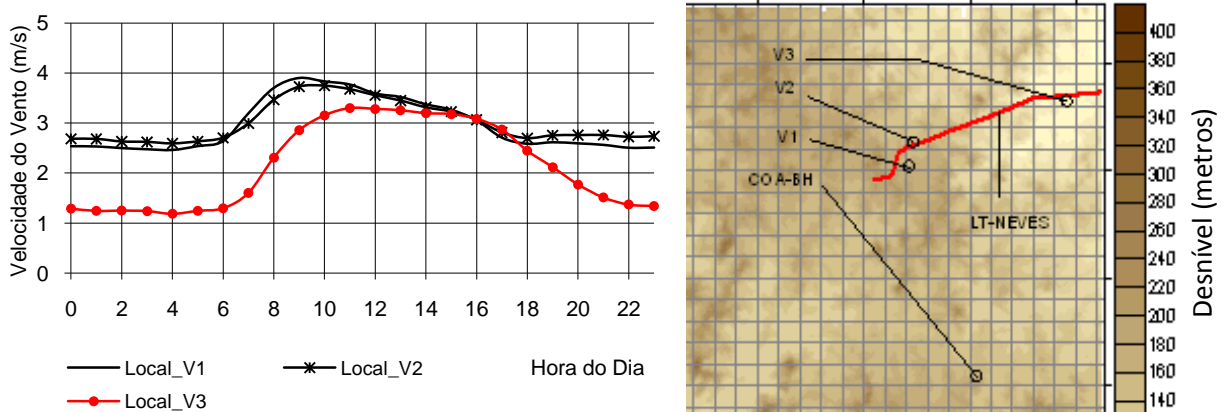


Figura 3.3 Valores experimentais médios de velocidade de vento e localização na planta da linha aérea.

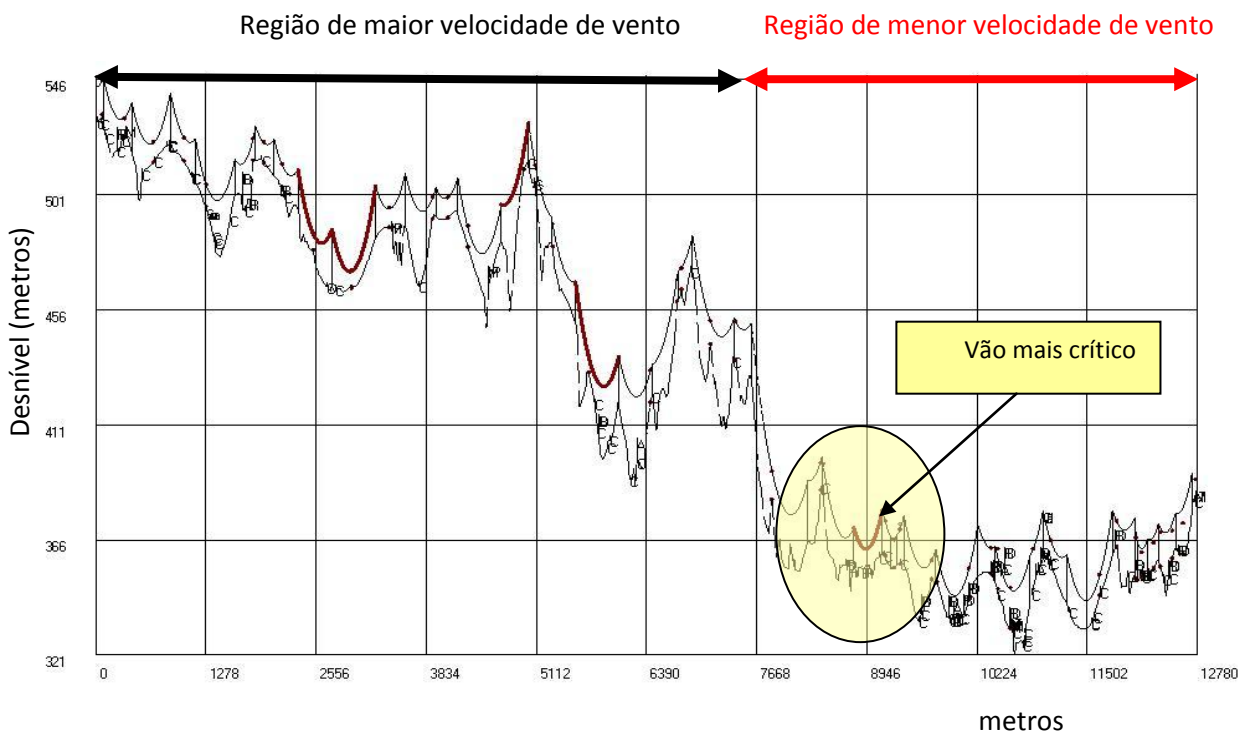


Figura 3.4 Perfil e Planta com a Interseção do Vão mais Crítico da Linha Aérea.

A determinação do conjunto de vãos críticos é importantíssima, pois se ocorrer alguma falha, com certeza a grande probabilidade é de que ocorra em um destes vãos. A definição de vão crítico juntamente com os fatores que os influenciam são elegantemente discutidos em [G.J. RAMON, 1987]. Basicamente os vãos críticos são aqueles que possuem a menor velocidade de vento e concomitantemente possuem a menor distância livre entre o condutor e o objeto aterrado mais próximo.

Na metodologia AmpCLA, a determinação dos vãos críticos é implementada de forma original e de baixo custo se comparada com o monitoramento ao longo de toda a linha, conforme mencionado em [G.J. RAMON, 1987]. A diferença basicamente consiste nos valores de velocidade considerados, pois na metodologia proposta, o vão crítico em termos da velocidade do vento é identificado através de simulação da camada limite da atmosfera, com condição de fronteira prescrita ( $v = 1$  (m/s) e no mínimo quatro direções de incidência no domínio de simulação). Os vãos que possuírem velocidades menores que 1 (m/s) são

considerados vãos críticos climatológicos. Este valor de velocidade de referência é um critério técnico dependente da região do planeta considerada.

Matematicamente, seja  $V_{ce}$  o conjunto de vãos críticos elétricos quanto à distância livre, isto é, são vãos que possuem distância livre inferior a uma determinada distância de referência; e  $V_{cc}$  o conjunto de vãos críticos climatológicos, isto é, são vãos com menor valor de velocidade do vento<sup>3</sup>.

Observe que um vão pertencente a  $V_{ce}$  é provavelmente um vão com maior probabilidade de violação da distância mínima de segurança entre condutor – objeto aterrado mais próximo do que um vão não pertencente a  $V_{ce}$ . Portanto, um vão pertencente a  $V_{ce}$  possui maior risco de falha elétrica. Por outro lado, um vão que pertença a  $V_{cc}$  possui menor capacidade de refrigeração do condutor e, portanto, maior risco térmico.

Os vãos que pertencem a ambos os conjuntos  $V_{cc}$  e  $V_{ce}$  formam o conjunto  $V_{c \cap e}$  de vãos da linha aérea. Matematicamente,  $V_{c \cap e}$  é o conjunto formado pela interseção entre os conjuntos  $V_{cc}$  e  $V_{ce}$ .

$$V_{c \cap e} = V_{ce} \cap V_{cc} \quad (3.6)$$

Sobre o conjunto de vãos  $V_{c \cap e}$  deve-se ainda excluir os vãos dominados ao se aplicar o critério de não-dominância<sup>4</sup> quanto à velocidade do vento e distância livre. Isto é, deve-se excluir o vão que comparativamente com qualquer outro pertencente ao conjunto  $V_{c \cap e}$  tenha maior valor de velocidade do vento e altura livre. O resultado da aplicação do critério de não-dominância constitui o conjunto de vãos críticos da linha e será denominado de conjunto  $V_c$ .

Observe que os vãos pertencentes a  $V_c$  constituem uma fronteira não-dominada e são aqueles que possuem concomitantemente as menores distâncias livres e as menores velocidades de vento dentre todos os vãos da linha aérea. Isto é, são os vãos críticos do

---

<sup>3</sup> ângulo de ataque de 90° em relação ao eixo do condutor.

<sup>4</sup> um vetor  $u = (u_1, \dots, u_k)$  domina um outro vetor  $v = (v_1, \dots, v_k)$  (representado por  $U \leq V$ ) se e somente se  $u$  é parcialmente menor que  $v$ . Isto é,  $\forall i \in \{1, \dots, k\}, u_i \leq v_i$  e  $\exists i \in \{1, \dots, k\} | u_i < v_i$ .

ponto de vista do risco de falha, isto é, risco térmico ou elétrico.

Uma vez determinado o conjunto de vãos críticos  $V_c$ , deve se então determinar o vão mais crítico, através do cálculo da temperatura do condutor de cada um destes vãos e sua nova distância livre correspondente. O vão que apresentar a menor distância livre dentre todos os vãos pertencentes a  $V_c$  e ainda se aproximar da distância mínima de segurança é o vão mais crítico de toda a linha aérea.

### ***3.5 Implementação Computacional da AmpCLA***

A implementação computacional da metodologia AmpCLA utilizou uma estrutura de dados da base relacional da linguagem SQL/ACCESS. A Tabela 3.3 apresenta uma visão macro dos principais componentes do modelo computacional distribuídos entre: entradas, processos e saídas. Estes componentes são sucintamente descritos a seguir e uma descrição mais detalhada é apresentada no Apêndice E.

Tabela 3.3 Diagrama do modelo computacional AmpCLA.

<b>1.Entradas</b>	<b>2.Processos</b>	<b>3.Saídas</b>
Dados Climatológicos (medidos e Simulados)	Perfil Térmico Condutor	Resultados do Perfil Térmico do Condutor
Sazonalidade dos Dados Climatológicos	Distribuição Estatística do Perfil Térmico Condutor	Resultados dos momentos estatísticos do Perfil Térmico do Condutor
Características dos Condutores	Análise dos Riscos Estatísticos	Curva da pdf do Perfil Térmico do Condutor
Características de Projeto da Linha	Mudança de Estado do Condutor	Resultados da Mudança de Estado da Linha
Características Operativas da Linha	Cálculo da Ampacidade	Identificação dos vãos críticos da Linha
Características das Simulações	Cálculo do Fator de Correção da Ampacidade	Resultados de Ampacidade
Dados Monitorados na Linha		

### **3.5.1 Entradas**

Para facilitar a manipulação e o armazenamento das diversas fontes de dados, o modelo computacional AmpCLA foi construído no padrão SQL como arquitetura da base de dados. Os dados de entrada estão detalhados e descritos de forma sucinta nos itens a seguir.

#### **3.5.1.1 Parâmetros Climatológicos**

Os parâmetros climatológicos podem ser obtidos a partir de estações remotas instaladas em campo ou obtidos indiretamente através da simulação numérica da CLA para uma determinada região onde estiver inserida a linha aérea de interesse.

#### **3.5.1.2 Sazonalidade dos Dados Climatológicos**

A sazonalidade na AmpCLA é aplicada na base de informações climatológicas para identificar períodos do ano, meses ou horas do dia que tenham padrões similares. Basicamente, a sazonalidade pode ser dividida em:

- período completo (todos os registros sem distinção de sazonalidade),
- período do ano (distinção entre verão e inverno);
- período do dia (distinção entre noite (radiação solar nula) e dia (radiação solar forte)),
- ou, definir outro padrão de agrupamento dos dados.

Dessa forma, a definição da sazonalidade é obtida de forma exploratória, isto é, os períodos são estudados e identificados a priori pelo meteorologista, projetista ou operador da linha aérea. Nas regiões onde ocorrer alterações climáticas significativas ao longo da linha aérea, a sazonalidade será fator fundamental de modelagem de cálculo para melhorar a segurança e a exploração máxima de ampacidade.

#### **3.5.1.3 Outras Entradas**

As características construtivas dos condutores são obtidas a partir dos catálogos dos fabricantes. As características de projeto e de operação são obtidas na documentação

técnica da linha aérea. Os dados característicos utilizados nas simulações são classificados de forma a identificar e ordenar as diversas possibilidades dos parâmetros utilizados no cálculo da ampacidade, tais como: conjunto das estações climatológicas utilizadas, dados do condutor, os parâmetros climatológicos, as faixas de variação de corrente, e dentre outros parâmetros. Todas essas informações são cadastradas em tabelas relacionais de dados tipo SQL, o que facilita o processamento computacional em função da elevada quantidade de parâmetros utilizados no cálculo da AmpCLA.

### **3.5.2 Processos**

Os processos são constituídos por métodos, critérios ou parâmetros adotados para o cálculo da ampacidade e são detalhados a seguir.

#### **3.5.2.1 Perfil Térmico do Condutor**

Este processo é responsável pelo cálculo da temperatura do condutor em regime permanente [MORGAN, V.T., 1982]. O regime permanente é o método recomendado para a fase de projeto, que utiliza os parâmetros climatológicos e variações na corrente da linha aérea de forma prescrita, conforme a seguir:

- Variação de 0,1 PU entre o intervalo de 0,2 a 2 PU na corrente elétrica do condutor,
- Temperatura Ambiente: variação de 1°C entre o intervalo de 0 a 45°C,
- Radiação Solar: sem radiação (noite = 0 w/m<sup>2</sup>) entre 18 e 06 h e com radiação (dia = 1000 w/m<sup>2</sup>) entre 06 e 18 h,
- Velocidade de Vento: Variação de 0,1 m/s entre o intervalo de 0 a 1 m/s e variação de 1 m/s entre 1,5 e 9,5 m/s.
- Direção do Vento: 90° de ângulo de ataque do vento em relação ao condutor.

#### **3.5.2.2 Distribuição Estatística do Perfil Térmico Condutor**

A distribuição estatística do perfil térmico do condutor é obtida através da curva normal e da log-normal. Esses ajustes são aplicados aos valores simulados do perfil térmico do condutor,

a partir de variações na corrente e nas variações climatológicas esperadas para a região da linha.

Para isso, é necessário calcular os momentos estatísticos de cada perfil térmico do condutor, isto é, a média e o desvio padrão são calculados levando em conta as variações climatológicas para vários níveis de corrente elétrica da linha. Por último, ajustes estatísticos são aplicados para melhorar a precisão da curva de distribuição de temperatura do condutor. Os ajustes normalmente aplicados são: normal, log-normal e log-normal a três parâmetros.

### ***3.5.2.3 Análise dos Riscos Térmicos***

O processo de análise dos riscos térmicos irá selecionar, dentre os vários perfis térmicos simulados para diversas correntes, qual será a corrente da linha que não irá exceder um determinado risco térmico requerido, isto é, qual é a corrente que não irá exceder uma dada temperatura do condutor para um risco térmico máximo permitido.

### ***3.5.2.4 Cálculo das Distâncias Elétricas***

A distância elétrica é calculada por meio da mudança de estado do condutor, que está relacionada à característica construtiva do condutor (peso por unidade de comprimento, deformação mecânica e dilatação térmica). A formulação matemática está baseada na função catenária e às condições de mudança no carregamento térmico e mecânico do condutor.

### ***3.5.2.5 Cálculo da Ampacidade***

A ampacidade determinística é calculada sob o regime permanente, conforme equações mostradas no item 2.2 do capítulo 2. A ampacidade probabilística usa a mesma modelagem de cálculo determinístico conforme item 2.6.2, mas difere em dois fatores básicos:

- usa a distribuição estatística dos históricos da velocidade do vento e da temperatura ambiente, integradas em média horária, para uma determinada estação climatológica mais próxima da linha aérea;

- considera os riscos térmicos máximos durante o cálculo da ampacidade.

### **3.5.2.6 Definição do Fator de Correção da Ampacidade**

Uma vez encontrado o vão mais crítico de uma dada linha aérea, a tarefa adicional na metodologia AmpCLA é obter um fator de correção (Fc) da ampacidade calculada, que permita refletir a influência climatológica desse vão crítico em toda a linha.

O fator de correção proposto é definido em (3.7) como sendo a razão entre os valores de ampacidade determinísticas calculadas para o vão crítico ( $I_{vc}$ ) e para um vão normal de referência ( $I_{Ref}$ ).

$$Fc = I_{vc} / I_{Ref} \quad (3.7)$$

onde:

$I_{vc}$  Ampacidade calculada em função dos dados medidos ou simulados para o vão crítico da linha (Ampères)

$I_{Ref}$  Ampacidade determinística calculada com os dados de referência (Ampère).  
Parâmetros climatológicos constantes: Velocidade do Vento (1 m/s), Ângulo de ataque do Vento (90º) em relação ao condutor, Temperatura Ambiente (30ºC) e Radiação Solar (1000 W/m<sup>2</sup>)

Fc Fator de Correção.

Para corrigir o cálculo da ampacidade no vão crítico, pelo método estatístico, o fator de correção deve ser considerado e aplicado da mesma forma para ambos os regimes normal e de emergência. Assim,

$$I = Fc \cdot I_{Ref} \quad (3.8)$$

onde I é a ampacidade corrigida da linha aérea (Ampères), para o método estatístico.

### **3.5.3 Saídas**

O modelo computacional AmpCLA disponibiliza no pós-processamento informações na forma de relatórios técnicos e gráficos que podem ser utilizados para a elaboração do projeto e para a operação das linhas aéreas. Os principais resultados disponibilizados são:

- perfil térmico condutor;
- momentos estatísticos do perfil térmico do condutor;
- pdf do perfil térmico do condutor;
- pdf ajustada do perfil térmico do condutor;
- mudança de estado da linha;
- vãos críticos da linha;
- ampacidade.

### **3.6 Conclusão**

A dificuldade para se desenvolver e validar um novo método de cálculo da ampacidade que seja conjuntamente mais seguro e mais realista esbarra, de um lado, na falta de dados climatológicos distribuídos ao longo dos vãos da linha aérea, e, de outro, no elevado custo operacional para manter essa base de informação atualizada.

A metodologia AmpCLA apresentada nesse capítulo, apesar da sua complexidade inicial frente às metodologias tradicionais, representa um avanço científico considerável. A possibilidade de simular e investigar a amplitude da velocidade do vento ao longo de todos os vãos da linha aérea possibilita melhorar o nível da segurança operacional e, para algumas regiões com clima favorável ao resfriamento do condutor, aumentar significativamente a ampacidade da linha aérea.

# 4 Aplicação da Metodologia AmpCLA – Caso Teórico

## 4.1 Introdução

Esse capítulo tem por objetivo apresentar uma visão geral da aplicação da metodologia AmpCLA em dois casos teóricos, quanto à região, na fase de projeto de uma linha aérea hipotética: i) relevo plano e sem obstáculos naturais (veja Figura 4.1) e ii) relevo não plano (veja Figura 4.2). Estes dois problemas são identificados ao longo do texto como:

- Problema PPP: problema onde a região possui perfil e planta planos e sem obstáculos naturais (Figura 4.1).
- Problema PPNP: problema onde a região possui perfil e planta com relevo não-plano (Figura 4.2).

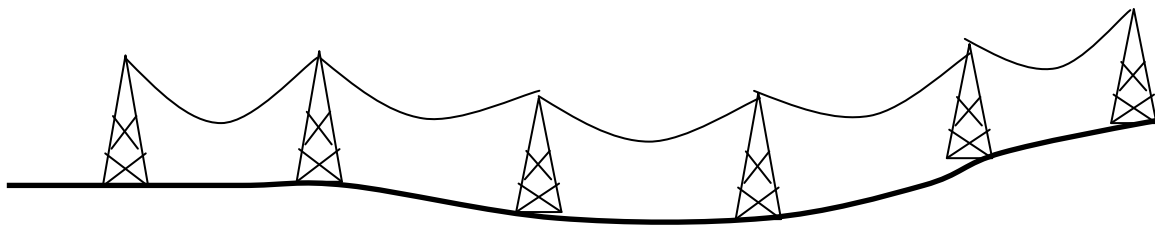


Figura 4.1 Representação do perfil e planta plano (PPP) da linha hipotética.

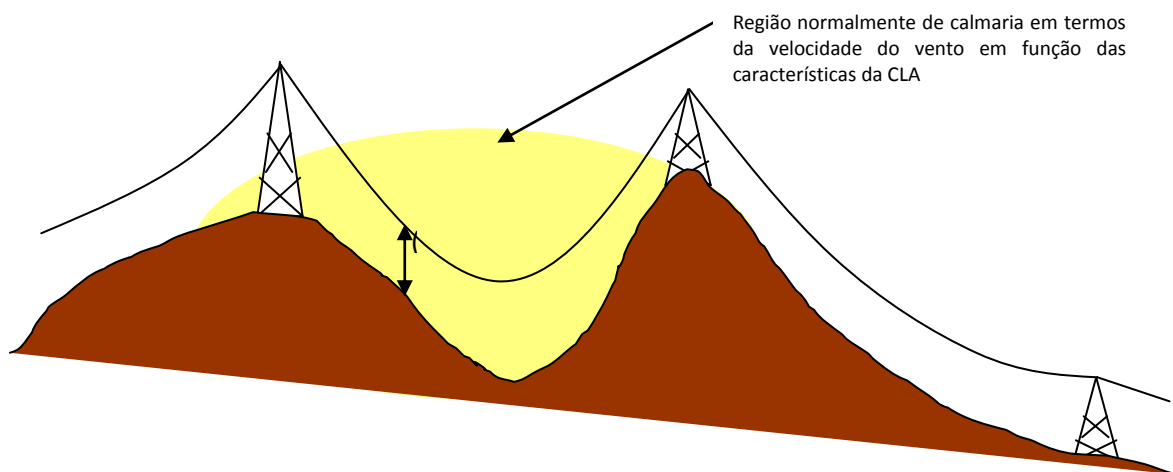


Figura 4.2 Representação do perfil e planta não-plano (PPNP).

## 4.2 Parâmetros de Aplicação

Na análise dos problemas PPP e PPNP foram consideradas as seguintes grandezas para o projeto de uma linha aérea típica:

Condutor tipo LINNET 336	(MCM)
Tensão da linha = 138	(kV)
Radiação solar = 1000	(W/m <sup>2</sup> )
Velocidade do vento PPP = 1	(m/s)
Velocidade do vento PPNP = 0,5	(m/s)
Ângulo de ataque do vento em relação ao condutor = 90	(°)
Temperatura ambiente = 30	(°C)
Temperatura normal do condutor = 60	(°C)
Temperatura de emergência do condutor = 80	(°C)
Risco térmico para temperatura normal de projeto = 15	(%)
Risco térmico para temperatura limite de projeto = 1	(%)
Risco térmico para temperatura de emergência = 5	(%)
Estação meteorológica de medição de velocidade do vento (SE Ouro Preto 1)	(---

## 4.3 Problema PPP

O relevo da região do problema PPP é considerado plano e, portanto, a velocidade do vento pode ser considerada constante ao longo dos vãos da linha aérea. Nessa condição, o cálculo da ampacidade é realizado conforme a prática mais comum, isto é, pode-se aplicar o método determinístico ou estatístico de cálculo da ampacidade para apenas um vão e extrapolá-lo para o restante dos outros vãos da linha aérea. Fisicamente, no projeto de uma linha aérea, quando a região ao longo da linha aérea é plana (PPP), os vãos são similares e com isso as alturas elétricas também são similares.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos resultados obtidos para o cálculo da ampacidade determinística e estatística, onde os valores da última linha dessa tabela são das correntes elétricas dadas em PU (1 PU = 530 A).

Tabela 4.1 Resultados obtidos para o problema PPP.

Determinístico		Estatística		
Regime Normal 60°C	Emergência 80°C	Regime Normal 60°C 15% risco térmico	Regime Normal 80°C 1% risco térmico	Emergência 80°C 5% risco térmico
0,83	1,12	1,24	1,13(*)	1,33

(\*) Por critério de segurança, o menor valor de corrente (1,13 PU) a 80°C, calculado no regime normal, define a ampacidade estatística no regime normal.

A Figura 4.3 apresenta as curvas dos resultados obtidos para a ampacidade determinística, com os limites de temperatura de projeto da linha em regime normal ou temperatura de referência igual 60°C (TR=60°C), e em emergência ou temperatura limite de referência igual a 80°C (TLR=80°C).

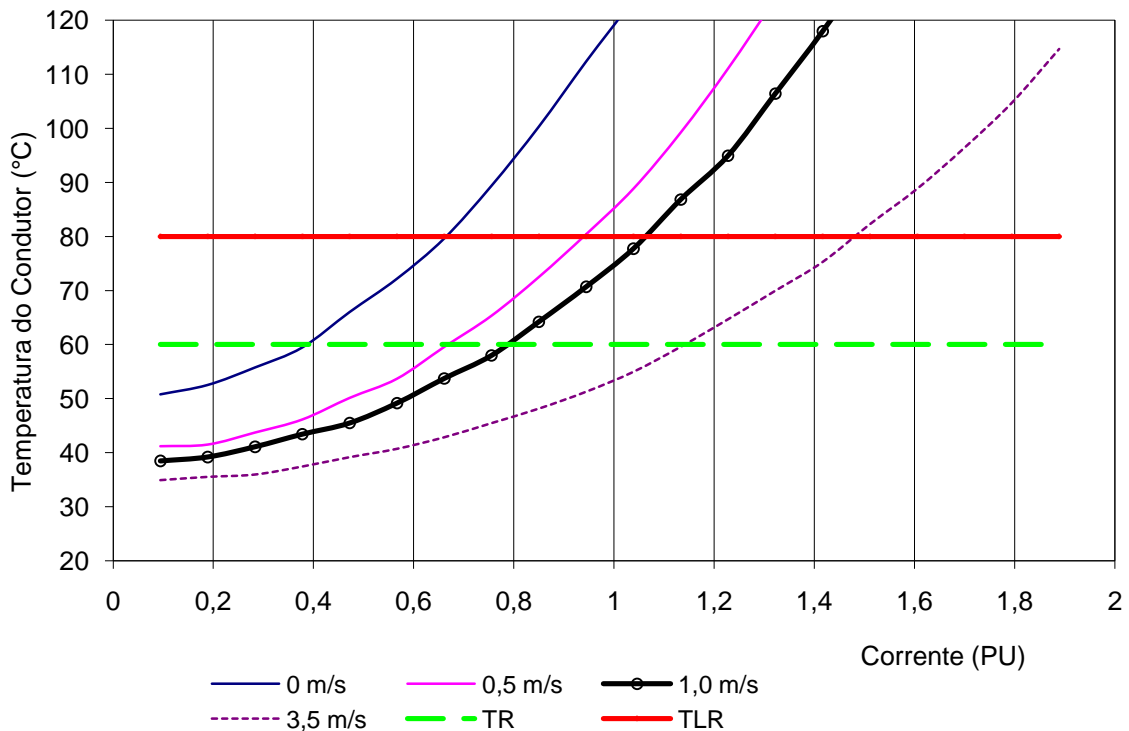


Figura 4.3 Ampacidade determinística calculada para a o problema PPP.

A Figura 4.4 apresenta algumas curvas (1-cdf) para diversos valores de corrente em PU em função dos riscos térmicos. A Figura 4.5 apresenta com mais detalhes os riscos térmicos amplificados até a faixa de 20%. Essa faixa de variação, dependendo dos valores dos riscos térmicos assumidos conforme Tabela 4.1, define a ampacidade estatística nas condições normal e de emergência.

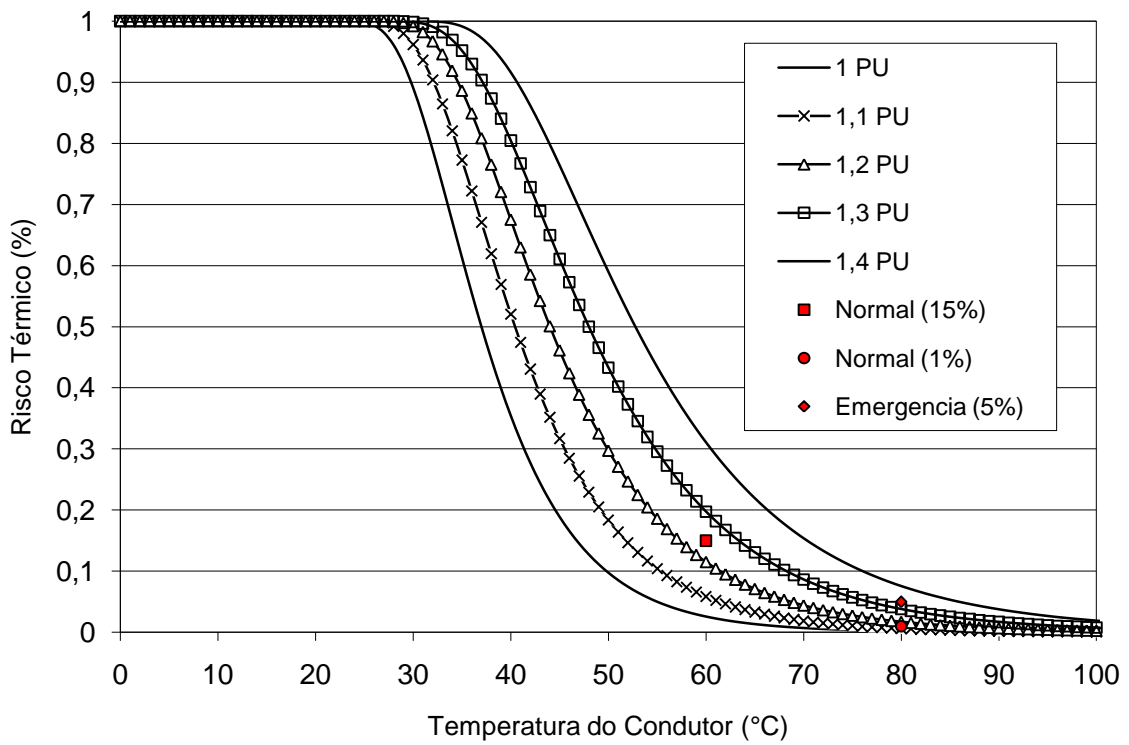


Figura 4.4 Curvas ajustadas Log-Normal do perfil térmico do condutor versus risco térmico.

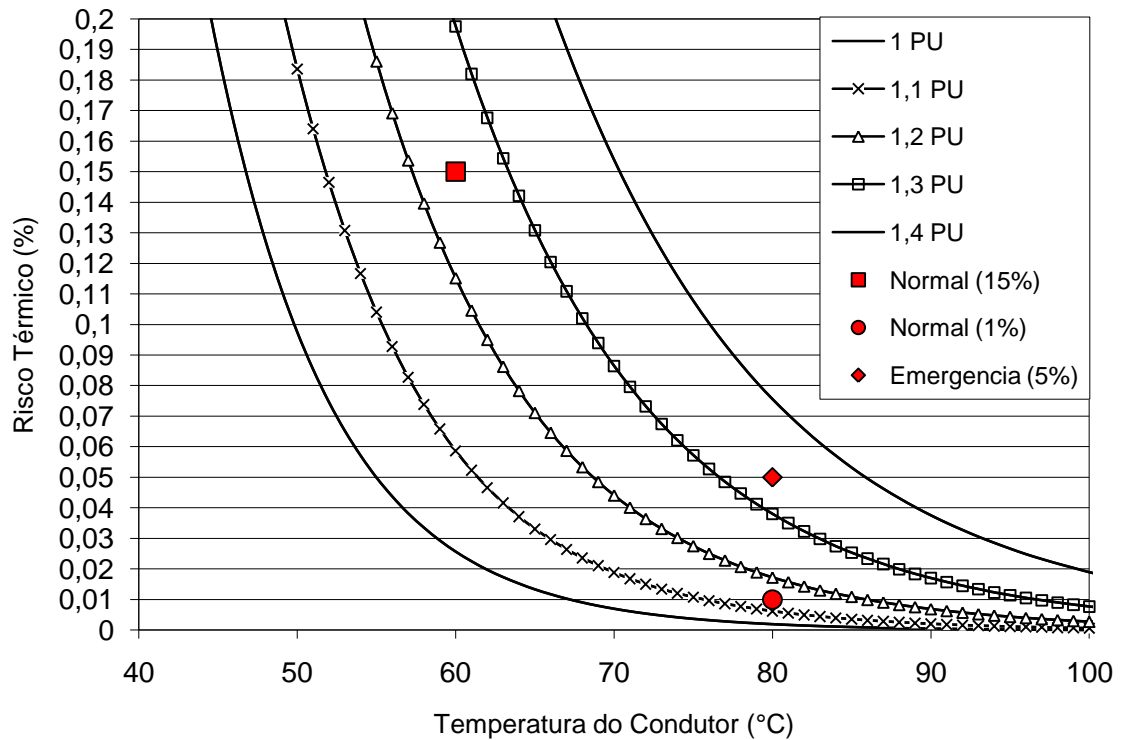


Figura 4.5 Região de Definição da Ampacidade Estatística em Função do Risco Térmico.

#### **4.4 Problema PPNP**

Se ao longo dos vãos da linha aérea, a variação do desnível gerar depressões na topografia do terreno, é esperado o surgimento da estagnação da velocidade do vento devido ao efeito do relevo. Por exemplo, em regiões com depressões ou obstáculos naturais na topografia do terreno, que serão identificadas na simulação da CLA como regiões (PPNP), normalmente a velocidade do vento tende a ser inferior ao valor de referência na condição de contorno prescrito da CLA. Neste contexto, o procedimento adotado para considerar essa característica na fase de projeto da linha aérea é localizar onde se encontram os vãos críticos elétricos ao longo da linha aérea. A partir desses vãos críticos e com o mapeamento de regiões com estagnação da velocidade do vento, isto é, vãos críticos climatológicos identificados a priori no estudo da CLA, o projetista terá controle sobre quais serão os vãos mais críticos. Esses vãos são definidos conforme (3.6) pela coincidência dos seguintes fatores:

- intensidade de velocidade de vento inferior ao valor da condição de contorno prescrito (estagnação da velocidade do vento)
- distância elétrica mínima do condutor ao solo ou a outros obstáculos aterrados.

A interseção dessas duas condições acima, isto é, após localizar os vãos eletricamente mais críticos da linha aérea e as regiões ou vãos de estagnação da velocidade do vento na CLA próximos à linha aérea, o cálculo da ampacidade via metodologia AmpCLA é realizado com base nas informações desses vãos. O vão mais crítico irá definir a maior ampacidade possível para toda a linha aérea.

Para apresentar os resultados hipotéticos do problema (PPNP), foi proposta como análise uma redução na amplitude da velocidade do vento de 1 para 0,5 m/s (50% de redução) em relação ao problema (PPP), supondo uma estagnação da velocidade do vento na CLA conforme hipótese mostrada na Figura 4.2. Os outros parâmetros de cálculo foram mantidos os mesmos. A relação percentual entre a ampacidade determinística calculada nos problemas PPP e PPNP define o valor do Fator de Correção -  $F_c$  da ampacidade.

## 4.5 Cálculo do Fator de Correção - Fc

A partir das informações da Figura 4.3, são mostrados na Tabela 4.2 os resultados obtidos para os valores calculados para a ampacidade determinística nas regiões PPP e PPNP. Esses valores são utilizados para o cálculo do fator de correção Fc, conforme (3.7).

Tabela 4.2 Ampacidade Determinística em PU.

Região PPP (Velocidade do vento (1 m/s))		Região PPNP (50% de redução na velocidade do vento (de 1 m/s para 0,5 m/s))	
Regime Normal 60°C	Emergência 80°C	Regime Normal 60°C	Emergência 80°C
0,83	1,12	0,70	0,99

$$F_{C_{\text{regime normal}}} = 0,7 / 0,83$$

$$F_{C_{\text{regime normal}}} = 0,843$$

$$F_{C_{\text{regime emergência}}} = 0,99 / 1,12$$

$$F_{C_{\text{regime emergência}}} = 0,884$$

Dessa forma, a Tabela 4.3 apresenta os resultados das ampacidades devido a ambos os métodos, determinístico e estatístico, para o problema PPNP. Observe que as ampacidades do método estatístico são corrigidas pelo fator Fc aplicado sobre os resultados Tabela 4.1.

Tabela 4.3 Resultados Obtidos para o Problema (PPNP).

Determinístico		Estatístico FC = [Fator de Correção]		
Regime Normal 60°C	Emergência 80°C	Regime Normal 60°C 15% risco térmico	Regime Normal 80°C 1% risco térmico	Emergência 80°C 5% risco térmico
0,70	0,99	1,05 [84,3%]	*1,00 [84,3%]	1,17 [88,4%]

Nota: \* - Por critério de segurança, o menor valor de corrente (**1,00 PU = 530 A**) calculado define a ampacidade estatística no regime normal.

## 4.6 Análise dos Resultados

Uma forma de avaliar a metodologia AmpCLA é comparar o significado dos resultados obtidos entre os problemas PPP e PPNP. Algumas constatações sobre esses resultados emergem da análise dos dados contidos na Tabela 4.4 e na Figura 4.6 que são apresentadas de forma descritivas no próximo item.

#### **4.6.1 Ampacidade Determinística**

A ampacidade determinística não depende diretamente da qualidade dos dados climatológicos disponíveis, mas por outro lado, depende dos parâmetros climatológicos em sua grande parte conservadores e largamente utilizados com pouca variação pela literatura técnica. Dessa forma, algumas constatações são analisadas a seguir:

- No problema PPP, a ampacidade determinística não sofre influência da CLA em função do relevo plano da linha aérea.
- No problema PPNP, por outro lado, a ampacidade determinística é sensível à topografia não plana. Dessa forma, será necessário localizar os vãos mais críticos em relação às simulações dos ventos, e a partir disso, realizar o cálculo da ampacidade para esses vãos. Conforme foi mostrado no caso hipotético de 50% de redução na velocidade do vento (de 1 m/s para 0,5 m/s) na Tabela 4.3, onde obteve-se redução de 15,7% (no regime normal), e de 11,7% (no regime em emergência) em relação aos valores calculados para o problema PPP. Esses valores de redução de ampacidade são expressivos, e quando ocorrerem devem ser considerados em função de melhoria na segurança operacional da linha aérea.

#### **4.6.2 Ampacidade Estatística**

A ampacidade estatística depende diretamente da qualidade dos dados climatológicos adquiridos preferencialmente nas proximidades da linha aérea, e se possível, no vão mais crítico, o que normalmente não é viável tecnicamente (local sem sinal ou meio de comunicação dos dados ou região com alto índice de vandalismo). Dessa forma, algumas constatações são analisadas a seguir:

- No problema PPP, a ampacidade estatística explora melhor as condições climatológicas favoráveis ao resfriamento do condutor, e sendo assim, um aumento considerável de ampacidade é possível de ser obtido. Conforme mostrado na Tabela 4.4 a seguir, é obtido um aumento de aproximadamente 36% (no regime normal), e de 19% (no regime em emergência) em relação aos

valores calculados de forma determinística para o problema PPP. Esses valores de aumento de ampacidade são expressivos, e representam ganhos para as empresas. Como a região é plana PPP, qualquer estação climatológica próxima à linha aérea poderia ser utilizada para o cálculo estatístico da ampacidade.

- No problema PPNP, a ampacidade estatística ainda apresenta maiores ganhos percentuais em relação à ampacidade determinística. Conforme mostrado na Tabela 4.4, obteve-se um aumento de 43% (no regime normal), e de 18% (no regime em emergência) em relação aos valores calculados de forma determinística para o problema PPNP. Esses valores de aumento de ampacidade, embora hipotéticos, são expressivos e descortinam a possibilidade de se poder maximizar a capacidade de transmissão de linhas aéreas através da sua utilização em conjunto com o monitoramento dos vãos críticos.

Tabela 4.4 Comparação dos Valores Calculados das Ampacidades em PU – Problemas PPP e PPNP.

Ampacidade Determinística				Ampacidade Estatística			
Região PPP		Região PPNP		Região PPP		Região PPNP	
Regime Normal	Regime Emergência	Regime Normal	Regime Emergência	Regime Normal	Regime Emergência	Regime Normal	Regime Emergência
0,83	1,12	0,70	0,99	1,13 *	1,33	1,0	1,17

(\*) Por critério de segurança, o menor valor de corrente (1,13 PU) a 80°C, calculado no regime normal, define a ampacidade estatística no regime normal.

A Figura 4.6 mostra na forma de gráfico os resultados obtidos na Tabela 4.4.

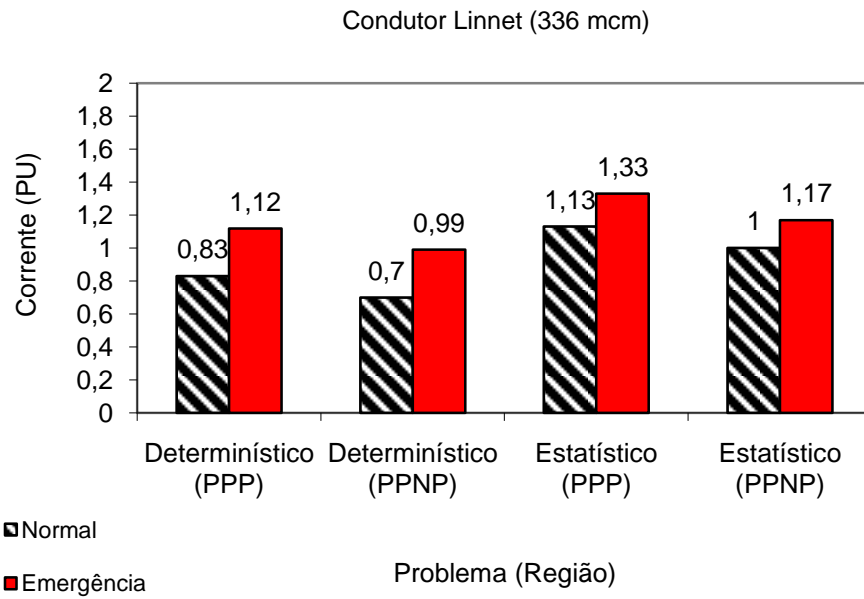


Figura 4.6 Comparação entre resultados de ampacidade obtidos com aplicação das metodologias de cálculo determinística e estatística para as regiões PPP e PPNP.

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram, respectivamente, os mesmos resultados obtidos na Tabela 4.4 normalizados em relação ao valor de ampacidade obtido pelo método determinístico em regime normal, respectivamente, para o problema PPP e PPNP.

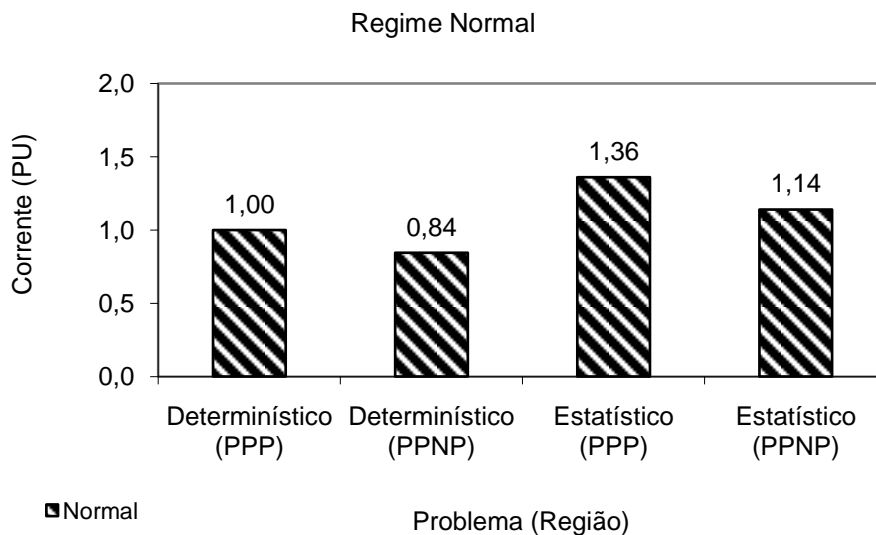


Figura 4.7 Comparação entre os resultados obtidos via AmpCLA em relação à ampacidade determinística no regime normal (PPP e PPNP).

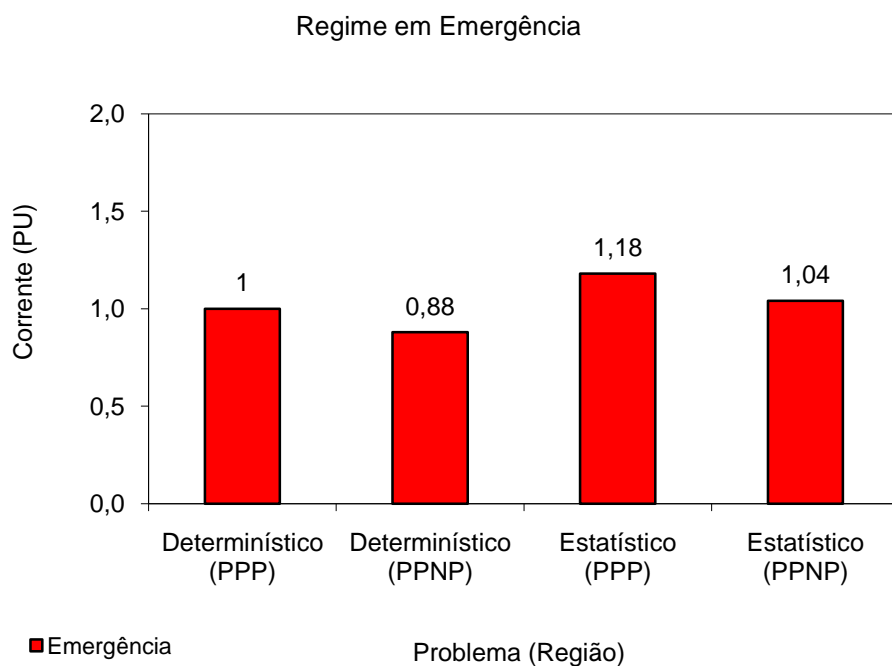


Figura 4.8 Comparação entre os resultados obtidos via AmpCLA em relação à ampacidade determinística no regime de emergência (PPP e PPNP).

#### 4.7 Conclusão

Os resultados mostrados na Tabela 4.3, apesar de referirem-se a um caso hipotético de redução da amplitude da velocidade do vento (de 1 para 0,5 m/s), ilustram o que pode acontecer em uma linha aérea durante a operação. Na prática, o que se observa nas linhas em operação é que são raros os registros de ocorrência simultânea do pior caso, isto é corrente máxima, baixa velocidade de vento e alta temperatura ambiente.

Os resultados apresentados na Tabela 4.4 mostram o potencial de aplicação da metodologia AmpCLA em larga escala, pois ganhos de segurança são obtidos uma vez que os riscos térmicos são assumidos e conhecidos. A possibilidade de aumento de ampacidade confirma a necessidade de usar as informações da CLA ao longo de todos os vãos da linha aérea, para que os métodos de cálculo da ampacidade, seja no critério determinístico ou no estatístico, possam ser aplicados com mais segurança.

## 5 Aplicação da Metodologia AmpCLA – Caso Real

### 5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados, etapa a etapa, da aplicação da metodologia AmpCLA em um caso real de uma linha aérea em operação. Os resultados foram obtidos com os métodos de ampacidade determinístico e estatístico.

### 5.2 Etapa 1: Escolha dos Parâmetros da Linha

A linha em estudo possui 133 vãos distribuídos ao longo de 52 km de comprimento na região de Acuruí-MG. A linha escolhida foi identificada vão a vão, em tabela de dados através do perfil e planta em formato digital, conforme mostra a Figura 5.1. A Figura 5.2 mostra um vão do perfil e planta original da linha. **A Tabela 5.1 mostra a estação climatológica utilizada.**

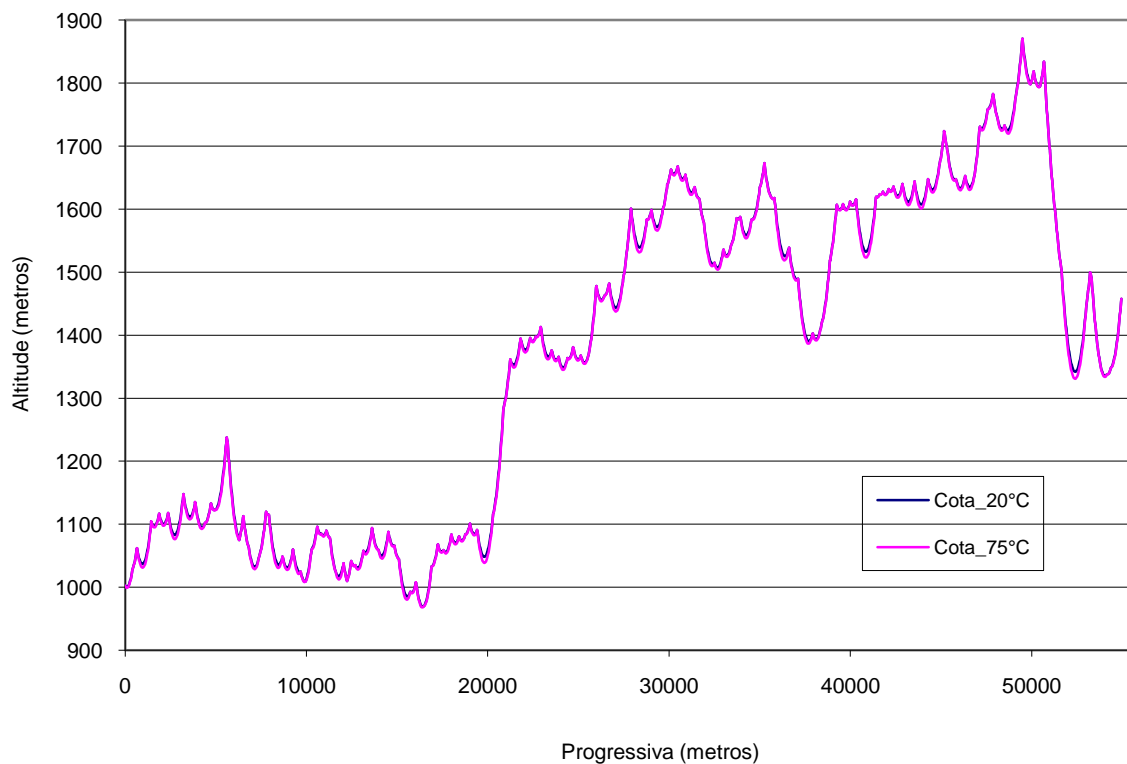


Figura 5.1 Perfil e Planta Digital do Condutor na Linha Aérea 138 kV em estudo.

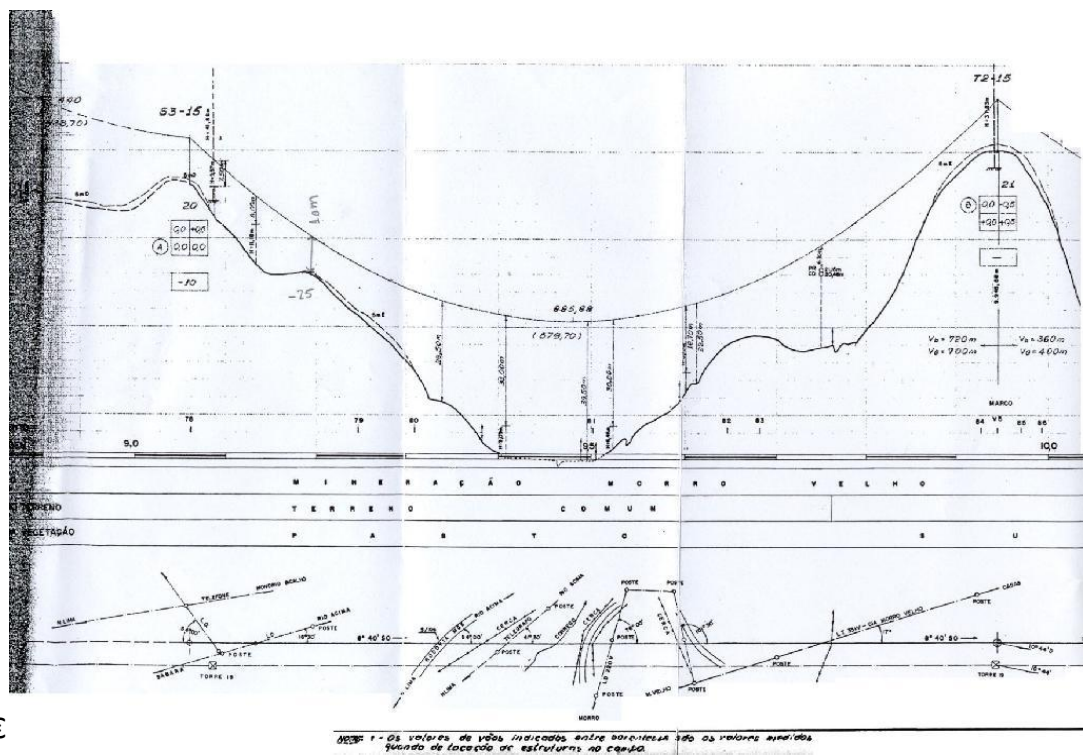


Figura 5.2 Perfil e Planta Original de um Vão da Linha Aérea 138 kV em estudo.

Tabela 5.1 Par Climatológico (Velocidade de Vento e Temperatura Ambiente) da Estação Ouro Preto 1 (total 2730 registros horários).

Temp. Ambiente °C	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	>9 m/s	
5																					
6																					
7																					
8												1									
9					1				1	1	1										
10			1							1		2	2		1						
11						1						6		4	3	5	1				
12										1	1	3	4	8	20	12	3	4	4	1	
13				1				1	1			2	8	14	30	13	3	3	3		
14			1	2	2	1		1	1		1	10	22	15	20	13	11	3	1		
15				2			2		1	1	1	14	25	32	27	14	10	2	1		
16		1	2	2	4	3	3	1	4	3	4	32	54	62	60	27	14	7			
17		2	2	2	4	1	2	2	2	2	3	27	60	66	54	37	23	4	2		
18		1	2	2	1	4	1	3		1	3	25	58	77	76	46	17	7	3		
19		1	1		2		1	4	2	1	1	22	42	65	80	40	18	6			
20				1			1		3			22	37	89	73	45	13	1	1		
21				1	1			1			1	14	26	72	88	37	12	2			
22										1	2	6	23	60	72	34	11	2	1		
23												4	24	44	49	23	10	3			
24												4	15	28	39	26	3	1	1		
25											2		2	15	27	13	1		1		
26													3	15	12	6					
27													1	2	3						
28																					
29														1							
30																					

As características de projeto da linha aérea em estudo são:

Condutor tipo LINNET ou 336	(MCM)
Tensão da linha = 138	(kV)
Radiação solar = 1000	(W/m <sup>2</sup> )
Velocidade do vento a 10 metros de altura do solo = 1	(m/s)
Ângulo de ataque do vento em relação ao condutor = 90	(°)
Temperatura ambiente = 30	(°C)
Temperatura normal do condutor = 60	(°C)
Temperatura de emergência do condutor = 80	(°C)
Risco térmico para temperatura normal de projeto = 15	(%)
Risco térmico para temperatura limite de projeto = 1	(%)
Risco térmico para temperatura de emergência = 5	(%)
Ângulos de ataque do vento na fronteira da região de interesse para simulação da CLA = 0, 45, 135, 225 e 315° (Veja Figura 3.1).	

### 5.3 Etapa 2: Selecionar a região contendo a linha aérea

Em seguida, o mapa da região de estudo é convertido para um padrão digital (veja Figura 5.3). O domínio digitalizado conforme mostra a Figura 5.4 é discretizado em malha de volumes finitos.

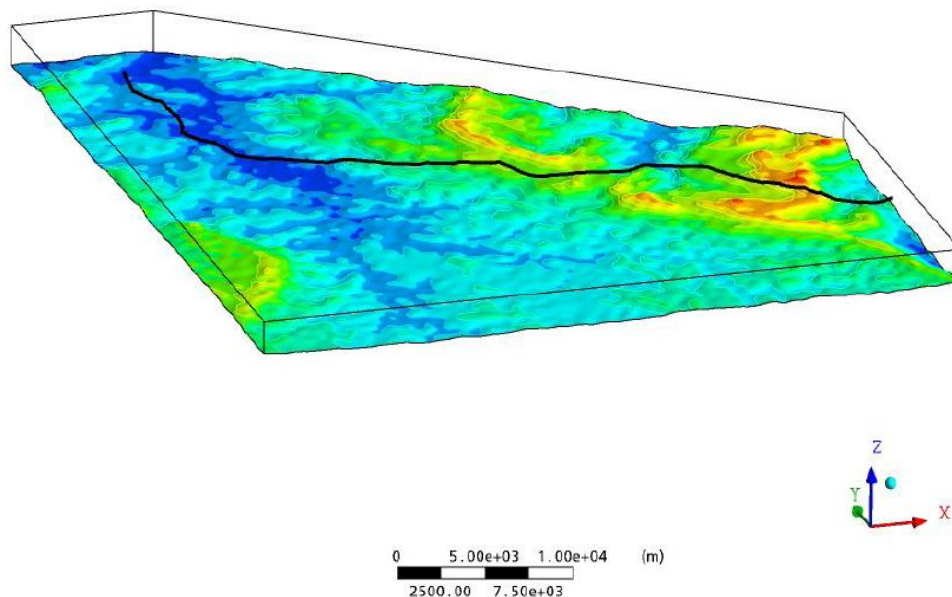


Figura 5.3 Região Experimental de Acuruí-MG digitalizada, contendo a linha aérea 138 kV.

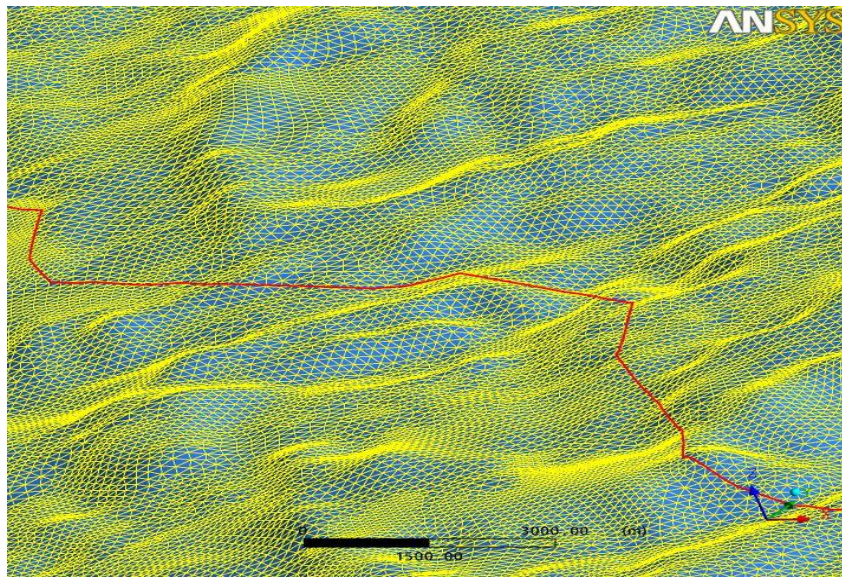


Figura 5.4 Trecho da Linha na Região Experimental de Acuruí-MG digitalizada.

### ***5.4 Etapa 3: Processamento da CLA***

Essa etapa consiste em processar a CLA da região de estudo, com as seguintes características de processamento:

- regime permanente,
- condição de contorno definida a 10 metros de altura do solo,
- velocidade do vento na entrada igual a 1 m/s,
- atmosfera neutra (Número de Froude > 1000).

Os resultados do processamento da CLA em todos os 133 vãos, distribuídos ao longo de 52 km de comprimento na região de Acuruí-MG, foram obtidos por meio do projeto [P&D-162, 2008]. Foram simuladas combinações com 9 intervalos de velocidade de vento (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 2; 3; 4 e 5 m/s) e 4 direções do vento (45; 135; 225; 315°C) na fronteira de entrada da região da CLA, que resultou em um total de 36 casos de processamentos, e com isso, gerou-se uma base digital com as informações simuladas da velocidade do vento para 36 combinações possíveis. O tempo total de processamento foi de aproximadamente

216 horas, considerando um tempo médio de 6 horas por cada caso. A Tabela 5.2 mostra alguns casos simulados para o vão número 1. A Tabela 5.3 mostra alguns resultados simulados da velocidade do vento em pontos específicos onde se encontram estações climatológicas já instaladas (Códigos: 1, 2, 4, 6 e 7) em Acuruí-MG, considerando a velocidade de vento na entrada igual a 1 m/s, a 10 m de altura. No Apêndice F são mostrados todos os resultados obtidos.

Tabela 5.2 Resultados obtidos com a simulação da CLA no vão 1.

Código Vão	Condição de Contorno		Componentes da Velocidade do Vento (m/s)			Módulo da Velocidade do Vento (m/s)
	Ângulo de Ataque do Vento (Figura 3.1) (°)	Velocidade do Vento (m/s)	V <sub>U</sub>	V <sub>V</sub>	V <sub>w</sub>	
1	45	0,4	0,3459	0,3817	-0,0013	0,5151
1	45	0,6	0,5192	0,5729	-0,002	0,7731
1	45	0,8	1,8348	4,2825	-0,2403	4,6652
1	45	1	1,6351	3,8204	-0,1873	4,1598
1	45	2	1,779	2,7179	-0,0748	3,2492
1	45	3	2,563	3,2412	-0,0434	4,1324
1	45	4	3,5037	4,0734	-0,0176	5,373
1	45	5	4,5019	5,0014	-0,0003	6,7291

Tabela 5.3 Resultados obtidos com a simulação da CLA na Região de Acuruí-MG nos pontos de localização das estações climatológicas.

Código da Estação	Condição de Contorno		Módulo da Velocidade do Vento (m/s)
	Direção do Vento (°)	Velocidade do Vento a 10 m de altura (m/s)	
1	45	1,0	3,3
1	135	1,0	1,2
1	225	1,0	0,7
1	315	1,0	3,9
2	45	1,0	3,1
2	135	1,0	1,1
2	225	1,0	1,1
2	315	1,0	4,2
4	45	1,0	4,9
4	135	1,0	1,4
4	225	1,0	1,3
4	315	1,0	4,9
6	45	1,0	3,8
6	135	1,0	0,7
6	225	1,0	1,3
6	315	1,0	1,5
7	45	1,0	3,4
7	135	1,0	1,3
7	225	1,0	1,5
7	315	1,0	4,5

Dos resultados numéricos obtidos com estas simulações, foram então extraídas as velocidades de vento em todos os vãos ao longo da linha aérea. O menor resultado de velocidade do vento, dentre os valores extraídos por vão, foi considerado como a velocidade crítica climatológica do vão. A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos para alguns poucos vãos.

Tabela 5.4 Resultados obtidos com a simulação da ABL.

Vão	Ângulo de Ataque do Vento (Figura 3.1) (°)	Módulo da Velocidade do Vento Simulado (m/s)
19-20	45	3,8
19-20	135	1,4
<b>19-20</b>	<b>225</b>	<b>1,1</b>
19-20	315	4,8
20-21	45	3,5
20-21	135	1,2
<b>20-21</b>	<b>225</b>	<b>0,9</b>
20-21	315	4,1
21-22	45	3,7
21-22	135	1,2
<b>21-22</b>	<b>225</b>	<b>1,0</b>
21-22	315	3,8

### 5.5 Etapa 4: Identificar os Vãos Críticos Climatológicos - Vcc

A Figura 5.5 mostra os resultados da velocidade do vento (para 4 simulações da CLA) em função dos vãos da linha aérea. O valor mostrado na Figura 5.5 é o menor valor de velocidade de vento obtido em 4 simulações (ver valores em negrito da Tabela 5.4), uma para cada ângulo de ataque (45; 135; 225; 315 °) e com a velocidade do vento na entrada de 1 (m/s). Analisando a Figura 5.5, observa-se que os resultados numéricos para a velocidade do vento são, em apenas 3 do total de 133 vãos, inferiores ao valor de 1 m/s imposto como condição de fronteira na entrada da região de estudo. Nos vãos com menor velocidade de vento espera-se ter uma temperatura mais elevada no condutor e, conseqüentemente redução na mínima distância livre e, no caso desses vãos serem também vãos críticos elétricos -  $V_{ce}$ , maior risco de falha elétrica.

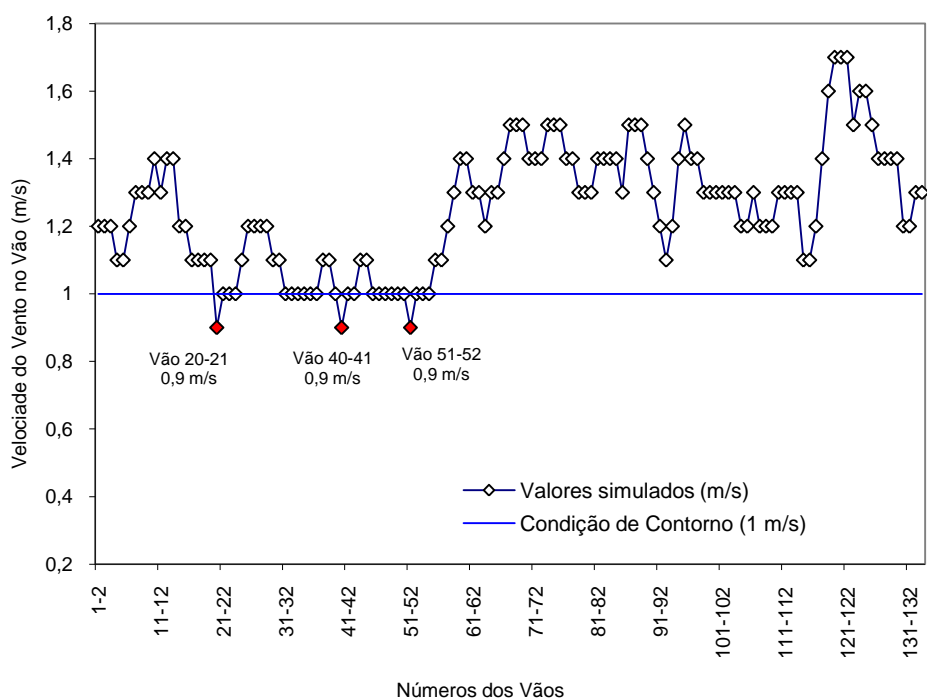


Figura 5.5 Velocidade do vento nos vãos da linha aérea de 138 kV.

Os vãos críticos climatológicos da linha aérea estão mostrados na Tabela 5.5, especificamente os vãos (20-21, 40-41 e 51-52), que correspondem à velocidade do vento de referência menor que 1,0 (m/s).

Tabela 5.5 Vãos Críticos Climatológicos - Vcc.

Vão	Velocidade do Vento Simulada (m/s)	Distância livre (m) para velocidade do vento igual a 1 (m/s)
20-21	0,9	10
40-41	0,9	10
51-52	0,9	14

## 5.6 Etapa 5: Identificar os Vãos Eletricamente Críticos- Vce

A localização dos vãos eletricamente críticos –  $V_{ce}$  é feita analisando o projeto eletromecânico da linha aérea em relação às distâncias entre o objeto aterrado mais próximo e o condutor aéreo, e verificando se esta distância é inferior a determinado valor de referência ( $h_{ref}$ ), a qual deve ser superior à distância mínima de segurança especificada em norma técnica ( $h_{min}$ ). Por exemplo, seja  $h_{ref} = 10$  (m) para o caso em que a distância mínima

de segurança é segundo norma técnica  $h_{\min} = 7$  (m) para linhas aéreas de 138 kV. A Tabela 5.6 mostra os resultados desta análise com a identificação dos vãos críticos segundo o critério de segurança adotado. Observa-se que dentre os 133 vãos da linha, apenas 5 possuem alturas iguais a 10 (m). Nenhum vão desta linha possui altura inferior a este valor de referência.

Tabela 5.6 Vãos Críticos Elétrico – Vce identificados no perfil e planta original da linha (ver Figura 5.2).

Vão	Velocidade do Vento Simulada (m/s)	Distância livre (m) para velocidade do vento igual a 1 (m/s)
3-4	1,1	10
19-20	0,9	10
20-21	0,9	10
39-40	1,0	10
40-41	0,9	10

### 5.7 Etapas 6, 7, 8 e 9

A interseção entre os conjuntos  $V_{cc}$  e  $V_{ce}$ , isto é,  $V_{cc \cap ce} = V_{cc} \cap V_{ce} = \{20-21, 40-41, 51-52\} \cap \{3-4, 19-20, 20-21, 39-40, 40-41\} = \{20-21, 40-41\}$ . Aplicando o critério de não-dominância quanto aos pares (velocidade do vento, distância livre), se percebe que os dois vãos (20-21) e (40-41) são ambos os críticos e com os mesmos valores de velocidade de vento e distância livre. Efetuando os novos cálculos de temperatura do condutor e da distância livre obtém-se para estes vãos valores idênticos, respectivamente iguais a 72,6 (°C) e 9,9 (m). Esses dois valores violam os limites requeridos pelo projeto eletromecânico dessa linha.

Outra análise alternativa para determinar o conjunto não-dominado é desenhar os pontos correspondentes aos dados de todos os vãos  $V_{cc}$  e  $V_{ce}$  num gráfico de velocidade de vento versus distância livre, depois de recalculada a distância livre para a velocidade de vento simulada em  $V_{cc}$ , e aplicar o critério de não-dominância. A Figura 5.6 ilustra este procedimento considerando o conjunto de vãos pertencentes a  $V_{cc} \cup V_{ce}$ .

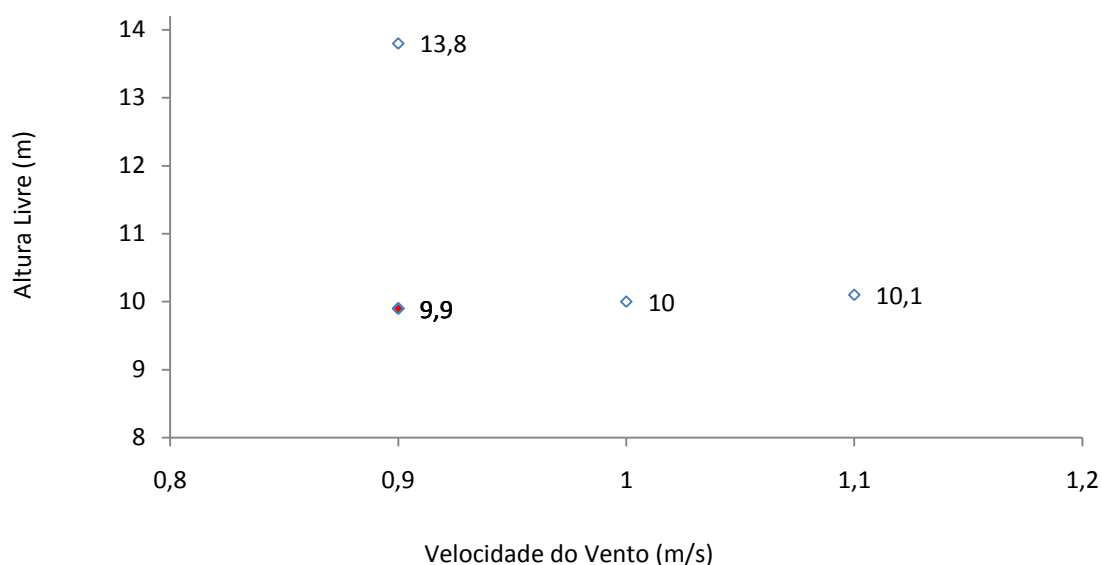


Figura 5.6 Determinação dos vãos não-dominados.

## 5.8 Etapa 10: Cálculo da Ampacidade

Conforme mostrado na Figura 5.1, a linha aérea em estudo se enquadra na classe de problema, apresentado no capítulo 4, caracterizado como região PPNP – “perfil e planta com relevo não-plano”. Logo, seguindo a análise feita no capítulo anterior, serão apresentados a seguir os cálculos para topografia PPP e PPNP para em seguida se poder calcular o fator de correção  $F_c$ .

### 5.8.1 Problema PPP

A Tabela 5.7 apresenta os valores de corrente em PU calculados para o problema (PPP - perfil e planta com relevo plano).

Tabela 5.7 Resultados Obtidos para o Problema PPP.

Determinístico [Velocidade do Vento = 1,0 m/s]		Estatístico*		
Regime Normal 60°C	Emergência 80°C	Regime Normal 60°C 15% risco térmico	Regime Normal 80°C 1% risco térmico	Emergência 80°C 5% risco térmico
0,83	1,12	1,24	1,13**	1,33

Nota: \* Estação Climatológica Subestação Ouro Preto 1.

\*\* Por critério de segurança, o menor valor de corrente (1.13 PU) define a ampacidade estatística no regime normal.

### 5.8.2 Problema PPNP

O Fator de Correção para a condição (PPNP), conforme mostra os resultados de corrente em PU da Tabela 5.8, foram calculados para o vão crítico N° 20 (0,9 m/s de velocidade de vento).

Tabela 5.8 Resultados Obtidos para o Problema PPNP.

Determinístico [Velocidade do Vento = 0,9 m/s]	
Regime Normal 60°C	Emergência 80°C
0,80	1,08

Nota: \* Estação Climatológica Subestação Ouro Preto 1.  
\*\* Por critério de segurança, o menor valor de corrente define a ampacidade probabilística no regime normal.

### 5.9 Cálculo do Fator de Correção

Os fatores de correções são facilmente calculados conforme (3.7 e 3.8) para cada regime de operação da linha aérea, conforme a seguir.

$$F_{\text{regime normal}} = 0,80 / 0,83$$

$$F_{\text{regime normal}} = 96 \%$$

$$F_{\text{regime emergência}} = 1,08 / 1,12$$

$$F_{\text{regime emergência}} = 96 \%$$

A aplicação do fator Fc na correção dos valores de ampacidade obtidos pelo método estatístico conduz ao resultado final apresentado na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 Resultados Finais para o Problema Real.

Determinístico [Velocidade do Vento = 0,9 m/s]		Estatística* [Fator de Correção = 96%]		
Regime Normal 60°C	Emergência 80°C	Regime Normal 60°C 15% risco térmico	Regime Normal 80°C 1% risco térmico	Emergência 80°C 5% risco térmico
0,80	1,08	1,19	1,08 **	1,26

Nota: \* Estação Climatológica Subestação Ouro Preto 1.  
\*\* Por critério de segurança, o menor valor de corrente foi utilizado para a ampacidade probabilística no regime normal.

## ***5.10 Conclusão***

A metodologia AmpCLA requer um processo de cálculo da ampacidade mais complexo. Os pontos críticos das linhas aéreas são identificados pela correlação entre as informações obtidas por meio do projeto eletromecânico da linha aérea e pelo estudo da CLA. Este procedimento permite a melhoria do cálculo da ampacidade com essa nova metodologia.

A validação da AmpCLA mostrou que os perfis de velocidade de vento e de temperatura do condutor, medidos e simulados, são influenciados diretamente pela posição geográfica dos vãos da linha aérea na CLA, conforme modelado nos problemas PPP e PPNP.

Esse mesmo comportamento será observado no próximo capítulo, nos perfis de temperatura do condutor monitorados em campo pelos sensores 5106 (vão 50-51) e 5109 (vão 75-76).

## ***6 Análise da Metodologia AmpCLA***

### ***6.1 Introdução***

A metodologia AmpCLA se baseia na identificação de vãos críticos através do uso de dados numéricos de simulação da velocidade do vento em conjunção com a determinação dos vãos com menor distância livre, por meio da análise do projeto da linha aérea. A utilização de dados numéricos da simulação da CLA, naturalmente pode ser questionada, pois a cada instante se tem uma condição distinta. Assim, este capítulo busca demonstrar através da apresentação de três análises distintas e justificar a pertinência do uso destes dados.

Primeiro, é feita uma comparação entre valores numéricos e medidos da velocidade do vento. Os valores numéricos foram obtidos com a simulação da CLA para condições de contorno distintas. Os valores de medição foram obtidos através de medições realizadas em Acuruí-MG com a utilização de estações climatológicas sob condições de contorno desconhecidas. A comparação entre estes dados mostra qualitativamente que os resultados numéricos, obtidos com o uso da ferramenta de processamento da CLA, são coerentes, e que, do ponto de vista qualitativo, validam o modelo hidrodinâmico adotado na modelagem da CLA. A comparação é feita entre valores médios das médias horárias da velocidade do vento.

Em seguida, é feita a comparação entre os valores de temperatura monitorados, através de sensores do tipo Power Donut, e calculados, com a utilização de valores de velocidade do vento obtidas por simulação da CLA. Esta análise mostra a existência de diferenças climatológicas ao longo dos vãos, conforme era de se esperar.

Finalmente, a terceira análise é realizada através da observação de imagens de satélite da região de Acuruí-MG, a qual permite inferir sobre a contribuição do relevo sobre a amplitude da velocidade do vento nos vãos ao longo da linha aérea.

Para iniciar estas análises, é apresentada a infra-estrutura utilizada no Sítio experimental de Acuruí-MG.

## 6.2 *Sítio Experimental de Acuruí-MG*

Os resultados de medição obtidos nessa tese foram adquiridos da infra-estrutura de coleta de dados de amplitude da velocidade do vento, construída pela Cemig, em parceria com a UFMG, no campo experimental de Acuruí-MG, conforme apresentado no capítulo 2. A seguir são apresentadas informações adicionais sobre:

- Localização do Sítio Experimental de Acuruí-MG,
- Estações de Medição da Amplitude da Velocidade do Vento,
- Sistema de Monitoramento de Temperatura do Condutor da Linha Aérea.

### 6.2.1 *Localização do Sítio Experimental de Acuruí-MG*

A Figura 6.1 mostra a localização geográfica da região de pesquisa de Acuruí-MG que está posicionada na região sudeste do Brasil.

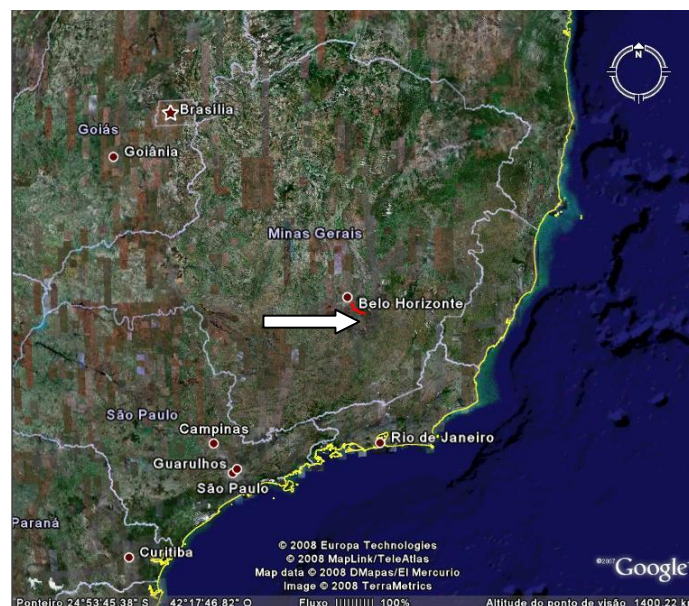


Figura 6.1 Localização do sítio experimental de Acuruí-MG.

### 6.2.2 *Estação de Medição de Velocidade de Vento de Acuruí-MG*

A Figura 6.2 mostra, utilizando recurso de imagem de satélite, mais detalhes da linha aérea selecionada (Linha em Vermelho) para a aplicação da metodologia AmpCLA e a identificação das estações de medição de amplitude de velocidade de vento em Acuruí-MG, estações numeradas de 1 a 8.

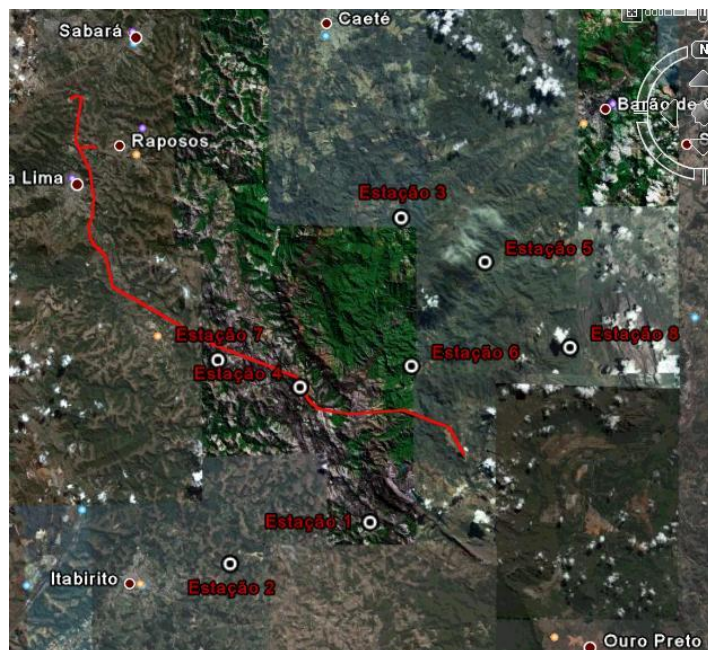


Figura 6.2 Localização das estações de vento e a linha aérea no sítio experimental de Acuruí-MG.

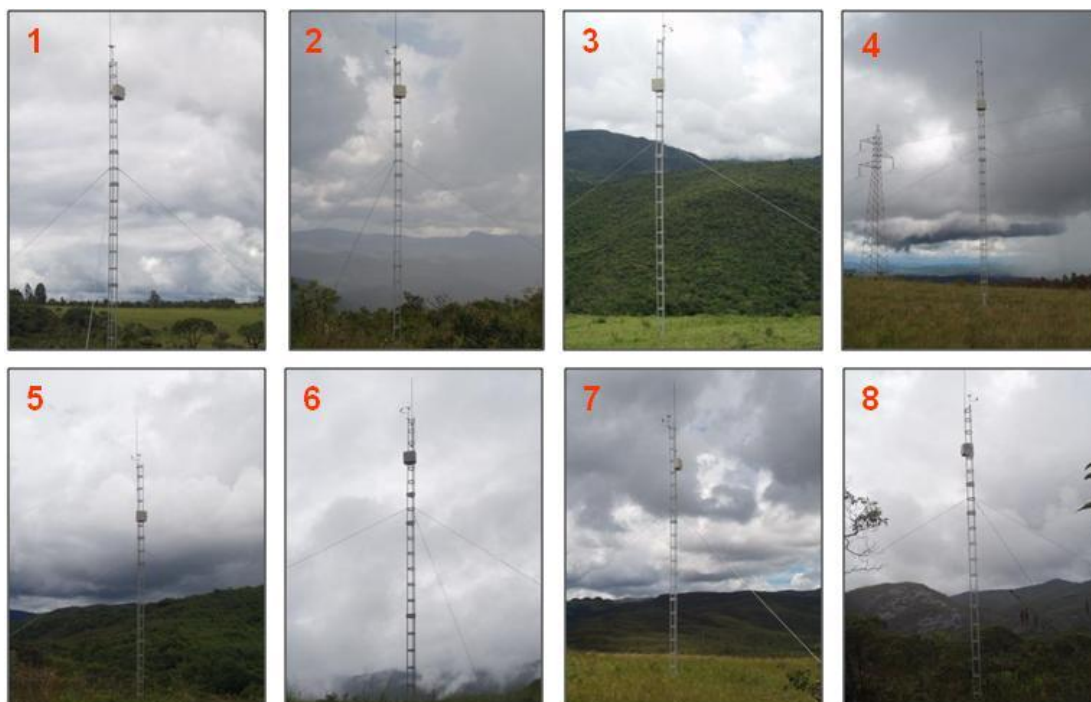


Figura 6.3 Visualização das estações de velocidade de vento no sítio experimental de Acuruí-MG.

A Figura 6.3 mostra detalhes visuais das estações, sendo possível identificar diferentes tipos de relevo nas regiões de Acuruí-MG. Os pontos indicados pelos números de 1 a 8 se referem

aos locais de instalação dos equipamentos de medição compostos por 8 anemômetros digitais, tipo Second Wind - modelo 2000S de partes móveis.

### **6.2.3 Sistema de Monitoramento de Temperatura e Corrente do Condutor**

Os sensores Power Donut-2, que medem a corrente e temperatura do condutor, foram instalados na linha aérea. Os sensores estão identificados através da Figura 6.4, tais como:

- 5106: Região de média altitude da linha, localizada no vão 50-51, conforme mostra a Figura 6.5.
- 5109: Região de elevada altitude da linha, localizada no vão 75-76 conforme mostra a Figura 6.6.



Figura 6.4 Localização dos sensores Power Donut-2 na região de Acuruí-MG.

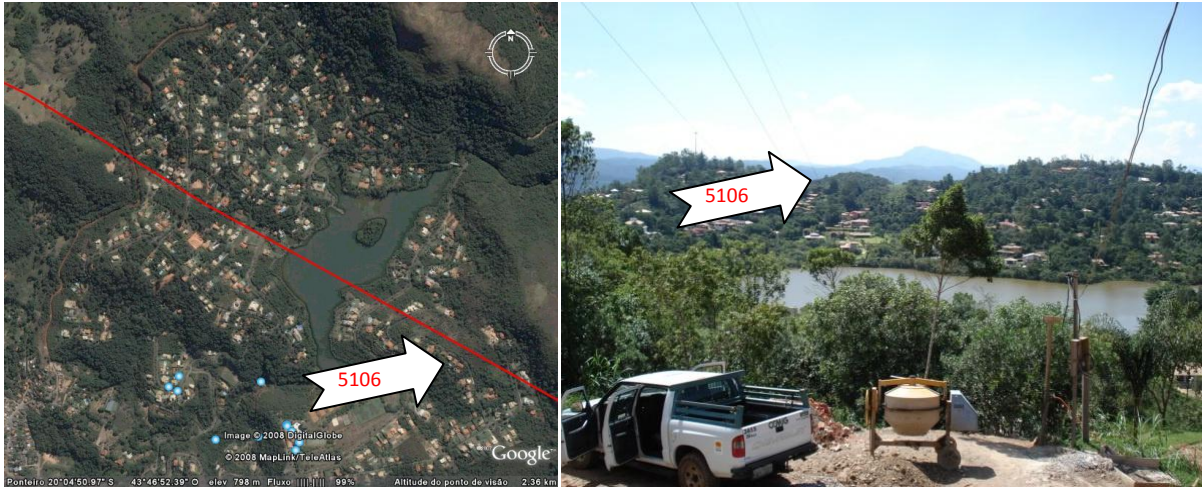


Figura 6.5 Localização do sensor Power Donut-5106.



Figura 6.6 Localização do sensor Power Donut-5109.

A Figura 6.7 mostra a instalação do sensor Power Donut-5106 no condutor da linha aérea (vão 50-51). A instalação do sensor é feita com bastão isolado, em linha viva e com o uso de caminhão com caçamba isolada.



Figura 6.7 Detalhe da instalação do sensor Power Donut-5106 no vão 50-51.

### ***6.3 Análise dos Valores Numéricos e Medidos de Velocidade do Vento***

Nesta análise, os valores numéricos de velocidade do vento foram confrontados com os valores médios de medições em campo. Alguns resultados numéricos, extraídos do banco de dados gerado com simulações da CLA, e dados de medições experimentais, oriundos das estações climatológicas, cujo código são de identificação adotado foi 1, 2, 4, 6 e 7, de Acuruí-MG, estão apresentados na Tabela 6.1, com as seguintes observações:

- os valores medidos são da amplitude da velocidade do vento;
- a identificação horária da direção preferencial do vento não foi realizada devido à limitação técnica da estação tipo Second-Wind utilizada;
- a temperatura ambiente não foi registrada;
- considerou-se a média das médias horárias diárias de cada estação.

Tabela 6.1 Comparação entre algumas classes de amplitude de velocidade do vento simuladas e as suas medições experimentais correspondentes em Acuruí-MG.

Código da Estação	Condição de Contorno Direção do Vento (graus)	Condição de Contorno Magnitude do Vento (m/s)	Módulo Vento Simulado nas estações (m/s)	*Medição Experimental (m/s)
1	135	0,4	0,49	0,72
**2	135	0,4	0,47	0,48
4	135	0,4	0,57	2,82
6	135	0,4	0,31	1,34
7	135	0,4	0,53	1,01
1	135	1	1,24	1,68
**2	135	1	1,19	1,19
4	135	1	1,43	4,23
6	135	1	0,79	1,56
7	135	1	1,34	2,20
1	135	2	2,51	2,94
**2	135	2	2,38	2,33
4	135	2	2,87	5,54
6	135	2	1,60	1,80
7	135	2	2,72	3,13
1	135	3	3,78	4,28
**2	135	3	3,58	3,54
4	135	3	4,31	7,02
6	135	3	2,41	2,49
7	135	3	4,11	4,23

Notas:

(\*) Média dos valores experimentais. Exemplo: Para um valor simulado de 2,38 m/s na estação referência de vento No.2 , com 2 m/s e 135º como condição de contorno na entrada da CLA em Acuruí-MG, foram pesquisados em todos os registros experimentais entre uma faixa de  $\pm 10\%$  desse valor simulado (2,38 m/s), e a partir disso, foi realizada a média aritmética desse conjunto de dados.

(\*\*) A Estação No. 2 foi selecionada como referência por estar mais próxima à região de entrada de Acuruí-MG, e serviu como a base de referência entre os dados simulados da CLA e os dados experimentais das estações de vento.

A Figura 6.8 apresenta os resultados da Tabela 6.1 amostrados em gráfico de barras. Os dados da Estação de Vento No. 2 estão destacados na cor amarela por ter sido utilizada como referência.

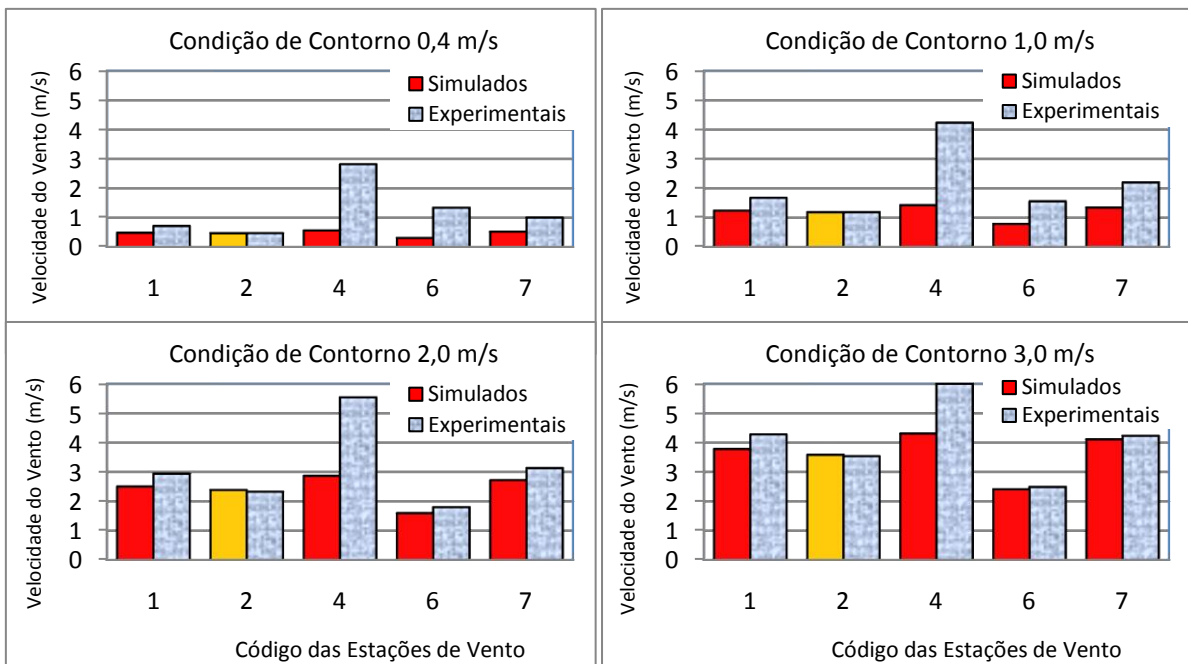


Figura 6.8 Comparação entre valores medidos e simulados das estações de coleta de velocidade do vento em Acuruí-MG. A coluna em amarelo, referente à estação No. 2, identifica a referência utilizada.

Dentre as várias constatações possíveis, duas características fundamentais para o uso do banco de dados da CLA na metodologia AmpCLA são destacadas a seguir:

- De forma global, as simulações da CLA para diversas condições de fronteira geraram resultados qualitativamente compatíveis com os dados experimentais, isto é, o modelo da CLA em regime hidrodinâmico percebe as alterações do relevo da região de Acuruí-MG, pois geraram valores de amplitude da velocidade do vento distintas em vãos distintos.
- As amplitudes médias horárias das medições experimentais sempre foram superiores aos valores simulados, o que é altamente recomendável para o cálculo ainda conservador de ampacidade na metodologia AmpCLA.

## **6.4 Análise das Simulações de Velocidade do Vento e de Medições de Temperatura do Condutor nos Vãos da Linha**

Nesta segunda análise, foi realizada uma comparação entre os valores numéricos da amplitude de velocidade do vento, para dois vãos, 50 e 75, obtidos através de simulações para diferentes condições de fronteira. Nesta comparação, observa-se nitidamente a influência da topografia uma vez que os valores de velocidade do vento são distintos e seguem um mesmo comportamento. Em seguida, são apresentadas as medições de temperatura do condutor para esses mesmos vãos, monitorados por sensores Power Donut. Estas medições, de forma coerente com os resultados da velocidade de vento simulados, mostram que o vão com menor velocidade de vento possui a maior temperatura, demonstrando qualitativamente mais uma vez a pertinência do modelo utilizado na avaliação da CLA.

### **6.4.1 Simulações da Velocidade do Vento nos Vãos da Linha**

Os valores numéricos da amplitude da velocidade do vento são mostrados na Tabela 6.2. Uma constatação numérica percebida nesses dados é que os valores da amplitude da velocidade do vento no vão 50 são na maioria das vezes menores do que no vão 75 e, por isto, deverá possuir temperatura do condutor na média mais elevada.

Tabela 6.2 Comparação entre as amplitudes de velocidade de vento simuladas para os vãos 50 e 75.

Número do Vão	Velocidade do Vento Imposta na Condição de Contorno (m/s)	Amplitude da Velocidade do Vento em Função do Ângulo de Ataque do Vento na Fronteira da CLA			
		45°	135°	225°	315°
50 (75)	0,4	0,46 (1,71)	0,45 (0,57)	0,40 (0,62)	4,60 (0,61)
50 (75)	0,6	0,69 (2,06)	0,68 (0,86)	0,61 (0,93)	4,83 (0,91)
50 (75)	0,8	3,44 (3,34)	0,93 (5,19)	0,81 (1,24)	4,90 (1,22)
50 (75)	1	3,03 (3,67)	1,16 (5,32)	1,01 (1,55)	4,97 (1,52)
50 (75)	2	2,66 (4,81)	2,41 (6,09)	2,03 (3,11)	5,46 (3,04)
50 (75)	3	2,86 (6,39)	3,73 (6,71)	4,13 (4,66)	5,83 (7,01)
50 (75)	4	4,03 (6,82)	2,81 (7,46)	4,77 (4,23)	6,33 (7,91)
50 (75)	5	5,89 (7,74)	2,40 (8,29)	5,82 (5,11)	6,87 (8,94)

A Figura 6.9 e a Figura 6.10 apresentam as curvas da amplitude da velocidade do vento, respectivamente para os vãos 50 e 75, para diversas condições de contorno impostas. O valor médio também é apresentado.

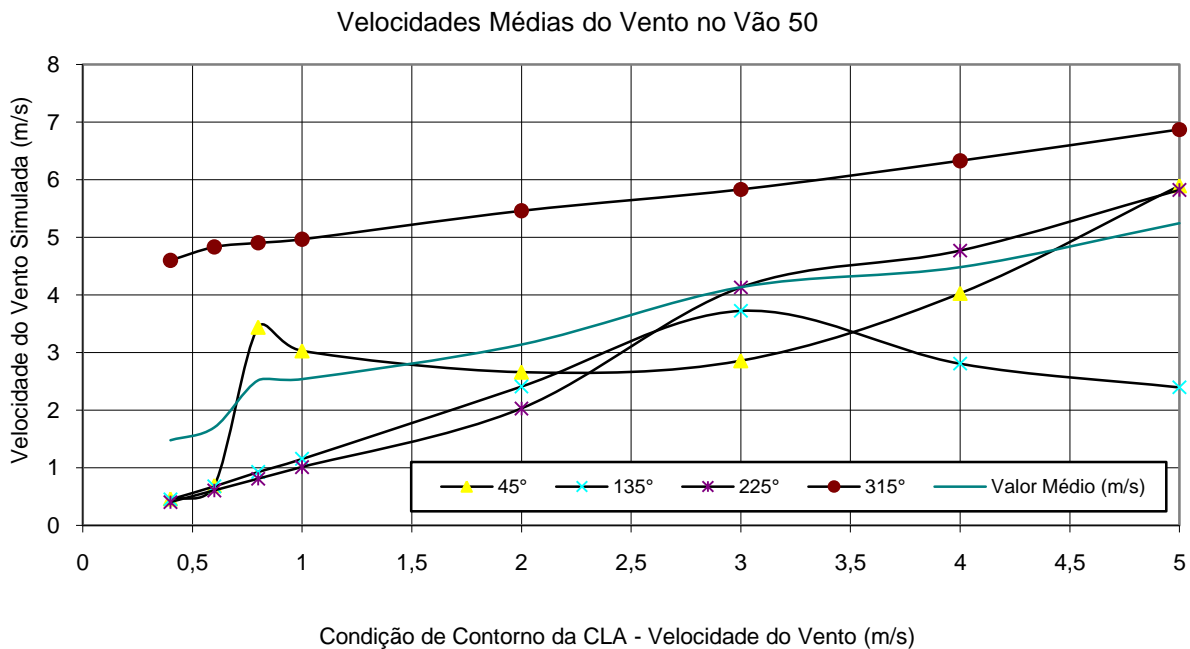


Figura 6.9 Valores simulados de velocidade do vento em função da condição de contorno imposta para o vão 50.

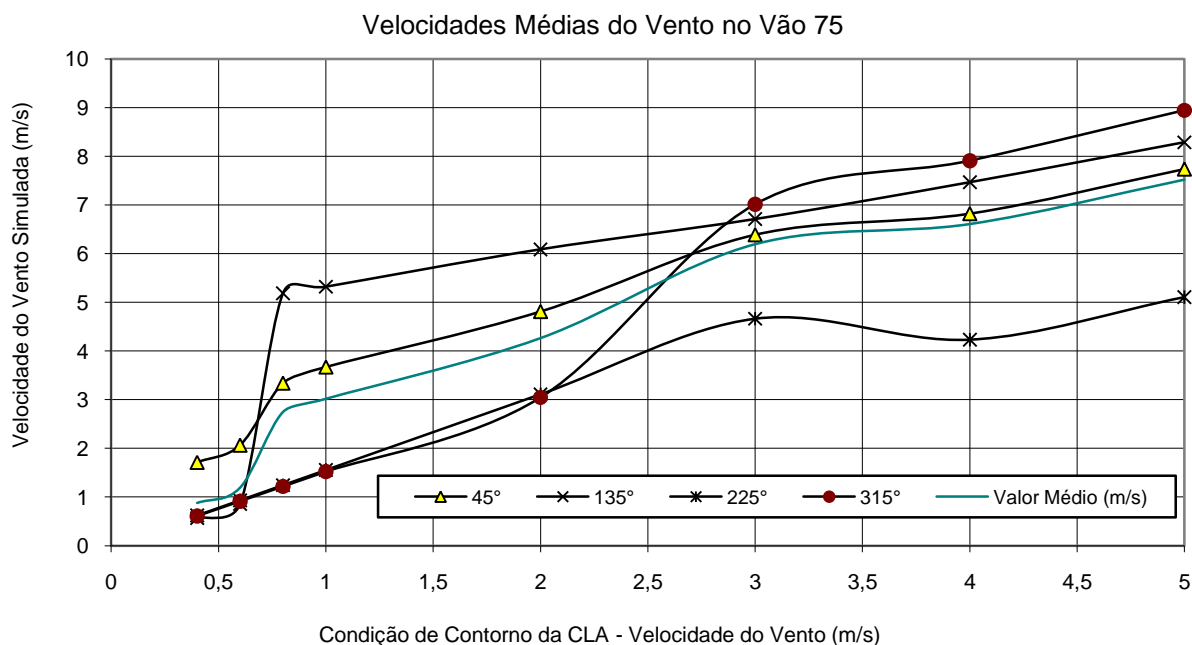


Figura 6.10 Valores simulados de velocidade do vento em função da condição de contorno imposta para o vão 75.

A Figura 6.11 mostra as curvas para as velocidades médias do vento, para os vãos 50 e 75. A Figura 6.12 mostra a curva obtida para a velocidade do vento média no vão 75 versus a velocidade do vento média no vão 50. Observa-se a natureza quase linear da curva.

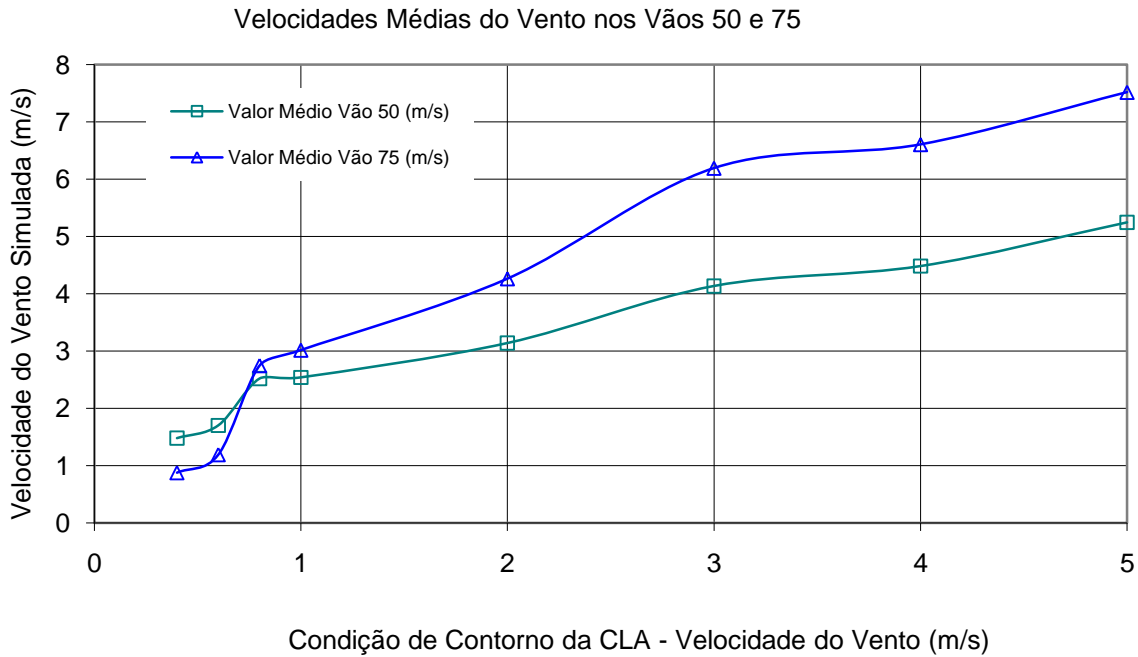


Figura 6.11 Comparação entre os perfis médios simulados para os Vãos 50 e 75 em função da condição de contorno imposta na fronteira da CLA.

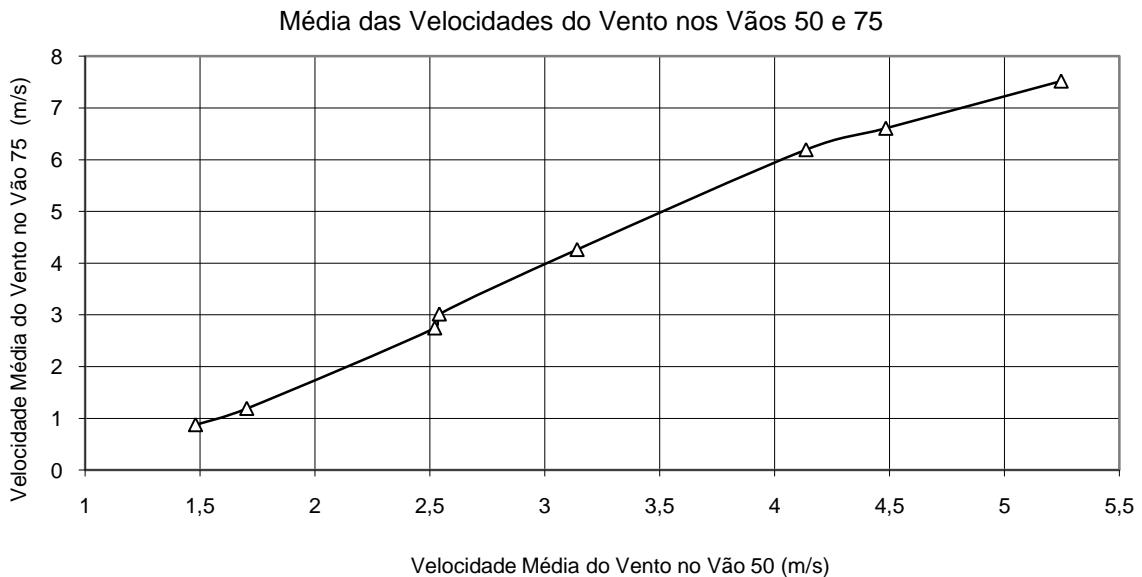


Figura 6.12 Comparação dos valores médios simulados entre os perfis médios de velocidade de vento nos vãos 50 e 75.

### 6.4.2 Monitoramento da Temperatura do Condutor em Tempo Real

Outra forma mais confiável de se avaliar a variação climatológica entre os vãos 50 e 75 é por meio da medição direta da temperatura do condutor nesses vãos, através do uso de sensores tipo Power Donut (veja Figura 6.13). Isto porque o comportamento térmico de um condutor, quando alimentado por uma corrente e submetido a uma condição climatológica constante em um determinado período de tempo, é similar ao de um anemômetro a fio quente. Para fazer a análise são apresentados a seguir os dados monitorados pelos sensores Power Donut, 5106 (vão 50-51) e 5109 (vão 75-76).

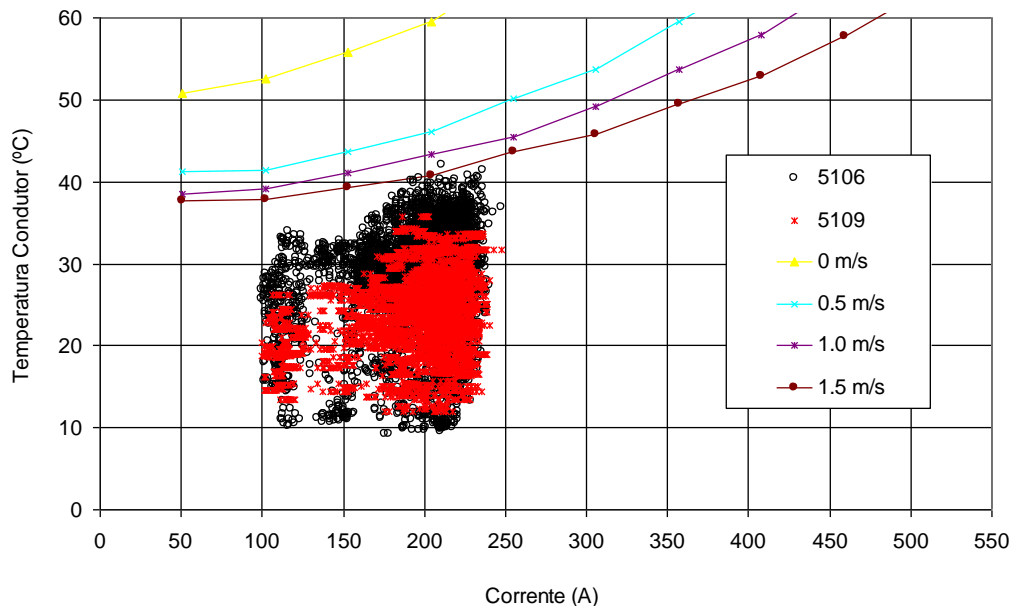


Figura 6.13 Valores da temperatura do condutor LINNET monitorados na LT 138 kV em Acuruí-MG.

Para melhor visualização das informações monitoradas pelos sensores nos vãos 50 e 75, a Figura 6.14 e a Figura 6.15 apresentam, respectivamente, as curvas de temperatura do condutor média e a máxima. As temperaturas medidas, em função das correntes, mostram que, em média horária existe uma diferença média de 2,5 °C e diferença máxima de 9,6 °C. Essas diferenças nas medições entre os dois vãos comprovam novamente, de forma experimental, que o vão 50 é um vão mais crítico que o vão 75, confirmando desta forma a qualidade dos dados numéricos que apontaram o vão 50 como tendo velocidades menores do que o vão 75.

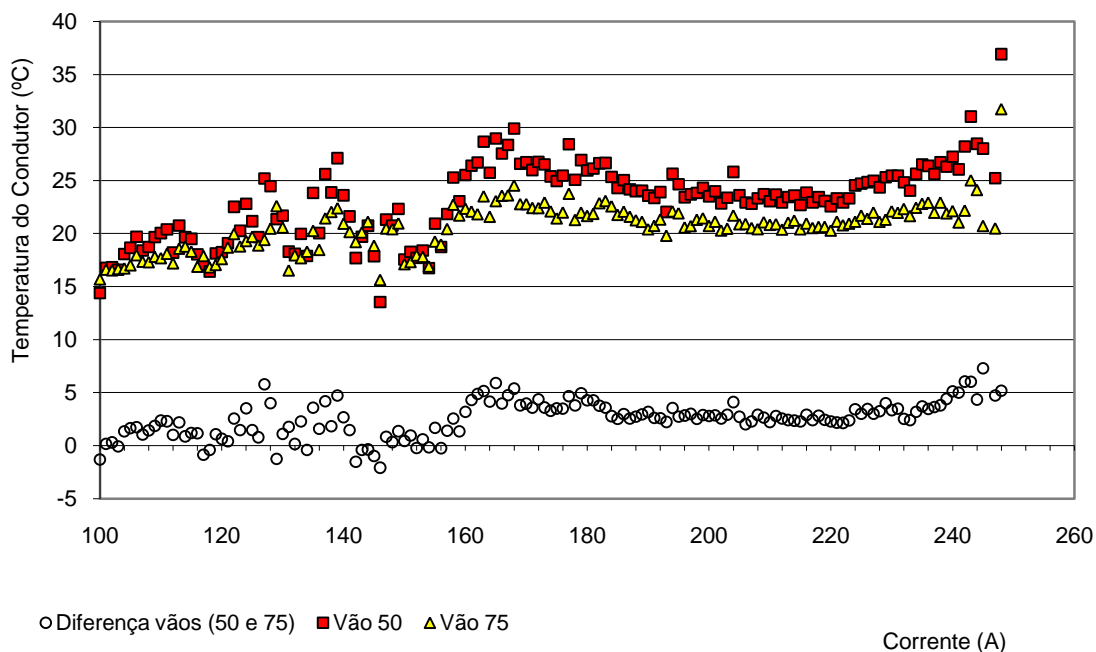


Figura 6.14 Comparação entre os valores médios das médias horárias das temperaturas do condutor monitoradas na LT 138 kV em Acuruí-MG.

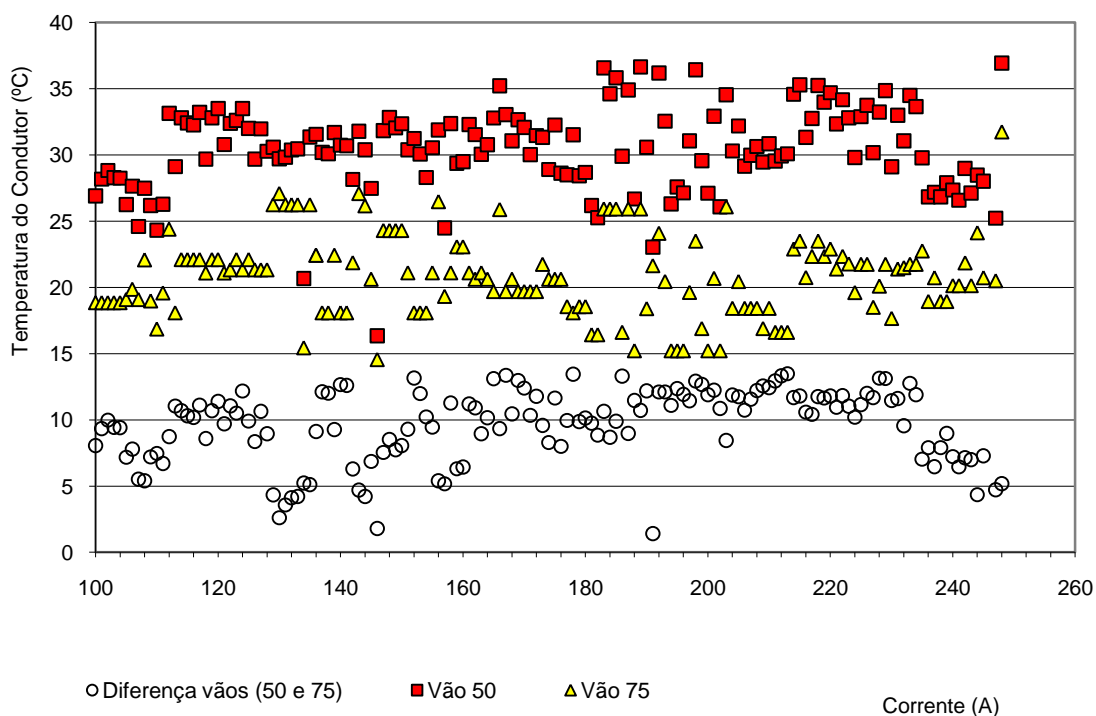


Figura 6.15 Comparação entre os valores máximos das médias horárias das temperaturas do condutor monitoradas na LT 138 kV em Acuruí-MG.

## 6.5 Análise Utilizando Imagens Digitais

Na terceira e última análise, foi observado por meio dos registros experimentais das amplitudes da velocidade do vento, para as Estações de Vento 3 e 5, a influência da topografia do terreno. Conforme mostra a Figura 6.16, essas duas estações apresentaram valores de velocidade do vento bem distintos das demais estações.

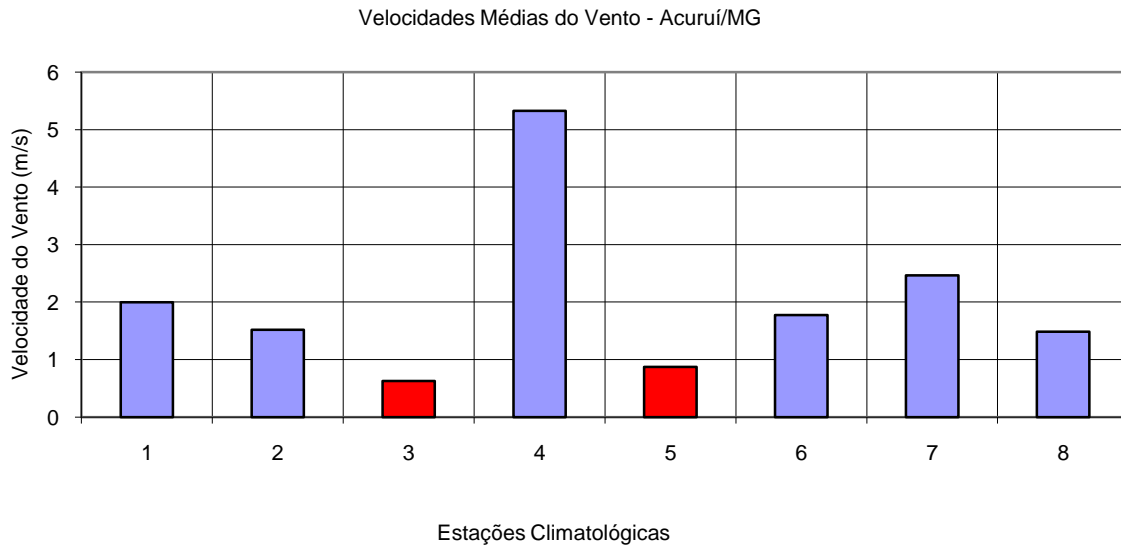


Figura 6.16 Média das velocidades média diária do vento na região da Acuruí-MG.

Na busca de uma explicação científica sobre o reduzido perfil experimental de velocidade do vento das Estações 3 e 5 em Acuruí-MG, foi identificada uma causa natural devido à geografia da região onde essas estações estão posicionadas. A Figura 6.17 mostra uma visão em planta através de imagem obtida no Google das estações 3 e 5. Observa-se que, essa região é totalmente ondulada e as estações estão sombreadas pelas montanhas da região ao seu redor. Isso explica o registro experimental do perfil com amplitude reduzida da velocidade do vento dessas duas estações de medição de vento em relação às demais.



Figura 6.17 Visualização em Planta das Estações de Vento 3 e 5 na região da Acuruí-MG.

A Figura 6.18 mostra com mais detalhes uma visão em elevação através da imagem Google das estações 3 e 5. Observa-se que a formação de regiões com depressões no relevo favorece a formação de regiões com estagnação na velocidade de vento na CLA. Isto é possivelmente a causa dos registros com baixa intensidade de velocidade de vento nas estações 3 e 5.

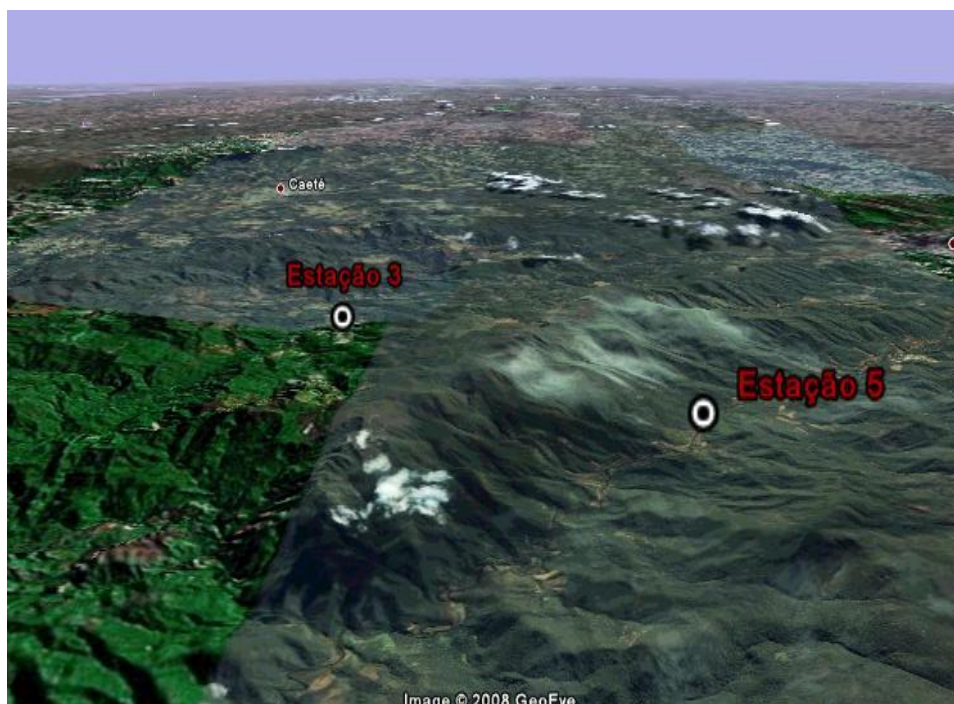


Figura 6.18 Visualização em Elevação das Estações de Vento 3 e 5 na região da Acuruí-MG.

## 6.6 Conclusão

A partir das três análises realizadas nesse capítulo, é possível concluir que:

- Etapa 1: A comparação entre as velocidades do vento simulada e medida, apresentou razoável concordância, e que pelo menos do ponto de vista qualitativo justifica a utilização do processamento da CLA no âmbito da metodologia AmpCLA. A direção do vento no relevo da região da CLA, em regiões com grandes obstáculos naturais, tem influência direta na variação da amplitude da velocidade do vento em relação aos vãos da linha aérea, conforme apresentado na Figura 6.9 e na Figura 6.10.
- Etapa 2: A análise comparativa entre valores numéricos de velocidade do vento, para os dois vãos 50 e 75, apontou o vão 50 como sendo o mais crítico, isto é, com menores valores de velocidade do vento. Esta observação foi confirmada pela comparação entre valores de temperatura do condutor para os dois vãos, isto é, o vão com menor valor de velocidade é o que teve maior temperatura do condutor.
- Etapa 3: A comparação entre os valores médios de velocidade do vento, registrados pelas estações climatológicas, apontaram que os valores amostrados pelas estações 3 e 5 eram menores que os demais. A compreensão do motivo deste fato foi possível através da análise das imagens de satélite na região de Acuruí-MG, que mostraram nitidamente a existência de obstáculos naturais que impedem os deslocamentos das massas de ar e dificultam a mecânica dos fluidos.

Conforme mostraram os resultados brutos obtidos na Figura 6.13, pode-se destacar duas características fundamentais que estão listadas a seguir:

- A ampacidade determinística, simulada para velocidade do vento constante e igual a 1 m/s, temperatura ambiente de 30 °C e radiação solar de 1000 W/m<sup>2</sup>, apresentou valores conservadores, pois, em nenhum momento a temperatura do condutor, monitorada em campo, ultrapassou a temperatura de projeto da linha monitorada.

- Ficou comprovado numérica e experimentalmente que a CLA tem influência sobre o perfil térmico do condutor ao longo da linha aérea estudada. Nesse caso, esse fenômeno foi medido e simulado.

## ***7 Análises Finais da Metodologia AmpCLA e dos Resultados***

### ***7.1 Introdução***

Esse capítulo apresenta as análises da metodologia AmpCLA e dos resultados obtidos no estudo da linha de transmissão de 138 kV na região de Acuruí. Essas análises permitem extrair algumas constatações técnicas que justificam e incentivam o uso da metodologia AmpCLA de cálculo da ampacidade proposta nessa tese.

### ***7.2 Análise da Modelagem Matemática AmpCLA***

De forma genérica, o modelo matemático da AmpCLA desenvolvido nessa tese consegue diferenciar as regiões com comportamentos distintos da CLA. Dois fatores foram fundamentais para atingir esse objetivo, conforme estão listados a seguir:

- A possibilidade de localizar os vãos críticos em relação tanto à climatologia quanto ao projeto eletromecânico da linha. Isto permite realizar um cálculo de ampacidade mais realista e muito mais seguro ao longo de toda a linha aérea do que a prática atual.
- Distinção de regiões PPP e PPNP no cálculo da ampacidade, conforme mostrado no capítulo 4. Essa distinção entre regiões PPP e PPNP proporcionou uma boa concordância entre os resultados experimentais e aqueles calculados com a metodologia AmpCLA. Estes resultados foram também validados com dados monitorados na linha aérea em operação na região da Acuruí-MG.

#### ***7.2.1 Análise do Fator de Correção***

O Fator de Correção –  $F_c$  para a ampacidade estatística, para ambos os regimes normal e de emergência, foi uma alternativa algébrica simples, mas plausível, implementada na metodologia AmpCLA para diferenciar os problemas classificados como PPP – “Perfil e Planta

Plano” do PPNP – “Perfil e Planta não Plano”. Dessa forma, no exemplo hipotético de 50% de redução no valor da velocidade do vento de referência a 10 m de altura, mostrada no capítulo 4, e no caso real com 10% de redução no valor da velocidade do vento, conforme mostrado no capítulo 5, os resultados dos cálculos da ampacidade foram satisfatórios e fisicamente coerentes com os dados monitorados na linha aérea.

Apesar da aplicação do Fator de Correção ser uma etapa de cálculo da metodologia AmpCLA, com certeza essa etapa se justifica em função do aumento da segurança na operação da linha aérea.

### ***7.3 Análise do Cálculo da Ampacidade via AmpCLA***

Os resultados gerados pela aplicação da metodologia AmpCLA, no caso real, apresentam um ganho determinante na capacidade final de transmissão das linhas aéreas. Duas constatações principais emergem da análise da Tabela 5.9, rerepresentada na Figura 7.1 a seguir:

- O método de cálculo de ampacidade estatística, em regime normal e de emergência, comparado com o método determinístico, é mais fiel às condições reais de temperatura ambiente e velocidade do vento. Os resultados mostram, para o caso da linha aérea de 138 kV da região de Acuruí-MG, um ganho considerável na capacidade de transmissão de, respectivamente, 35% e 17%.
- Em relação aos dados monitorados, para a mesma linha aérea anterior, conforme mostrados na Figura 6.13, o método determinístico de cálculo de ampacidade é conservador, o que reforça o ganho em aumento real de ampacidade na operação diária da linha com a aplicação segura e criteriosa do método estatístico quando os vãos críticos forem monitorados em conjunto.

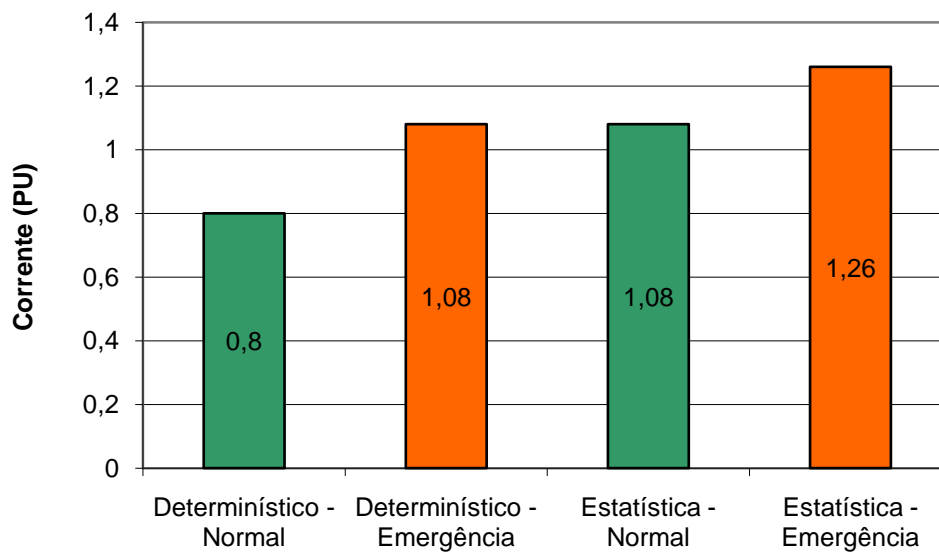


Figura 7.1 Comparação entre os valores de ampacidade calculados utilizando o método determinístico e o estatístico, para regimes normal e em emergência, extraídos da Tabela 5.8.

#### ***7.4 Análise dos Resultados de Validação do Modelo da Camada Limite Atmosférica***

Em relação à comparação entre os dados simulados e os valores medidos da amplitude da velocidade de vento em Acuruí-MG , pode-se concluir que:

- Os dados de velocidade do vento, extraídos do banco de dados da CLA, o qual adota o modelo em micro-escala e para atmosfera neutra com número de Froude superior a 1000 [VALLE, 2005], apresentaram boa concordância com os resultados medidos.
- O uso de simulações da velocidade do vento da CLA mostrou-se ser fundamental para o cálculo de ampacidade mais fiel às condições climatológicas, quando não se dispõe de dados reais monitorados próximos ou diretamente nos condutores das linhas aéreas.

## ***7.5 Análise dos Dados Adquiridos com o Sistema de Monitoramento de Temperatura do Condutor***

Em relação aos dados experimentais obtidos pelos sensores Power Donut, foi confirmado experimentalmente uma excelente correlação física entre os perfis de amplitude de velocidade do vento e de temperatura do condutor, medidos em dois vãos distantes da linha aérea de 138 kV da região de Acuruí-MG. Os dados de temperatura do condutor mostraram uma diferença clara entre os perfis térmicos dos vãos 50 e 75. Essa diferença se justifica exclusivamente pela alteração climatológica entre esses vãos, uma vez que, a corrente da linha praticamente não varia ao longo da mesma.

## ***7.6 Conclusão***

Neste capítulo foi possível gerar análises dos resultados satisfatórias, obtidos com a aplicação da metodologia AmpCLA em caso real de linha aérea em operação. Mais algumas análises são descritas a seguir:

- Um novo conjunto procedimentos para o cálculo da ampacidade de linhas aéreas foi apresentado e analisado nessa tese.
- Uma nova filosofia para encontrar vãos críticos em linhas aéreas foi apresentada.
- O monitoramento físico de poucos vãos críticos na linha aérea é suficiente para auxiliar a aplicação eficaz da metodologia AmpCLA.
- A possibilidade de melhorar a exploração das linhas em operação é viável conforme resultados mostrados na Figura 7.1.

Os resultados mostram que quando não se dispõe em número suficiente de estações climatológicas distribuídas ao longo das linhas aéreas, o uso do banco de dados com as simulações da CLA é fundamental para a melhoria do processo de cálculo de ampacidade.

## ***8 Conclusões***

O desenvolvimento e a validação de uma nova metodologia de cálculo de ampacidade, mais segura e realista em relação à metodologia clássica, foram apresentados nessa tese. A metodologia proposta, AmpCLA, fez uso no processo de validação de um banco de dados contendo valores da amplitude da velocidade do vento, obtidos com simulações da camada limite atmosférica, e da tecnologia de monitoramento em tempo real da temperatura do condutor ao longo de dois vãos distantes em uma linha aérea, em operação real na região de Acuruí-MG.

Os resultados com a aplicação desta metodologia em comparação com a metodologia clássica resultou em um ganho significativo em termos do aumento do nível de segurança operacional como no aumento real da capacidade de transmissão de energia elétrica. A nova metodologia AmpCLA possibilitou gerar um conceito inovador para o cálculo de ampacidade das linhas aéreas.

DEB [DEB, 2000] modelou o problema do cálculo da ampacidade com coerência física, mas infelizmente não definiu um critério técnico para transportar as informações climatológicas a partir das estações de monitoramento para os vãos críticos de uma dada linha aérea. A utilização do monitoramento em tempo real em vários vãos sem considerar quais são os vãos críticos da linha é de custo muitíssimo elevado e sem segurança, portanto proibitivo para as concessionárias. Assim, a metodologia AmpCLA - “Metodologia de Cálculo da Ampacidade de Linhas Aéreas Utilizando o Estudo da Camada Limite da Atmosfera” – se torna uma alternativa plausível e de baixo custo para as concessionárias.

Como conclusão geral da tese, os resultados obtidos com o uso da nova metodologia de cálculo de ampacidade - AmpCLA foram considerados satisfatórios e com elevado grau de ineditismo. A viabilidade técnica dessa metodologia foi testada e analisada com sucesso através de aplicações, teórica e prática, o que possibilita uma mudança conceitual considerável na forma tradicional de se calcular a ampacidade de linhas aéreas em relação à literatura técnica disponível.

Atualmente, um campo amplo para aplicação da AmpCLA se justifica na área da operação de linhas aéreas, pela possibilidade real de se conseguir um aumento importante na capacidade de transmissão de energia, conforme demonstrado pelos resultados obtidos.

Com certeza, fatos motivadores e desafiadores como a dificuldade de se construir novos projetos devido às restrições ambientais e econômicas, certificam a relevância da metodologia AmpCLA, a qual permite calcular a ampacidade de linhas aéreas com mais segurança, e com possibilidades reais de ganho de ampacidade.

### **Propostas de Continuidade das Pesquisas**

Durante as fases de pesquisa, desenvolvimento, projeto e validação da metodologia AmpCLA foram verificados alguns pontos que requerem a continuidade dos investimentos por meio de novas pesquisas para melhoria dessa metodologia. Esses pontos estão listados a seguir:

- Banco de Dados da CLA: Essa base de dados digital foi construída para uma camada limite da atmosfera completamente desenvolvida e em regime hidrodinâmico, isto é, sem considerar os efeitos térmicos e de rugosidade do relevo. Dessa forma, seria importante explorar o aprimoramento dessa modelagem para verificar se ocorreria algum ganho na precisão dos dados simulados.
- Estações de Velocidade de Vento em Acuruí-MG: Como os equipamentos usados nessa tese são da década de 90, seria interessante melhorar tecnologicamente esses equipamentos, como por exemplo, usar os novos medidores de velocidade e de direção de vento com uso de ultra-som. A melhoria na qualidade da aquisição dos dados experimentais irá melhorar a condição de contorno e a validação da CLA, e com isso, gerar simulações cada vez mais próximas da realidade de campo.
- Cálculo da Ampacidade no Critério Estatístico: O método de cálculo estatístico utilizado nessa tese está baseado no conceito de risco térmico que foi proposto por [FT Ampacidade, 1993]. Dessa forma, seria interessante investir na

melhoria sobre o conhecimento dessa metodologia, como por exemplo, por meio de novos modelos probabilísticos.

- Sazonalidade dos Dados Climatológicos: Para não tornar os objetivos dessa tese extensos, não foi explorado o efeito da sazonalidade dos dados climatológicos sobre o cálculo da ampacidade. Mas de qualquer forma, o estudo criterioso da sazonalidade climatológica em uma dada linha aérea deve trazer novos conceitos para o cálculo de ampacidade, e principalmente ganhos para a operação em tempo real dessas linhas aéreas.
- Fator de Correção da ampacidade: Apesar desse fator de correção captar a influência dos vãos críticos na linha aérea é necessário aumentar o número de simulações para melhorar a precisão dos resultados. Para isso é necessário reduzir o tempo computacional de processamento da CLA com o objetivo de permitir uma transferência espacial e temporal do histórico dos dados de uma dada estação climatológica para qualquer vão crítico da linha aérea, sem a necessidade de uso do Fator de Correção da ampacidade, conforme proposto nessa tese.

## 9 Referência Bibliográfica

- DEB, A. K. *Powerline ampacity system, theory, modeling and applications – book*, CRC Press – NY-USA, 2000.
- BEZERRA, J. M. B.; Liberato, J. A. L. e Eduardo, J. V. "Aplicação de Processos Semi-Probabilísticos na Definição de Limites de Carregamento em LT's em Condições Normais e de Emergência". IX SNPTEE. 1987.
- CFX-5.5 - AEA Technology plc. *Documentation*. AEA Technology Engineering Software Ltd, United Kingdom, 2002.
- CHISHOLM, Willian A. *A Comparison of nine predictors of clearance*, Canada, 2004.
- CHISHOLM, Willian A. and S. PATERSON. *Reasons for sag and clearance errors*, ESMOL-Panel Session 20, April 2003.
- CIGRE-Task Force B2.12.6, *Guide for selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings*. December 28, 2005.
- CINIGLIO, Orlando A. and DEB A. K. *Optimizing transmission path utilization in Idaho Power*. IEEE Transactions on power delivery, Vol. 19, No. 2, April 2004.
- D. SÁNCHEZ – *Increase in transmission capacity in high-voltage power lines on the Levante (Eastern Spain) coastal path - (B2-206)*. Cigre-Paris-2004.
- DA SILVA, H. F. *Uma alternativa técnico-econômica para aumentar a capacidade de transmissão via monitoramento em tempo real de linhas aéreas*. XVIII SNPTEE GOP-250, Curitiba/PR-Brasil, Outubro-2005.
- DA SILVA, H., F. "Um Sistema Integrado de Monitoração e Previsão de Carga Elétrica de Curto Prazo". Tese de doutoramento, PUC-Rio, abril 2001.
- DINIZ, J.H., *Carregamento elétrico de linhas de transmissão com análise comparativa de resultados obtidos utilizando metodologias determinística e estatística e dados coletados na LT Experimental Bonsucesso-Nova Lima - GLT/09 / XIII SNPTEE - Florianópolis/SC, Brasil, 1995*.
- D.A. Trifonopoulos and G.C. Bergeles, "Stable stratification effects on the flow past surface obstructions: A numerical study", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 13, No. 2, June 1992.
- Do NASCIMENTO, C.A.M. e Vasconcelos, J.A., *Short term rating assessment are often based on actual weather parameters. – "Increasing capacity of overhead lines" special report for group B2 - Overhead Lines: Question 1.3 - Cigre Session 2008 - Paris, France. 24 - 29 August, 2008c*.
- Do NASCIMENTO, C.A.M. e Vasconcelos, J.A., "Análise Sistêmica da Ampacidade de Linhas Aéreas de Transmissão nas Abordagens Determinística e Estatística", *Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu-Pr – 2007*.
- Do NASCIMENTO, C.A.M., VALLE, R.M. e Vasconcelos, J.A., – *While using real time monitoring systems, how should one determine the best spans to be instrumented and how many spans should be instrumented? "Increasing capacity of overhead lines" special report for group B2 - Overhead Lines: Question 1.6 - Cigre Session 2008 - Paris, France. 24 - 29 August, 2008b*.
- Do NASCIMENTO, C.A.M.; Castro, A.C.; Alexandre S. Paulino; Hugo M. Matoso; Marcello D. G. Júnior; Saulo L. S. Mariano; Moisés Ferber; Geraldo A. C. França e João A. Vasconcelos. "Controle e monitoramento de temperatura de condutores em linhas áreas de alta tensão", CBA – Juiz de Fora – UFJF 2008a.
- DOUGLASS, D.A. – *Field application of a dynamic thermal circuit rating method*. 1998.
- DOUGLASS, D.A. – *IEEE's Approach for increasing transmission line ratings in North America*. Paris, 22-302 – Cigre, 2000.
- DRAGER, H.J. - *Development and Implementation of a Monitoring System to Increase the Capacity of Overhead Lines – Group B2-101 – Cigre Session Paris/France/August-2008*.
- ELECTRA 144. *The thermal behaviour of overhead conductors*", WG 22.12, , October 1992.
- ELECTRA 174 - WG 22.12. *The thermal behaviour of overhead conductors*", October 1997.
- FT AMPACIDADE, GTCP/CTST/GCPS. *Ampacidade estatística de linhas aéreas de transmissão com condutores alumínio/aço - , março, 1992*.

FT AMPACIDADE, GTCP/CTST/GCPS. Critérios e procedimentos para o cálculo de ampacidade estatística de linhas aéreas de transmissão com condutores alumínio/aço - agosto, 1993.

FURTADO, T.A., - Carregamento elétrico de linhas aéreas de transmissão, informações coletadas na LT Experimental Bonsucesso - Nova Lima. XIII – ERLAC – Foz do Iguaçu-1997a.

FURTADO, T.A., NASCIMENTO C.A.M - Avaliação dos modelos determinístico e estatístico para carregamento da LT Arcos-Divinópolis 2, 138 kV, utilizando sistema de monitoramento em tempo real - XIV-SNPTEE – Belém/PA, Brasil, OUT/1997b.

GUMBEL, E.J. - *Statistics of extremes*, book. Columbia University – New York – 1958.

G. BRUNO, - *Increasing Capacity of Two Italian Lines by the Adoption of Devices for Monitoring Environmental Conditions and Conductors Temperature or by Using High-Temperature Conductors* – Group B2-102 – Cigre Session Paris/France/August-2008.

G.A.A. Moreira, R.M. Valle, W.L.S. Carvalho, “Numerical simulation of neutral atmospheric boundary layer flow”, In: ENCIT 2008 - 12th Brazilian Congress of thermal Sciences and Engineering, Belo Horizonte, 2008.

G.J. Ramon, “Dynamic Thermal Line Rating: Summary and Status of the State-of-the-Art Technology”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, No. 3, July 1987.

HOLBERT, K.E. – *Prospects for dynamic transmission circuit ratings*. Arizona State University. 2000.

HUSER, A., NILSEN, P.J., and SKATUN, H., Application of k-ε model to the stable ABL: pollution in complex terrain, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67-68, pp. 425-436, 1997.

IEEE Std 738™-2006. *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors*, 30 January 2007, 2007.

IGNÁCIO, J. S., - Ampacidade Estatística – medições em laboratório e de campo – XVIII – SNPTEE – Curitiba – Out/2005.

JAUFER, S. - *Experiences with the Weather Parameter Method for the use in Overhead Line Monitoring systems* – Group B2-105 - Cigre Session Paris/France/August-2008.

M. WEIBEL – *Overhead line temperature monitoring pilot project*. WG-B2 – Paris, Cigre 08, 2006.

MARTINS, M.A., *Estimativa de erro e adaptatividade para métodos de volumes finitos em malhas triangulares não estruturadas*, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG, Belo Horizonte, 2002.

MENEZES, A. A. – *Técnicas de transferência espacial de variáveis climáticas como ferramenta objetiva na otimização dos sistemas elétricos de potência* - XVI SNPTEE, Campinas, SP – GLT, 2001.

MONTAVON, C., *Validation of a non-hydrostatic numerical model to simulate stratified wind fields over complex topography*, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76, 1998, pp. 273-282., 1998.

MOREIRA, F Silva – *Influência do Cálculo da Ampacidade no Despacho da Operação*. Tese de Doutorado da UNICAMP – Campinas/SP. Fevereiro, 2006.

MORGAN, V.T. – *Thermal rating of overhead line conductors Part I. The steady-state thermal model*, CSIRO Division Applied Physics, 1981.

MORGAN, V.T., - *The Thermal Rating of Overhead-Line Conductors”, Part I. The Steady-State Thermal Model*. 174, November 1982.

N. G. Wright, and G. J. Easom, “Non-linear k-ε turbulence model results for flow over a building at full-scale”, *Applied Mathematical Modelling*, 27, pp. 1013–1033, 2003.

NASCIMENTO, C. A. M.– *Metodologia experimental para a utilização de condutores termorresistentes (TAL) em linhas e redes* – Dissertação de Mestrado – UFMG – Dpto de Eng. Mecânica – Out/1999.

NASCIMENTO, C. A. M.– *The State of the Art for Increased Overhead Line Ampacity Utilizing New Technologies and Statistical Criteria* – IEEE T&D 2004 – Latin American – São Paulo-Brazil - 2004.

NASCIMENTO, C.A.M., *Aplicação de tecnologia de monitoramento em tempo real de I<sub>ts</sub> para aumentar a capacidade de transmissão*, XVI SNPTEE, Campinas, SP. No. 26, pp. 33-37. *Revista Eletro Evolução de Março/2003*.

NASCIMENTO, C.A.M., *Validação do Método de Cálculo da Ampacidade Estatística na CEMIG* – XVII – SNPTEE – Uberlândia. No. 34, pp. 46-52. *Revista Eletro Evolução de Março/2004*.

NBR-5422. *Projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica* - março, 1985.

NEIL, P. Schmidt, *Comparison between IEEE and CIGRE ampacity standards*, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.14 No.4, pp. 1555-1562, 1999.

PAPOULIS, A. - *Probability, random variables, and stochastic processes*, book. Third Edition. ISBN-0-07-048477-5 – 1991.

PEEBLES, P.Z. – *Probability, random variables, and random signal principles*, book. Third Edition. ISBN-0-07-112782-8 – 1993.

PLS-CADD™ (*Power Line Systems - Computer Aided Design and Drafting - www.powline.com*), USA.

P&D-162 – VASCONCELOS, J.A. e Do NASCIMENTO, C.A.M – “*Aplicação do Estudo da Camada Limite da Atmosfera na Ampacidade de Linhas Aéreas*” – CEMIG/UFMG/ANEEL – CICLO 2004/05/06 - 2008

RAITHBY, G.D. and STUBLE, G. D., *Prediction and Comparison with Experiment of Three-Dimensional Flow over the Askervein Hill*. Rep. Thermal Science Ltd., Waterloo, Ont. Canada. 1985.

REN-191/ONS, *Capacidade operativa das instalações de transmissão integrantes da rede básica e das demais instalações de transmissão* – 2005.

SEPPA, Tapani O., *Accurate ampacity determination: Temperature – sag model for operation real time ratings*, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 10 No. 3, July 1995.

SEPPA, Tapani O., *Variability of conductor temperature in a two spans test line*, Cigre, TF-12-6 (B2), October 21, 2004.

SIWY, E., *Risk Analysis in Dynamic Thermal Overhead Line Rating*, 9<sup>th</sup> International Conference on Probabilistic Methods to Power Systems – KTH, Stockholm, Sweden – June 11-15, 2005.

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

SWATEK, David R. *An expected per-unit rating for overhead transmission lines*. Electrical Power and Energy Systems 26 241-247, 2004.

TAYLOR P.A. and TEUNISSEN, H.W., *Askervein 82: an initial report on the September/October 1982 experiment to study boundary layer flow over Askervein, South Uist, Scotland*. In: Internal Report MSRB-83-8. Downsview. Ontario, Canada. 1983.

TAYLOR P.A. and TEUNISSEN, H.W., *The Askervein Hill Project: Overview and Background data*. Boundary Layer Meteorology, v.39. pp,15-39. 1987.

TAYLOR P.A. and TEUNISSEN, H.W., *The Askervein Hill Project: Report on the September/October 1983 main field experiment*. In: Internal Report MSRB-84-6. Downsview. Ontario, Canada. 1985.

UCHIDA, T. and ONYA, Y, *Numerical Simulation of Atmospheric Flow Over Complex Terrain*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 81, p. 283-293, 1999.

VALLE, R.M. e NASCIMENTO, C.A.M. et alli - *Introdução do estudo da camada limite da atmosfera em projetos de linhas aéreas de transmissão – XVIII – SNPTEE – Curitiba/Pr-Brasil, outubro, 2005*.

Y. Q. Zhang, S. P. Arya and W. H. Snyder, “*A comparison of numerical and physical modeling of stable atmospheric flow and dispersion around a cubical building*”, Atmospheric Environment, Vol. 30, No. 8, pp. 1327-d 345, 1996.

YAKILI, Fazlollah – *Dynamic thermal line loading monitor*. 85 SM 494-0. 2000.

ZHANG, Y.Q., ARYA, S.P., and SNYDER, W.H., - *A comparison of numerical and physical modeling of stable atmospheric flow and dispersion around a cubical building*, Atmospheric Environment, vol. 30, n. 8, pp. 1327-1345, 1996.

ZHANG, P.; SHAO, M.; LEONI, A.R.;RAMSAY, D.H. and GRAHAM, M., - *Determination of Static Thermal Conductor Rating using Statistical Analysis Method – DRPT2008 6-9 April – Nanjing – China, 2008*.

WAN, H.; MCCALLEY, L.D. and VITTAL, V., - *Increasing Thermal Rating by Risk Analysis*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, August, 1999.

# **APÊNDICE A. Ajuste Estatístico**

## **Introdução**

Através do processamento de um conjunto de amostras, normalmente, é possível modelar fenômenos aleatórios (PAPULIS, 1991). Assim, é possível aplicar técnicas que permitem representar grandes números de dados através de poucos parâmetros dessas amostras, tais como: média, variância e o desvio padrão. Nesse contexto, algumas funções distribuições de probabilidade, largamente conhecidas na estatística e na engenharia, são utilizadas para representar com sucesso fenômenos da natureza. No caso da ampacidade, alguns ajustes têm sido aplicados com bons resultados. Em geral, a distribuição Gaussiana Normal ou outra derivação desse ajuste é largamente utilizada. A seguir são apresentadas as duas funções de distribuição de probabilidade mais usadas na ampacidade Probabilística: a distribuição normal e a logaritmo normal (log-normal). Uma alternativa técnica de construção da função de distribuição de probabilidade é através do método de processamento dos dados brutos da variável aleatória em estudo. No caso da ampacidade ver o exemplo desse processamento no Apêndice B.

## **Ajuste Normal**

As Equações A.1, A.2 e A.3 mostram a formulação da função densidade de probabilidade normal, a cdf e a (1-cdf) correspondente, modeladas através da média e do desvio padrão dos dados da amostra. Essa facilidade de manipulação da distribuição normal é de extrema importância para simplificar o tratamento dos dados da amostragem.

$$f(T_c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{[T_c - T_{med}]^2}{2\sigma^2}} \quad (A.1)$$

$$P(T_c \leq T_{ref}) = \int_{-\infty}^{T_{ref}} f(T) dT \quad (A.2)$$

$$P(T_c > T_{ref}) = 1 - \int_{-\infty}^{T_{ref}} f(T) dT \quad (A.3)$$

Em (A.1) a (A.3):

$f(T_c)$	função densidade de probabilidade da temperatura do condutor	(%)
$T_{med}$	Temperatura média do condutor	(°C)
$\sigma$	desvio padrão do conjunto de dados da temperatura do condutor	(°C)
$T$	Variável aleatória contínua da temperatura do condutor	(°C)
$T_{ref}$	Limite para a variável aleatória da temperatura do condutor ou a temperatura de projeto da linha	(°C)

### **Ajuste Log-Normal a Três Parâmetros**

Na realidade, no problema de ampacidade, o extremo direito da função “pdf” é a região de real interesse para a definição do risco térmico (Veja Figura A.1).

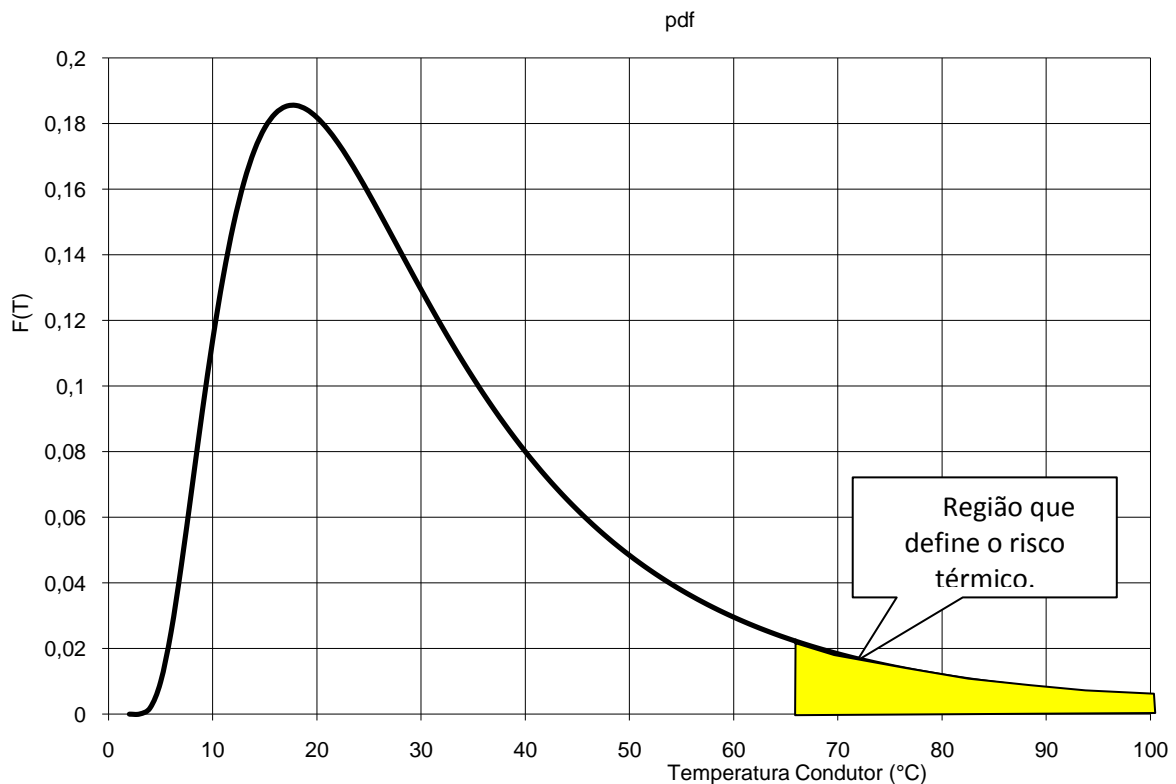


Figura A. 1 Função densidade de probabilidade log-nomal a três parâmetros (pdf).

Assim, a função de distribuição de probabilidades log-normal a três parâmetros é normalmente preferida para este problema pois ela desenvolve melhor o extremo direito da sua curva, obtendo com isso, uma aproximação melhor do perfil térmico do condutor. Os três parâmetros envolvidos são:

- temperatura média ( $T_{med}$ ),
- desvio padrão ( $T_{desv}$ )
- temperatura mínima ( $T_{min}$ ) do condutor

As Equações A.4, A.5 e A.6 mostram respectivamente a formulação para a função densidade de probabilidade, a função distribuição acumulada (cdf) e o complemento da função distribuição acumulada (1-cdf).

$$f(T_c) = \frac{1}{\beta\sqrt{2\pi}}(T_c - T_{min})^{-1} e^{-\frac{[\ln(T_c - T_{min}) - \alpha]^2}{2\beta^2}} \quad (A.4)$$

$$P(T_c \leq T_{ref}) = \int_{-\infty}^{T_{ref}} f(T) dT \quad (A.5)$$

$$P(T_c > T_{ref}) = 1 - \int_{-\infty}^{T_{ref}} f(T) dT \quad (A.6)$$

Em (A.4), os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são respectivamente dados por (A.7) e (A.8).

$$\alpha = \ln(T_{med}) - (\beta^2 / 2) \quad (A.7)$$

$$\beta = \sqrt{\ln[(\sigma / T_{med})^2 + 1]} \quad (A.8)$$

## **APÊNDICE B. Exemplo de Ajuste Estatístico**

### **Introdução**

Sejam  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$  e  $Y=\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , conjuntos de variáveis aleatórias discretas em  $R^2$ . A distribuição de probabilidades de sua ocorrência simultânea pode ser representada pela função com valores  $f(x_i, y_j)$  para qualquer par de valores  $(x_i, y_j)$ . Costuma-se fazer referência a esta função como Distribuição de Probabilidade Conjunta de X e Y. A probabilidade conjunta possui as seguintes propriedades:

- 1.  $f(x_i, y_j) \geq 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \wedge j = 1, 2, \dots, n$
- 2.  $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x_i, y_j) = 1$
- 3.  $P(X = x_i, Y = y_j) = f(x_i, y_j)$

Dado uma variável aleatória bidimensional (X,Y) e sua distribuição conjunta, pode-se determinar a distribuição de X sem considerar Y:

- Distribuição Marginal de X (sem considerar Y)
    - $P(X = x_i) = P(X = x_i, -\infty < y < +\infty)$
- ou
- $P(X = x_i) = \sum_{j=1}^n f(x_i, y_j)$

- Distribuição Marginal de Y (sem considerar X)
    - $P(Y = y_j) = P(-\infty < x < +\infty, Y = y_j)$
- ou
- $P(Y = y_j) = \sum_{i=1}^m f(x_i, y_j)$

A Tabela B.1 ilustra estas definições supondo X ser a variável aleatória velocidade do vento e Y a variável aleatória temperatura ambiente.

Tabela B. 1 Probabilidade conjunta das variáveis aleatórias: velocidade do vento(y) e temperatura ambiente(x)

$\rightarrow Y$ $x \downarrow$	$y_1$	$y_2$	...	$y_n$	Probabilidade Marginal
$x_1$	$f(x_1, y_1)$	$f(x_1, y_2)$	...	$f(x_1, y_n)$	$\sum_{j=1}^n f(x_1, y_j)$
$x_2$	$f(x_2, y_1)$	$f(x_2, y_2)$	...	$f(x_2, y_n)$	$\sum_{j=1}^n f(x_2, y_j)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	
$x_m$	$f(x_m, y_1)$	$f(x_m, y_2)$	...	$f(x_m, y_n)$	$\sum_{j=1}^n f(x_m, y_j)$
Probabilidade Marginal	$\sum_{i=1}^m f(x_i, y_1)$	$\sum_{i=1}^m f(x_i, y_2)$	...	$\sum_{i=1}^m f(x_i, y_n)$	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(x_i, y_j) = 1$

No caso do problema de ampacidade é possível desenvolver essa formulação para as variáveis aleatórias da climatologia, na base das médias horárias da velocidade do vento e temperatura ambiente, que são variáveis com considerável influência na variação do perfil de temperatura do condutor. No caso de se tornar mais complexo o processamento e melhorar a precisão do cálculo da temperatura no condutor, podem-se propor um sistema em  $R^3$  com a adição, por exemplo, da variável radiação solar. De uma forma geral, qualquer variável importante no processo de cálculo da temperatura do condutor poderia ser acrescentada, mas isso não é recomendável em função da elevação do custo computacional a ser gerado. Outro fator relevante para não aumentar a dimensão do problema da ampacidade é devido às incertezas decorrentes nos valores de variáveis intrínsecas ao condutor, como por exemplo, os coeficientes de emissividade e absorção [MORGAN, 1982].

Para exemplificar um caso exemplo na dimensão  $R^2$ , através das Tabelas B.2 e B.3, é mostrado os registros e as freqüências relativas da velocidade de vento e temperatura ambiente, que sintetizam o comportamento da climatologia associada ao problema de ampacidade no perfil térmico do condutor. Na Tabela B.4 é apresentada a simulação numérica via método estático da variável aleatória de interesse que é a temperatura do

condutor na mesma base dos dados climatológicos processados nas Tabelas B.2 e B.3. Em seguida, através da Tabela B.5, obtêm-se as pdf's, cdf's e 1-cdf's da temperatura do condutor.

Tabela B. 2 Número de ocorrências: velocidade do vento e temperatura ambiente.

Classes Temperatura Ambiente (°C)	Classes de Velocidade de Vento (m/s)									
	0 a 1	1 a 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	6 a 7	7 a 8	8 a 9	9 a 10
0 a 5										
5 a 10		1								
10 a 15	4	123	145	27	2					
15 a 20	85	1633	980	681	293	76	14	5	2	1
20 a 25	54	1369	1351	1019	476	87	9	6		1
25 a 30	17	506	715	491	115	6	4		1	2
30 a 35		22	25	19		4				
35 a 40										

Tabela B.3 Frequência relativa percentual dos pares de velocidade do vento e temperatura ambiente apresentados na Tabela B.2.

Classes Temperatura Ambiente (°C)	Classes de Velocidade de Vento (m/s)									
	0 a 1	1 a 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	6 a 7	7 a 8	8 a 9	9 a 10
0 a 5										
5 a 10		0,01								
10 a 15	0,04	1,19	1,40	0,26	0,02					
15 a 20	0,82	15,74	9,45	6,57	2,82	0,73	0,13	0,05	0,02	0,01
20 a 25	0,52	13,20	13,03	9,82	4,59	0,84	0,09	0,06		0,01
25 a 30	0,16	4,88	6,89	4,73	1,11	0,06	0,04		0,01	0,02
30 a 35		0,21	0,24	0,18		0,04				
35 a 40										

Tabela B. 4 Perfil térmico do condutor (°c) calculado para o par *centro da classe* de velocidade do vento e temperatura ambiente apresentados na Tabela B.2.

Classes Temperatura Ambiente (°C)	Classes de Velocidade de Vento (m/s)									
	0 a 1	1 a 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	6 a 7	7 a 8	8 a 9	9 a 10
0 a 5										
5 a 10		43,8								
10 a 15	68,2	60,3	39,8	36,1	33,2					
15 a 20	72,4	62,0	44,4	40,2	35,9	33,3	31,4	31,6	30,5	30,0
20 a 25	77,0	67,2	49,8	45,3	41,4	38,7	36,3	34,6		34,4
25 a 30	54,6	71,7	55,1	50,4	46,7	43,1	41,7	41,0	36,7	35,0
30 a 35		68,8	59,0	55,0		50,9				
35 a 40										

Tabela B. 5 Pdf da temperatura do condutor (°C) via dados brutos e para uma ampacidade conhecida.

Temperatura do condutor (°C)	pdf	cdf	(1-cdf) Risco Térmico
31	0,192827	0	1
32	0,183186	0,00511	0,99489
33	0,510991	0,01022	0,98978
34	0,655611	0,016776	0,983224
35	0,703818	0,023814	0,976186
:	:	:	:
:	:	:	:
70	0,308523	0,984188	0,015812
71	0,35673	0,987755	0,012245
:	:	:	:
:	:	:	:
99	0	1	0
100	0	1	0

### Tratamento Estatístico do Perfil Térmico do Condutor

As Figuras B.1, B.2 e B.3 mostram, respectivamente, a distribuição, o risco térmico via ajuste normal e via log-normal a três parâmetros, sendo possível observar que esse último ajuste representa a curva que melhor se adere aos dados do ponto de vista da segurança. Esse fato é percebido facilmente, onde a curva log-normal se posiciona acima dos dados simulados, e diferentemente da curva normal, onde os dados simulados posicionam-se acima da curva. Devido a esse comportamento, o ajuste log-normal é, ao mesmo tempo, mais conservador e seguro para aplicar no método de cálculo probabilístico.

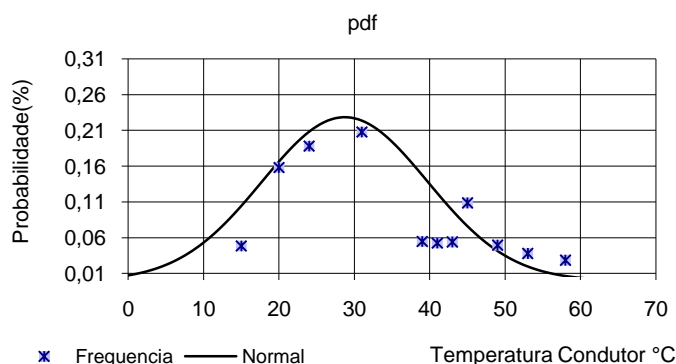


Figura B. 1 Perfil térmico probabilístico do condutor tipo LINNET. Ampacidade de 1 PU e 1000 W/m<sup>2</sup> de radiação solar (Ver Apêndice C).

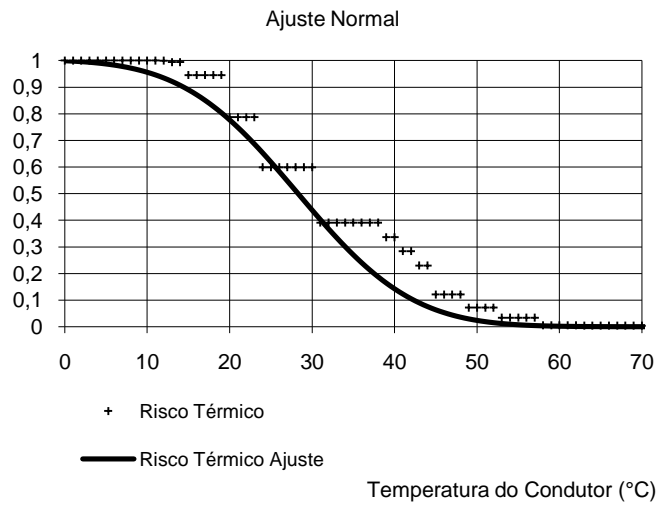


Figura B. 2 Perfil térmico probabilístico do condutor tipo LINNET – ajuste normal.

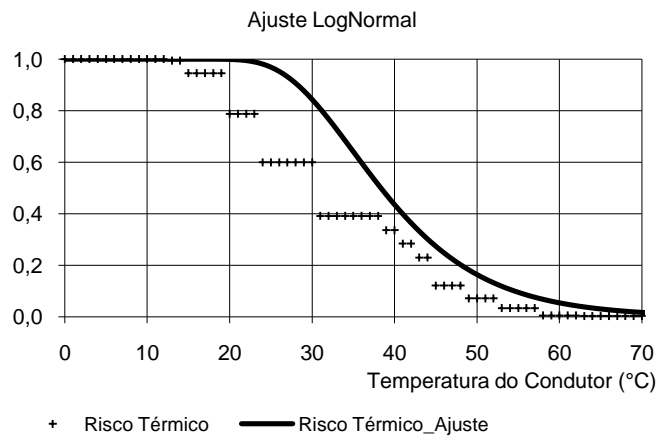


Figura B. 3 Perfil térmico probabilístico do condutor tipo LINNET – ajuste log-normal-3p.

# APÊNDICE C. Simulação do Perfil Térmico do Condutor

Tabela C. 1 Tabela do Perfil Térmico Simulado do Condutor.

T. Amb. (°C)	Velocidade de Vento (m/s)																			
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5
0	80,9	80,9	64,0	58,5	53,4	49,2	45,4	45,8	43,5	41,1	39,5	31,8	24,3	20,2	15,8	13,4	12,4	11,0	9,7	9,2
1	82,0	82,0	65,7	59,3	54,2	49,9	47,0	47,4	44,0	42,7	40,0	33,4	25,3	20,8	17,2	14,4	12,7	11,4	11,2	9,8
2	83,1	83,1	66,6	61,0	54,9	51,5	47,7	49,0	45,6	43,2	41,6	33,8	26,4	22,4	18,6	15,3	13,9	12,8	11,8	11,0
3	84,2	84,2	68,3	61,9	55,7	52,2	49,4	49,6	47,2	43,7	42,1	35,5	27,4	23,0	19,3	17,0	15,1	14,2	13,3	12,2
4	85,2	85,2	69,2	62,7	57,4	53,0	50,1	50,2	47,8	45,4	43,7	35,8	28,5	24,5	20,1	18,0	16,2	14,6	13,9	12,8
5	86,4	86,4	70,1	63,6	58,2	53,7	50,7	51,8	48,3	47,0	44,2	37,5	29,5	25,1	21,5	19,0	17,4	16,0	15,4	14,6
6	87,5	87,5	71,0	64,4	59,9	55,4	52,5	52,5	50,0	47,5	45,8	37,9	30,6	26,7	22,9	20,0	18,6	17,4	16,0	15,2
7	88,6	88,6	72,0	65,3	60,7	56,2	53,2	54,1	50,6	48,1	46,3	39,6	31,6	27,3	23,7	21,0	19,0	17,8	17,0	15,9
8	89,7	89,7	72,9	66,2	61,5	57,9	53,9	54,8	52,2	49,7	48,0	39,9	32,7	28,9	24,5	22,7	20,2	19,2	18,1	17,7
9	90,9	90,9	73,9	67,1	62,3	58,6	55,6	55,4	52,8	50,3	48,5	41,7	33,8	29,6	25,3	23,7	21,4	20,6	18,7	18,3
10	92,0	92,0	74,8	67,9	63,2	59,4	56,3	57,1	53,4	51,9	50,2	42,1	34,9	31,2	27,3	24,7	22,6	21,1	20,3	19,0
11	91,6	91,6	75,8	69,7	64,0	60,2	57,0	57,8	55,1	52,5	50,7	43,8	36,0	31,9	28,2	25,7	23,8	22,5	20,8	20,7
12	92,8	92,8	76,8	70,6	65,8	61,0	57,8	59,5	56,8	54,2	51,3	44,2	37,1	33,1	29,0	26,7	25,0	23,0	22,4	21,4
13	94,0	94,0	77,8	71,6	66,6	62,7	59,6	60,2	57,4	54,8	53,0	46,0	38,2	34,2	29,8	27,7	26,2	24,4	23,0	22,1
14	95,1	95,1	78,7	72,5	67,5	63,5	60,3	60,9	58,1	56,5	53,5	46,4	39,3	35,4	31,2	28,7	26,6	25,8	24,6	23,9
15	96,3	96,3	79,7	74,3	69,3	64,3	61,0	61,6	58,7	57,1	55,3	48,2	40,5	35,6	32,7	29,8	27,8	26,3	25,2	24,5
16	97,6	97,6	80,8	75,3	70,2	66,2	62,9	63,3	60,5	57,7	55,8	48,6	41,6	36,8	33,5	30,8	29,0	27,7	26,8	25,2
17	98,8	98,8	81,8	76,2	71,0	67,0	63,6	64,1	61,1	59,5	57,6	50,4	41,9	38,0	34,4	31,8	29,4	28,2	27,4	27,0
18	98,4	98,4	82,8	77,2	71,9	67,8	64,4	65,8	62,9	60,1	58,2	50,8	43,9	39,2	35,2	32,9	30,7	29,6	29,0	27,7
19	99,6	99,6	83,8	78,1	72,8	68,6	65,2	66,6	63,6	60,7	58,7	52,7	44,2	40,5	36,1	33,9	31,9	31,0	29,6	28,4
20	100,9	100,9	84,9	79,1	73,7	69,5	66,0	67,3	64,3	62,5	60,5	53,1	45,4	41,7	38,2	35,0	33,1	31,5	30,2	30,2
21	102,1	102,1	85,9	80,1	74,6	70,3	67,8	68,1	65,0	63,1	61,1	53,6	46,5	42,9	39,0	36,0	34,4	33,0	31,8	30,9
22	103,4	103,4	87,0	81,1	75,5	71,2	68,6	68,8	66,7	63,8	61,7	55,4	47,7	43,2	39,9	37,1	35,6	33,5	32,4	31,6
23	103,9	103,9	88,0	82,1	76,5	73,0	69,4	70,6	67,5	65,6	63,5	55,9	48,9	44,4	40,8	38,1	36,1	34,9	34,0	33,4
24	104,3	104,3	89,1	83,1	77,4	73,9	71,3	71,4	69,3	66,3	64,2	57,8	49,2	45,7	41,7	39,2	37,3	36,4	34,6	34,1
25	105,6	105,6	90,2	84,1	78,3	74,8	72,1	72,2	70,0	68,1	66,0	58,3	51,3	46,9	42,5	40,3	38,6	36,9	36,3	34,8
26	106,9	106,9	91,3	85,1	79,3	75,6	72,9	74,0	70,7	68,8	66,6	59,4	51,6	48,2	44,7	41,4	39,0	38,3	36,9	35,5
27	108,2	108,2	92,4	86,1	80,2	77,6	73,8	74,8	71,5	69,4	67,3	60,6	52,8	48,4	45,6	42,4	40,3	38,9	37,5	37,3
28	107,9	107,9	92,6	87,1	81,2	78,5	74,6	75,6	72,2	70,1	67,9	61,1	54,0	49,7	46,5	43,5	41,6	40,3	39,2	38,0
29	109,2	109,2	93,7	88,2	82,1	79,4	75,5	76,4	74,1	72,0	69,8	63,1	55,3	51,0	47,4	44,6	42,8	40,9	39,8	38,8
30	110,6	110,6	93,9	89,2	84,1	80,3	76,3	77,2	74,8	72,7	70,4	63,6	56,5	52,3	48,3	45,7	44,1	42,4	41,5	40,6
31	111,9	111,9	95,1	90,3	85,1	81,2	77,2	78,1	75,6	73,4	72,3	64,1	56,9	52,6	49,2	46,8	44,6	42,9	42,1	41,3
32	111,6	111,6	96,2	91,3	86,0	82,1	79,1	78,9	77,5	75,3	73,0	66,0	58,1	53,9	50,1	47,9	45,9	44,4	42,7	42,1
33	113,0	113,0	97,3	91,5	87,0	83,0	80,0	80,8	78,2	76,0	73,7	66,6	59,4	55,2	51,1	49,0	46,4	45,9	44,4	42,8
34	114,3	114,3	98,5	92,5	88,0	83,9	80,9	81,6	79,0	76,8	74,4	67,8	59,7	56,5	53,2	50,1	47,7	46,4	45,1	44,6
35	115,7	115,7	99,7	93,6	89,0	84,9	81,7	82,5	79,8	77,5	76,3	69,1	61,9	56,8	54,2	51,3	49,0	47,0	46,7	45,4
36	115,4	115,4	100,8	94,7	90,1	85,8	82,6	83,4	80,6	78,3	77,0	69,6	62,3	58,1	55,1	52,4	50,3	48,5	47,4	46,1
37	116,8	116,8	102,0	95,8	91,1	86,8	83,5	85,3	81,4	80,2	77,7	70,9	63,6	59,5	56,1	53,5	51,6	50,0	48,0	48,0
38	118,2	118,2	102,3	95,9	92,1	87,7	85,5	86,2	83,4	81,0	78,4	72,2	64,9	59,8	57,0	54,6	52,1	50,6	49,7	48,7
39	119,6	119,6	103,5	97,0	92,1	88,7	86,4	87,0	84,2	81,7	80,4	72,7	65,3	61,1	58,0	55,1	52,6	51,2	50,4	49,5
40	119,3	119,3	103,7	98,2	93,2	89,7	87,4	87,9	85,0	82,5	81,1	74,0	66,6	62,5	59,0	56,2	53,9	52,7	51,1	50,2

Nota: Condição de contorno: condutor LINNET; 1 PU = 510 A; radiação solar = 1000 W/m<sup>2</sup>, coeficientes de emissividade = 0,65 e de absorção = 0,9 e angulo de ataque do vento = 90°.

# ***APÊNDICE D. Resultados Disponíveis na Literatura***

## ***Introdução***

Neste apêndice são apresentados alguns resultados de pesquisas realizadas no âmbito da CEMIG que reforçam a necessidade de se obter uma metodologia de cálculo de ampacidade mais eficiente para aplicação em linhas aéreas. Dentre os estudos realizados, foram escolhidos três casos:

- Influência climatológica medida em Linha Experimental;
- Influência climatológica medida em Linha Aérea em Operação;
- Comparação entre simulações e medições das Ampacidades Determinística e Probabilística.

Estes casos são apresentados a seguir.

## ***Caso 1: Influência climatológica medida em Linha Experimental***

Uma Linha Experimental Bonsucesso-Nova Lima foi construída para gerar uma corrente constante de 415 +/- 10 A (0,81 PU), utilizando-se a própria impedância dos condutores tipo LINNET como carga [DINIZ, 1995] e [FURTADO, 1997]. Esta instalação permitiu mapear as influências climáticas sobre o perfil térmico dos condutores. A Figura D.1 mostra detalhes da instalação experimental e a Figura D.2 o resumo da influência de cada parâmetro climatológico no perfil térmico do condutor.



Figura D. 1 Detalhes da LT Experimental Nova Lima – Bonsucesso da CEMIG.

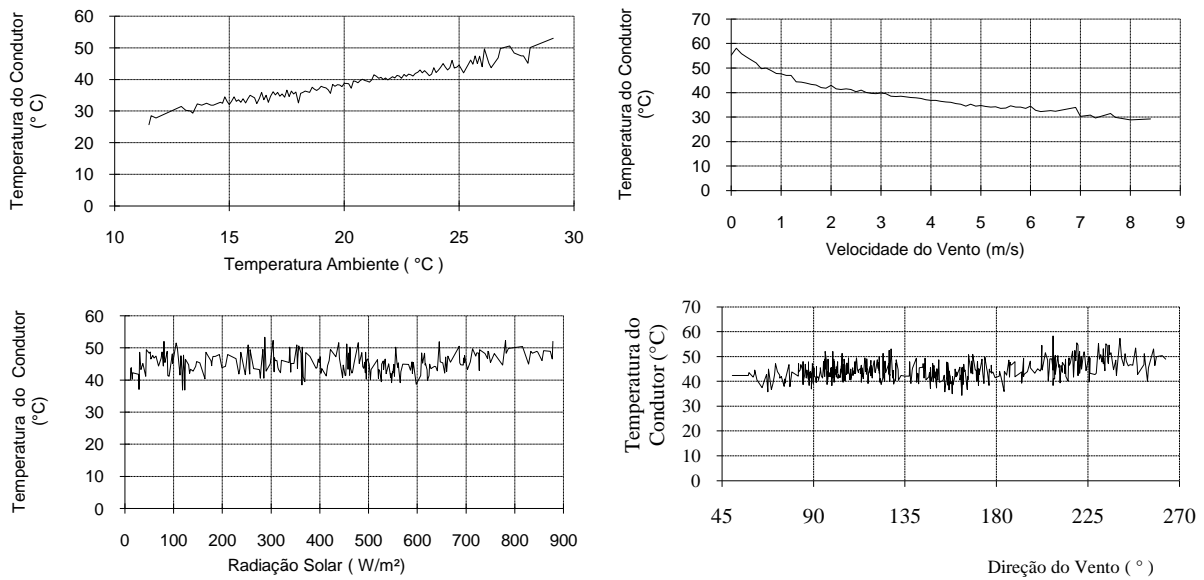


Figura D. 2 Influência das variáveis climáticas no perfil térmico do condutor.

### ***Análise dos Resultados***

Através da Figura D.2 pode-se afirmar que a temperatura do condutor variou de forma linear e crescente com o aumento da temperatura ambiente. Esse parâmetro é estatisticamente bem comportado e não apresentou variações bruscas.

O comportamento da temperatura do condutor é mais sensível à variação da velocidade do vento. Esse parâmetro é de difícil previsão devido à sua aleatoriedade espacial e temporal [MENEZES, 2001], além da dificuldade de medição de valores inferiores a 0,5 m/s.

A radiação solar e a direção do vento apresentaram influência na temperatura do condutor, mas sem correlação, quando comparadas à temperatura ambiente e à velocidade do vento. Dessa forma, é possível afirmar que para o perfil térmico do condutor, a velocidade do vento e temperatura ambiente são as grandezas de maior importância.

### ***Caso 2: Influência climatológica medida em Linha Aérea em Operação***

Uma linha de 138 kV com condutor tipo LINNET, situada em área rural, terreno ondulado, com altitude variando de 700 a 900 metros acima do nível do mar, foi selecionada para os estudos sobre ampacidade sob o regime de emergência [FURTADO, 1999]. Os resultados do monitoramento do perfil térmico do condutor foram gerados a partir do sistema “Power Donut” instalado em um único vão da linha. O escopo da pesquisa incluiu duas estações climatológicas com sensores de velocidade e direção do vento, temperatura ambiente, radiação solar e indicador de precipitação.

### ***Análise dos Resultados***

A Figura D.3 mostra as distribuições percentuais acumuladas dos valores das temperaturas do condutor LINNET, integradas na base horária, a saber:  $T_m$  = temperaturas registradas pelos “Power Donuts” e  $T_c$  = temperaturas calculadas utilizando o conjunto de dados ambientais e valores de ampacidade monitoradas simultaneamente. A comparação entre as curvas da Figura D.4 levou à constatação de que, os valores de “ $T_c$ ” (calculados utilizando a metodologia de [MORGAN, 1982]), na condição de contorno Probabilística, e os dados monitorados aproximaram dos valores reais de “ $T_m$ ” medidos pelos sensores “Power Donuts” para o mesmo vão, ainda que ligeiramente conservativos, fator esse, recomendado para proporcionar folga de segurança no método de cálculo da ampacidade.

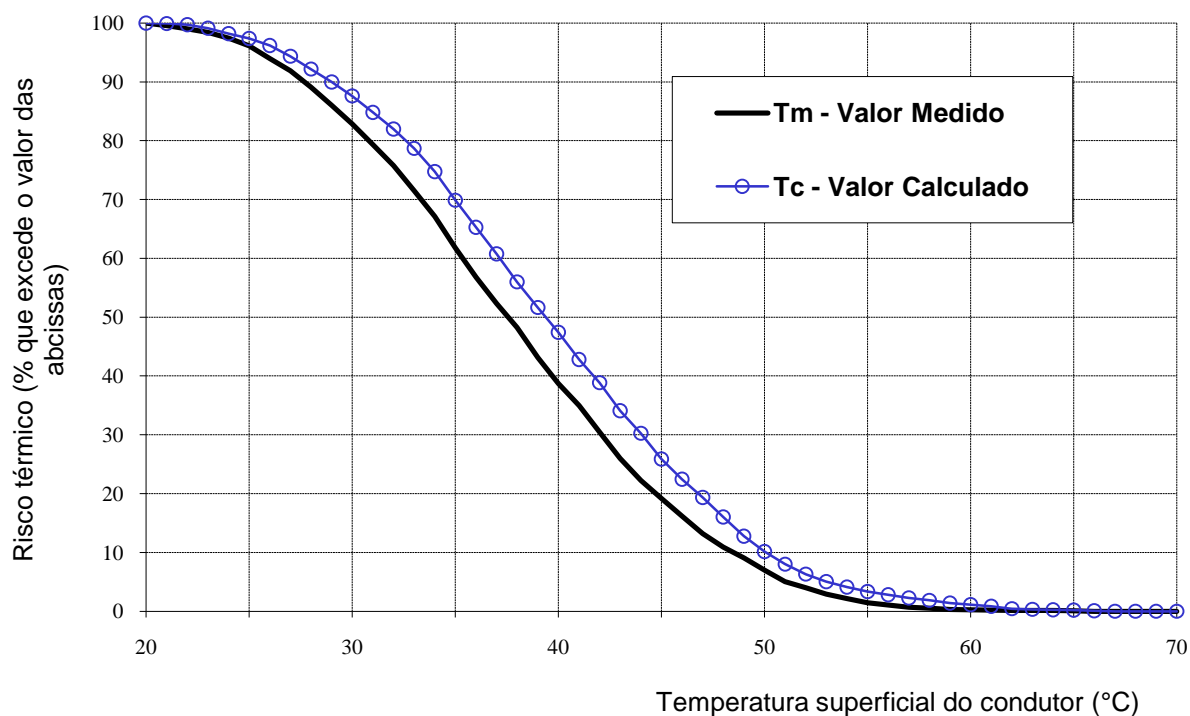


Figura D. 3 Distribuição acumulada das temperaturas calculada e monitorada no condutor.

Dessa forma, foi possível verificar que o modelo de cálculo do perfil térmico do condutor (MORGAN, 1982) é preciso quando comparado aos registros monitorados em campo.

Em outra pesquisa [NASCIMENTO, 2001] usou os sistemas de monitoramento em tempo real de linhas utilizando as tecnologias Power Donut, CAT1 e Sonar para as medições de campo. As informações foram coletadas em três locais diferentes na faixa de servidão da LT Neves 1-2, 138 kV e mais um local, em uma estação climatológica “COA/BH” próxima 15 km dessa instalação, conforme mostram as Figuras D.4 e D.5. Todos os pontos de coleta de dados estão situados na região sudeste, próximos a cidade de Belo Horizonte/MG. Os dados monitorados foram coletados no período de Jan/2001 a dez/2002 [NASCIMENTO, 2003]. Os dados climatológicos foram obtidos através de rede automatizada e rede local de medição, com anemógrafo mecânico, instalado em torre metálica de 10 metros de altura.

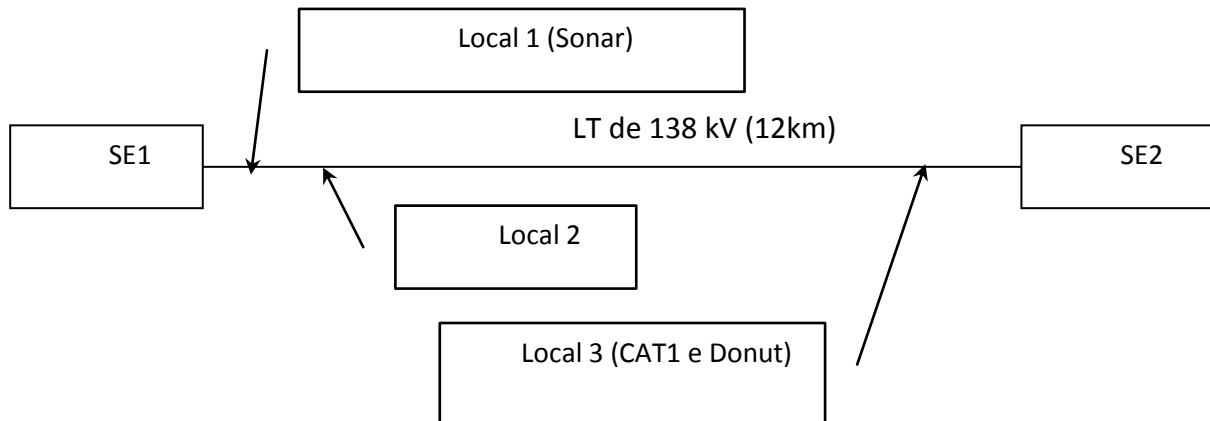


Figura D. 4 Posição dos equipamentos na linha.

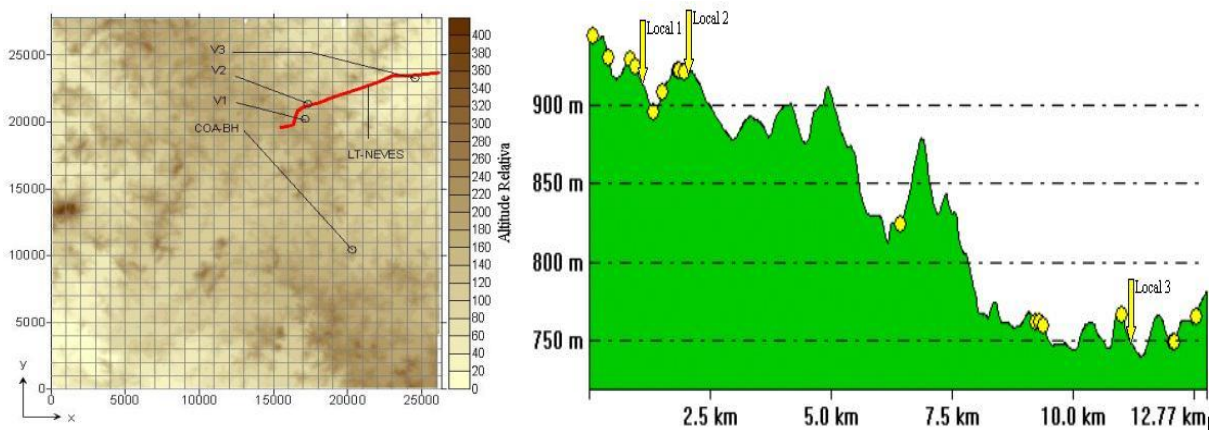


Figura D. 5 Visão espacial e planificada do perfil e planta da linha.

### ***Análise dos Resultados***

Dos resultados mostrados na Figura D.6 permite concluir que o perfil de velocidade do vento ao longo da linha é diferente. O perfil de temperatura ambiente tem variação com a altura em relação ao solo, conforme mostra a Figura D.7. Dessa forma, essa pesquisa mostrou a variabilidade climatológica ao longo da linha, fato esse ainda não considerado nos métodos de cálculo de ampacidade.

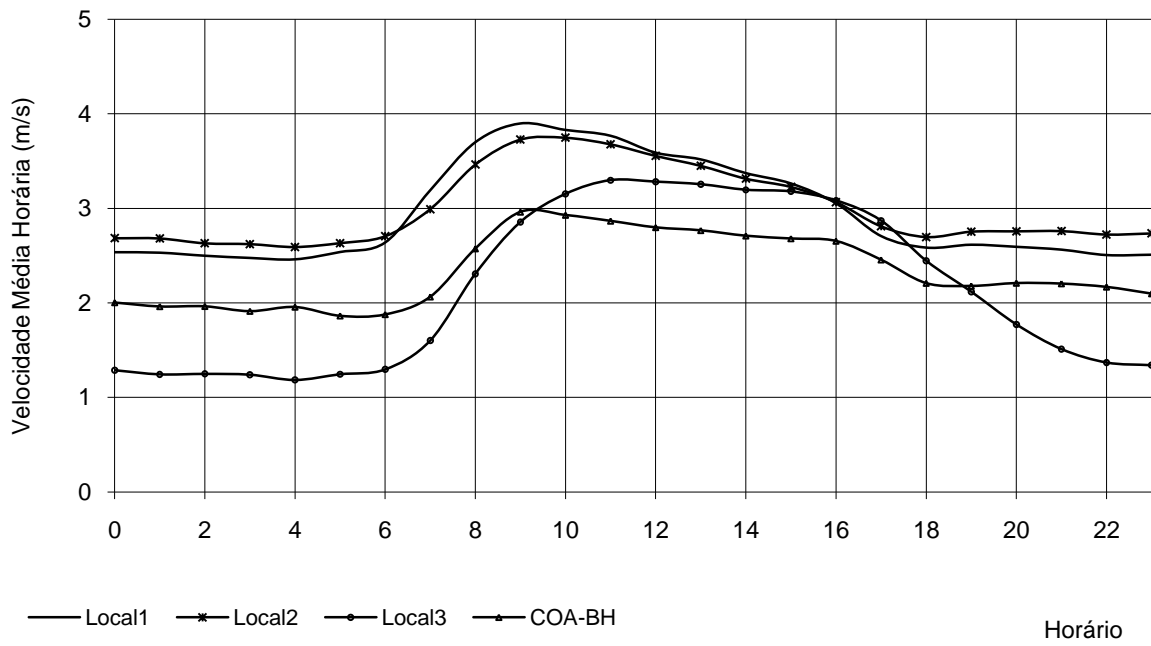


Figura D. 6 Perfis de velocidade média horária do vento (m/s).

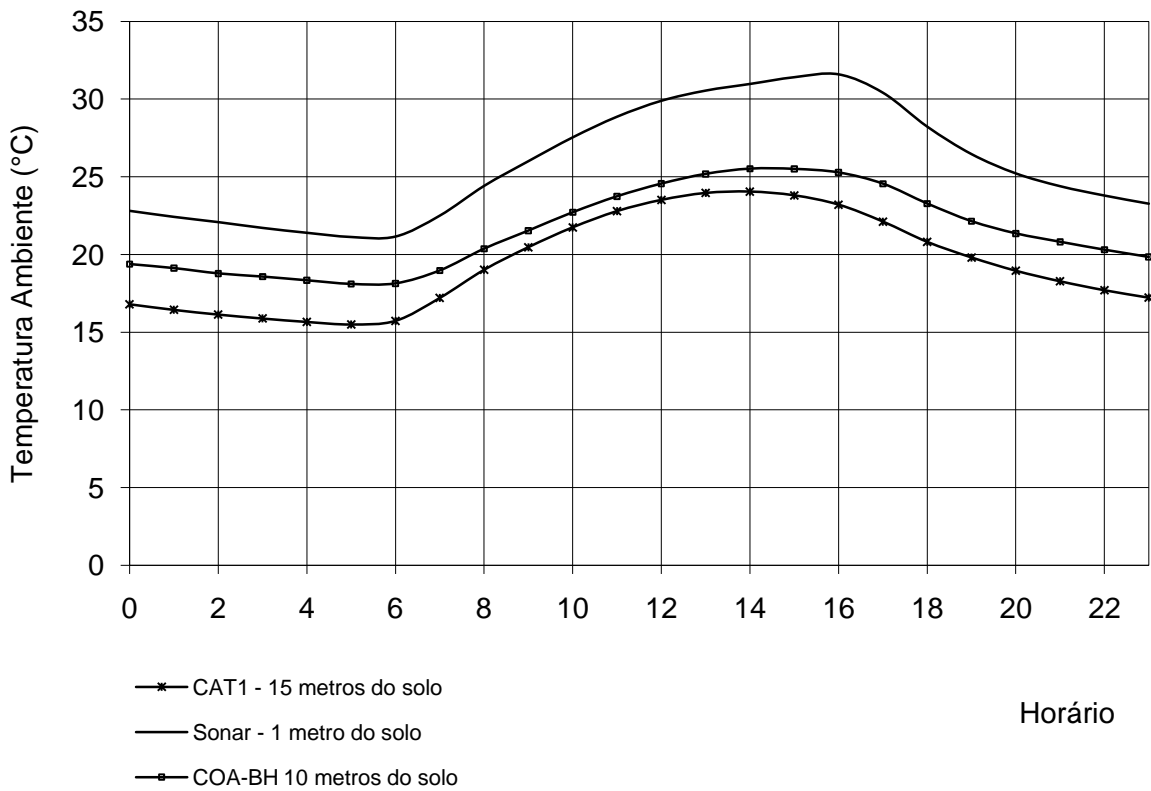


Figura D. 7 Média horária dos perfis da temperatura ambiente em relação à altura do solo.

### ***Caso 3: Comparação entre Simulações e Medições das Ampacidades Determinística e Probabilística***

Em [FURTADO, 1999] é apresentada a Figura D.8 que mostra o perfil de corrente monitorado e os valores das ampacidades calculadas pelos métodos determinístico ou estático e o probabilístico, de 397 A para 464 A na condição “dia – 1000 W/m<sup>2</sup> radiação solar” com (17% de aumento) e de 397A para 558 A na condição “noite – radiação solar nula” com (29% de aumento).

#### ***Análise dos Resultados***

A monitoração contínua da corrente (Figura D.8) e da temperatura do condutor (Figura D.3) mostra que, na condição diurna os valores máximos monitorados são superiores aos valores calculados, mas que efetivamente, a temperatura do condutor raríssimas vezes ultrapassou a sua temperatura de projeto (60°C – Figura D.3).

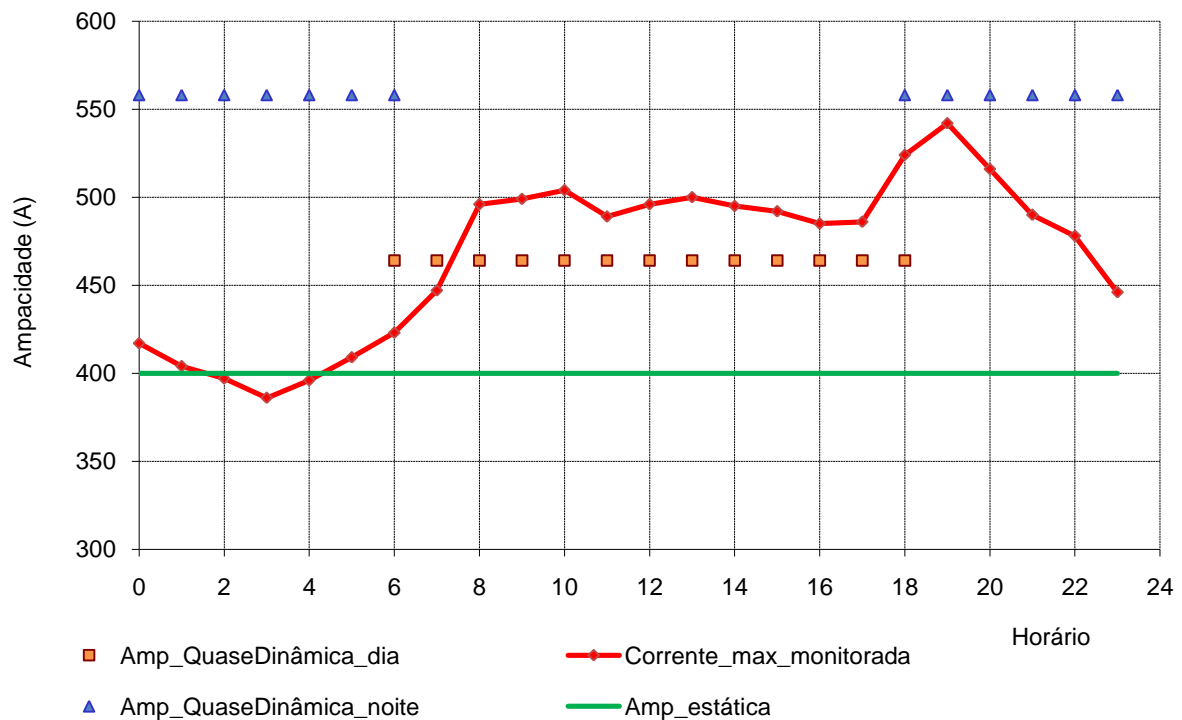


Figura D. 8 Ampacidades calculadas, medidas e os valores máximos registrados.

Com os resultados mostrados na Figura D.8 permite concluir que o método de cálculo da ampacidade determinística ou estática é muito conservador, e que o método probabilístico aproxima dos dados monitorados, ainda com uma margem de segurança.

### ***Conclusão***

Como conclusão desse Apêndice D pode-se destacar a influência dos parâmetros climatológicos sobre o perfil térmico do condutor, ao longo de toda a linha aérea.

## ***APÊNDICE E. Sistema Computacional - AmpCLA***

Para ordenar todas as informações necessárias no processamento da AmpCLA, foram desenvolvidos cadastros por meio de tabelas de dados utilizando tecnologia relacional do tipo SQL-MDB (Search Query Language of MicroSoft Data Base). Esse formato é utilizado em grande escala por bancos de dados e tem características técnicas que facilitam a manipulação e acesso às informações. As informações na metodologia AmpCLA estão listadas a seguir:

- Características do projeto da linha de transmissão;
- Características dos condutores;
- Variáveis de Contorno;
- Informações Climatológicas;
- Banco de Dados da Camada limite da Atmosfera;
- Informações do monitoramento de linhas;
- Resultados dos perfis de velocidade do vento da região de estudo.

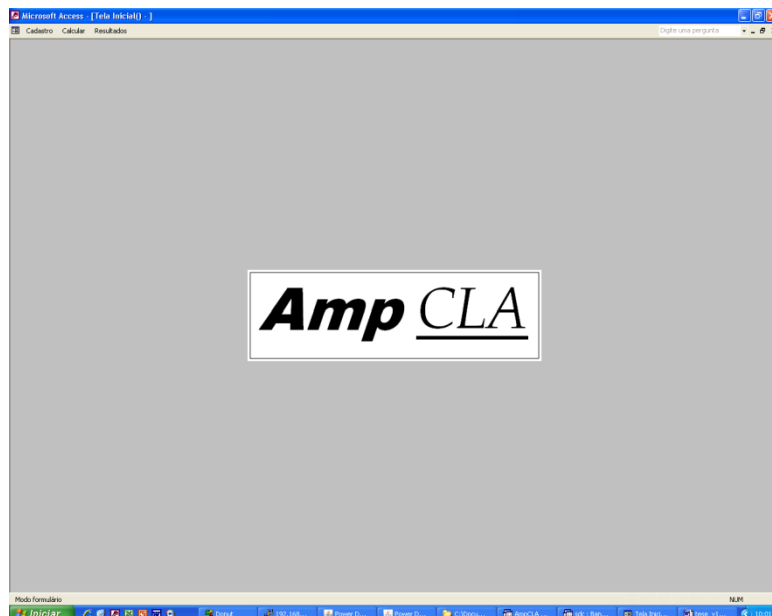


Figura E. 1 Tela Inicial do Sistema AmpCLA.



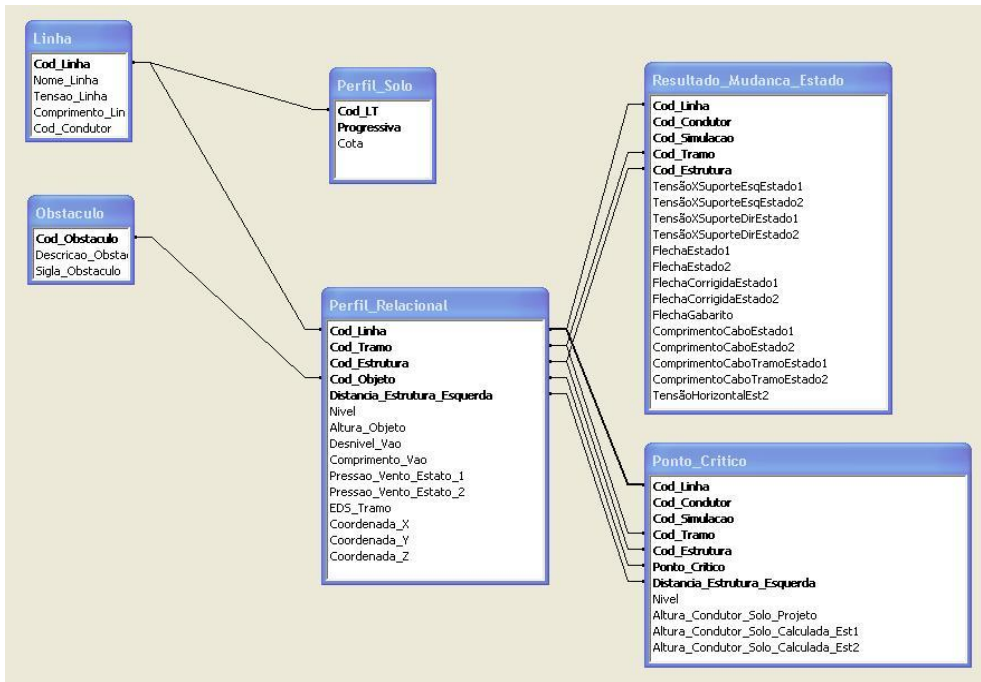


Figura E. 3 Tela com o Relacionamento do Perfil Relacional e Mudança de Estado do Condutor do Sistema AmpCLA.

## Cálculo da Distribuição dos Dados Climatológicos

Microsoft Access - [Frequencia\_Vento\_TAmb]

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Registros Ferramentas Janela Ajuda

Cadastro Calcular Resultados

Parametro Sazonalidade: Simulacao 2

Nome da Estação Climatológica: SE Ouro Preto

Dados | Gráfico

Estadística: Frequencia\_Vento\_TAmb:subsimulacao

Tempo	0 m/s	0.1 m/s	0.2 m/s	0.3 m/s	0.4 m/s	0.5 m/s	0.6 m/s	0.7 m/s	0.8 m/s	0.9 m/s	1.0 m/s	1.5 m/s	2.5 m/s	3.5 m/s	4.5 m/s	5.5 m/s	6.5 m/s	7.5 m/s	8.5 m/s	> 9 m/s	Total	Acu
0																						2730
1																						2730
2																						2730
3																						2730
4																						2730
5																						2730
6																						2730
7																						2730
8																						2730
9																						2730
10																						2730
11																						2730
12																						2730
13																						2730
14																						2730
15																						2730
16																						2730
17																						2730
18																						2730
19																						2730
20																						2730
21																						2730
22																						2730
23																						2730
24																						2730
25																						2730
26																						2730
27																						2730

Registros: 14 | 37 | 1 | 11 | 11 | de 46

Ferramenta de Trabalho: INCLUIR, ALTERAR, DELETAR

Registros: 14 | 37 | 1 | 11 | 11 | de 297

Modo formulário

Windows Taskbar: Iniciar, Domus, Power..., 192..., C:\Do..., Test..., AmpC..., Tela J..., Frequ..., 14:28

Figura E. 4 Distribuição dos Dados Climatológicos – Número de Ocorrências por Período.

## Cálculo do Perfil Térmico Condutor

The screenshot shows a Microsoft Access database window titled 'Condutor\_Perfil\_Termico'. The main window displays a data table with the following columns: 'Temperatura Ambiente' and wind speeds from '0 m/s' to '3.5 m/s'. The data is organized into rows, with the first row (row 1) containing values for each column. The table is currently showing records 1 through 26. The interface includes a menu bar (Arquivo, Editar, Exibir, Inserir, Formatar, Registros, Ferramentas, Janela, Ajuda) and a toolbar with 'Cadastro', 'Calcular', and 'Resultados' buttons. The 'Dados' tab is active, and the 'Gráfico' button is visible. The status bar at the bottom indicates 'Registro: 1 de 46' and 'Modo formulário'.

	Temperatura Ambiente	0 m/s	0.1 m/s	0.2 m/s	0.3 m/s	0.4 m/s	0.5 m/s	0.6 m/s	0.7 m/s	0.8 m/s	0.9 m/s	1.0 m/s	1.5 m/s	2.5 m/s	3.5 m/s
1	60.16757	60.16757	45.52091	41.01655	37.31759	34.70355	32.16093	32.2916	29.63183	28.18833	27.27187	22.30024	16.93869	13.83333	
2	61.1738	61.1738	47.55236	41.7976	38.71602	35.36744	32.77862	32.82919	31.71366	29.46803	27.67462	23.62453	17.74022	14.91677	
3	62.1911	62.1911	48.40611	42.59675	39.44193	36.03843	34.17226	34.13213	32.20784	30.75765	28.96447	23.90033	19.22859	16.0065	
4	63.21946	63.21946	49.2688	44.6566	40.17632	37.4438	35.57565	35.44538	33.51099	31.21507	30.26405	25.24175	20.04568	17.10258	
5	64.25886	64.25886	50.14041	45.48668	40.91817	38.85923	36.21653	36.00838	34.82423	32.52316	31.57336	26.59226	20.87005	18.2045	
6	65.30927	65.30927	51.02091	46.28278	43.0362	39.65426	36.86413	37.34083	35.34327	33.84113	32.89238	26.89097	22.38242	19.31355	
7	66.37069	66.37069	51.91028	47.1069	43.79782	40.2563	38.29364	38.68357	35.86965	34.32268	33.33608	28.25849	23.22216	19.60578	
8	67.4431	67.4431	52.80849	47.939	44.56484	40.96532	39.73292	39.27177	38.01735	35.65921	34.67318	29.63505	24.06928	20.72801	
9	67.45177	67.45177	53.71553	48.77905	45.33924	43.15127	40.40353	39.86737	38.56099	37.00539	36.01998	31.02066	25.60549	21.8566	
10	68.54324	68.54324	54.63138	50.91967	46.121	43.87719	41.08078	42.00578	39.11187	37.51122	36.48742	31.34978	26.46773	22.99133	
11	69.64563	69.64563	56.77103	51.77857	47.60312	44.61004	41.76463	42.61896	40.48121	38.8757	37.8522	32.75225	27.33727	24.1324	
12	70.75894	70.75894	57.70734	52.6454	49.09573	45.34979	43.2381	43.23946	41.8606	40.25002	38.33488	34.16376	28.89718	25.279	
13	71.88316	71.88316	58.65241	53.52013	49.9025	46.09642	44.72136	44.63942	42.43578	40.7797	39.71759	34.51507	29.09809	26.4332	
14	73.01827	73.01827	59.60624	54.40274	50.71656	47.59278	45.42802	46.40967	43.83375	42.17224	40.2154	35.94334	30.67342	27.5929	
15	74.16428	74.16428	60.56881	55.29321	51.53789	49.09925	46.14122	46.6949	45.24178	43.57463	41.61599	36.3089	31.57233	28.7589	
16	75.32115	75.32115	61.5401	56.19154	52.36647	49.86957	46.86094	47.34735	46.84108	44.12798	43.02625	37.75388	32.4784	29.9312	
17	76.4889	76.4889	62.52009	57.0977	53.2023	50.64671	48.37831	48.78529	46.44741	44.68821	43.54725	39.20786	34.07726	31.109	
18	77.66674	77.66674	63.50878	58.01168	54.74959	51.43064	49.90552	50.23352	47.88247	46.11708	44.97534	39.59518	34.31191	31.4825	
19	77.75311	77.75311	64.50615	58.93346	56.30745	52.22135	50.6479	50.9105	49.32758	47.55579	46.41309	41.06581	35.92604	32.6744	
20	78.95031	78.95031	65.51218	59.86302	57.16813	53.7716	51.39675	51.59459	49.95781	48.13945	46.95712	41.46708	36.86106	33.8725	
21	80.15833	80.15833	66.52686	60.80036	58.036	55.33202	52.15203	52.28577	50.59497	48.72987	47.5078	42.95432	37.80312	35.07688	
22	80.26465	80.26465	67.55019	63.07609	58.91105	56.14629	53.71336	53.77026	52.06702	50.19497	48.97147	44.45057	38.75221	35.4788	
23	81.49111	81.49111	68.58214	64.03221	59.79326	56.96731	54.48314	55.26506	53.54914	51.66992	50.44482	44.87325	39.70831	36.8964	
24	82.72835	82.72835	69.62271	64.99609	60.68262	57.79505	56.06244	55.98055	54.21002	52.28357	51.01831	46.38607	41.36105	38.271	
25	83.97637	83.97637	70.6719	65.96772	61.57912	58.62949	56.84671	56.70305	54.87774	52.90389	51.59835	46.82246	41.64146	39.2803	
26	85.23618	85.23618	71.72968	66.94708	62.48275	59.47063	57.63734	57.43253	55.55226	54.40516	53.09753	48.35183	43.30936	40.2957	

Figura E. 5 Cálculo do Perfil Térmico de Condutor - Dados.

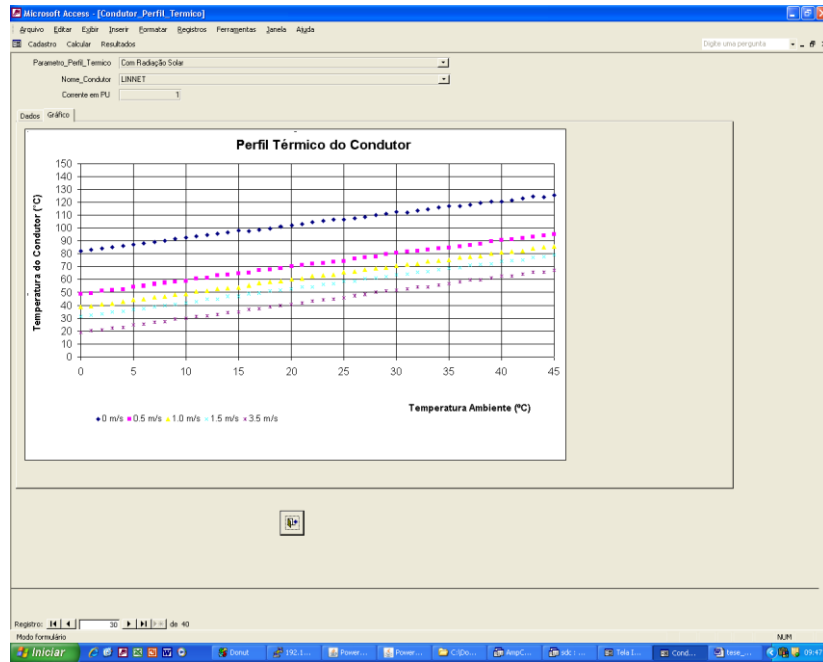


Figura E. 6 Cálculo do Perfil Térmico de Condutor - Gráfico.

### ***Cálculo dos momentos estatísticos do Perfil Térmico do Condutor***

Microsoft Access - [Cadastro de Momento\_Condutor\_Perfil\_Termico]

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Registros Ferramentas Janela Ajuda

Cadastro Calcular Resultados

Digite uma pergunta

Parametro_Perfil_Termico	Parametro_Sazonalidade	Nome da Estação	Nome do Cond	Corrente em PU	Temperatura Condutor Média	Temperatura	Temperatura C	Desvio Padrão	Variância
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	0.1	30.5	0.0	46.0	0.5	0.2
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	0.2	31.2	0.0	49.0	1.1	1.2
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	0.3	33.2	1.0	52.0	2.2	4.8
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	0.4	35.6	1.0	57.0	4.2	17.3
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	0.5	38.4	1.0	63.0	5.6	31.2
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	0.6	42.3	2.0	71.0	8.5	72.3
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	0.7	46.5	3.0	80.0	10.8	117.4
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	0.8	51.5	3.0	90.0	13.8	191.4
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	0.9	57.3	5.0	101.0	16.7	277.8
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	1.0	63.9	6.0	112.0	20.6	425.4
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	1.1	71.4	7.0	127.0	24.7	608.7
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	1.2	79.2	9.0	141.0	28.8	829.9
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	1.3	88.5	10.0	156.0	33.7	1138.4
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	1.4	97.8	12.0	174.0	38.4	1477.4
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	1.5	109.1	14.0	190.0	43.6	1902.6
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	1.6	120.6	17.0	209.0	49.5	2452.7
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	1.7	133.2	19.0	228.0	54.7	2990.8
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	1.8	146.7	22.0	249.0	60.3	3631.0
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	1.9	160.7	24.0	271.0	65.8	4334.2
Sem Radiação Solar	Período Completo	L1 - Acurui/MC	LINNET	2.0	176.6	28.0	294.0	72.0	5190.8
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	0.1	30.5	0.0	46.0	0.5	0.2
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	0.2	31.5	0.0	49.0	1.1	1.3
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	0.3	33.8	1.0	52.0	2.3	5.5
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	0.4	36.8	1.0	57.0	4.5	19.9
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	0.5	40.0	1.0	63.0	5.9	34.8
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	0.6	44.7	2.0	71.0	9.0	81.8
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	0.7	49.6	3.0	80.0	11.5	131.2
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	0.8	55.5	3.0	90.0	14.6	212.8
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	0.9	62.0	5.0	101.0	17.4	304.1
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	1.0	69.8	6.0	112.0	21.5	462.3
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	1.1	78.4	7.0	127.0	25.7	660.3
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	1.2	87.4	9.0	141.0	29.8	890.8
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	1.3	98.1	10.0	156.0	34.9	1218.2
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	1.4	108.8	12.0	174.0	39.5	1563.1
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	1.5	121.6	14.0	190.0	44.7	1999.8
Sem Radiação Solar	Período Completo	L2 - Acurui/MC	LINNET	1.6	134.7	17.0	209.0	50.6	2559.9

Registro: 1 de 1761

Modo folha de dados

NUM

09:59

Figura E. 7 Cálculo dos Momentos Estatísticos do Perfil Térmico do Condutor.

## Cálculo das funções de distribuição do Perfil Térmico do Condutor

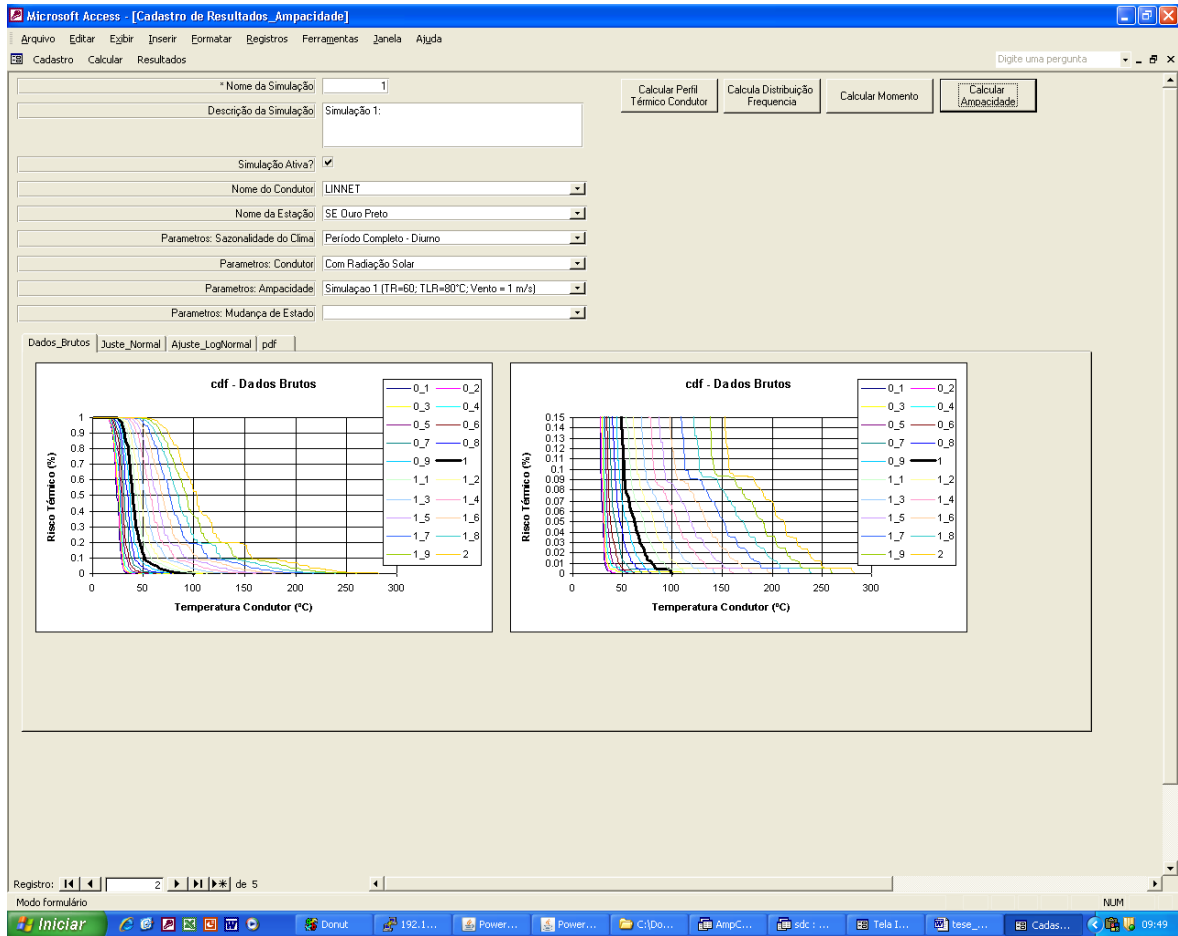


Figura E. 8 Cálculo das pdf do Perfil Térmico do Condutor – Dados Brutos.

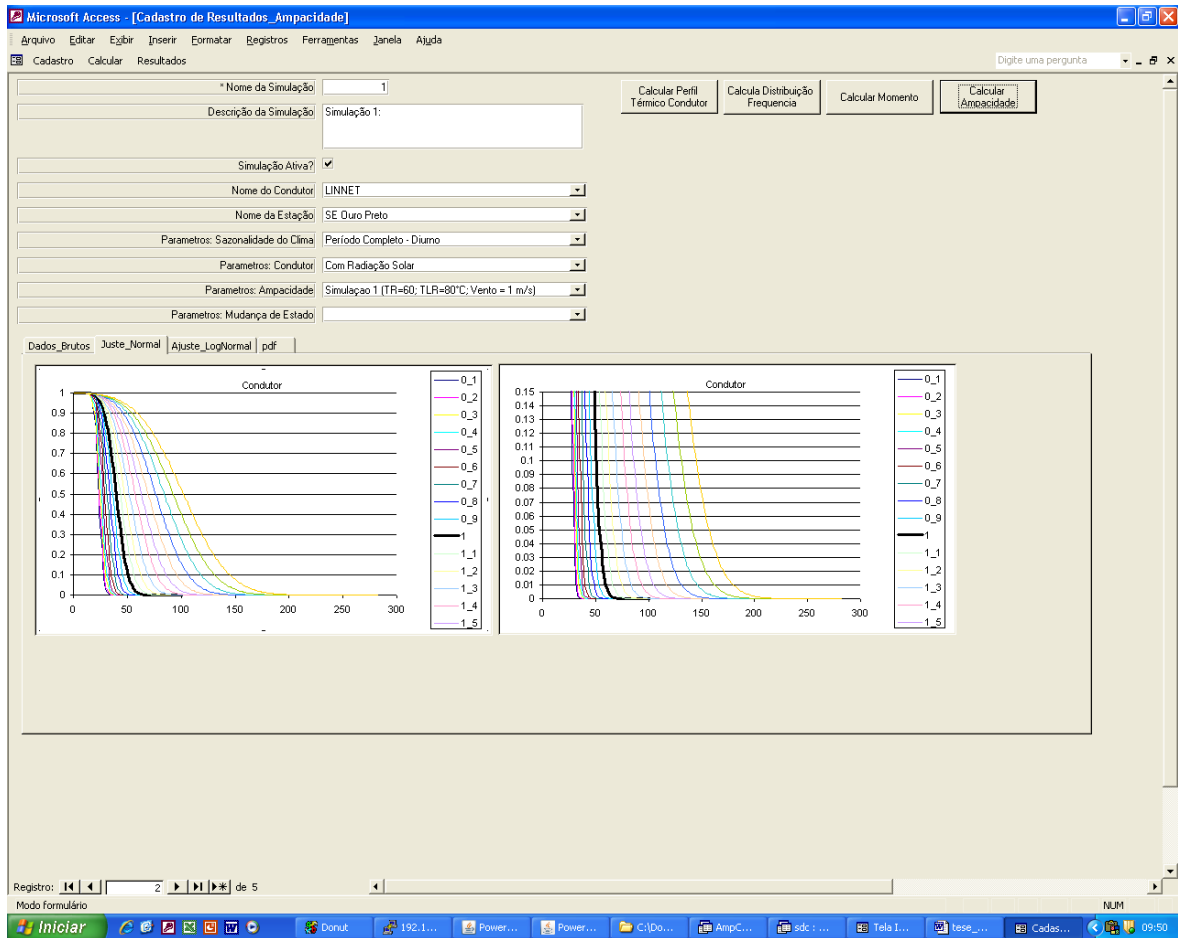


Figura E. 9 Cálculo das pdf do Perfil Térmico do Condutor – Ajuste Normal.

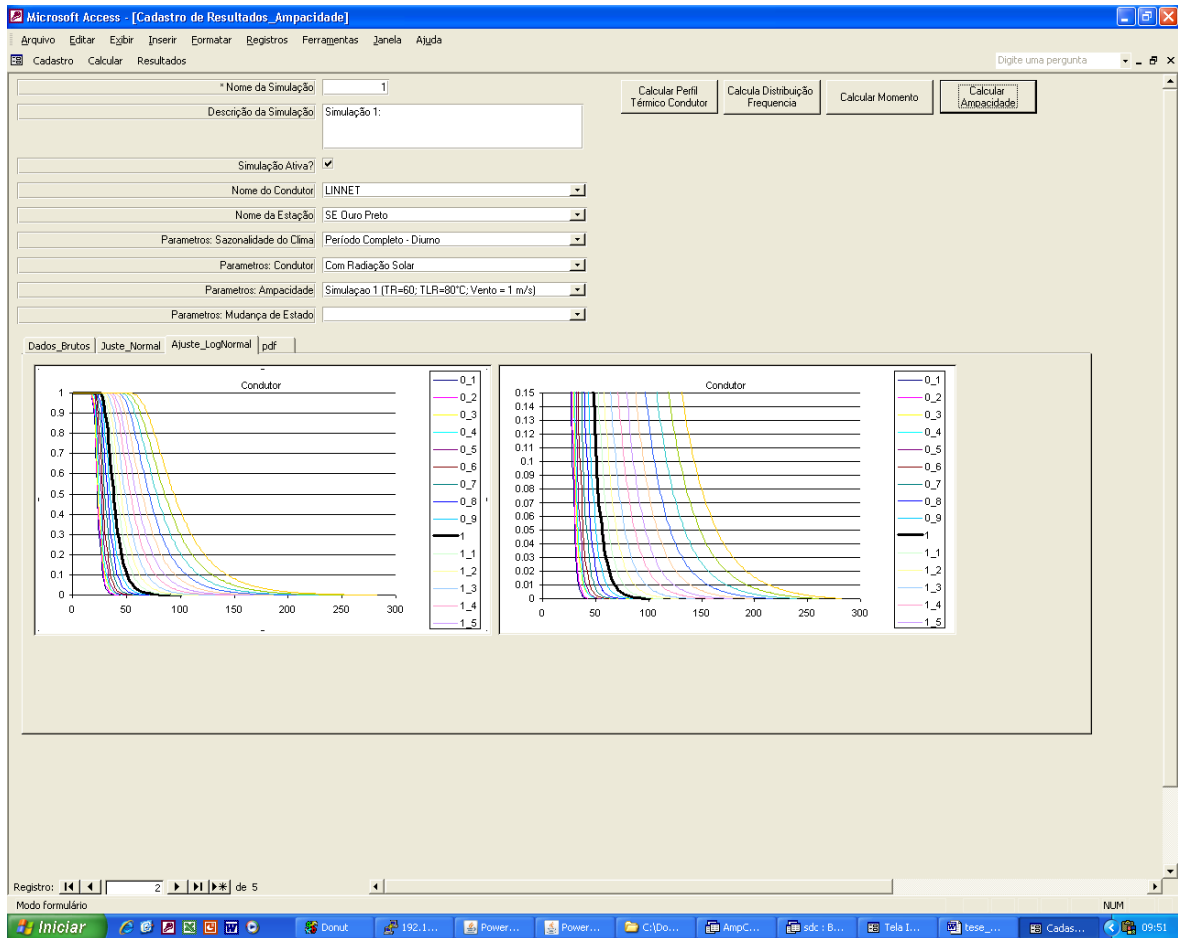


Figura E. 10 Cálculo das pdf do Perfil Térmico do Condutor – Ajuste Log-Normal.

## ***Cálculo da Mudança de Estado da Linha***

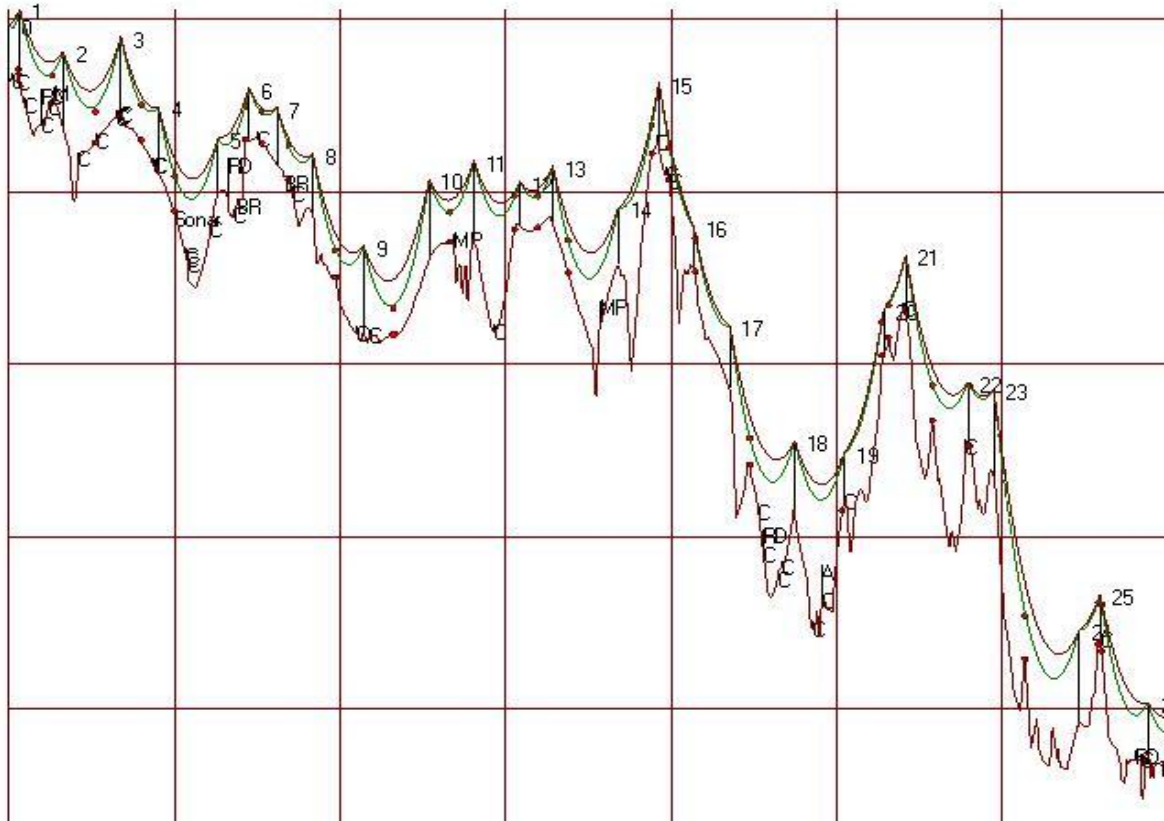


Figura E. 11 Perfil digital da linha em representação geométrica planificada.

## Cálculo das Ampacidades

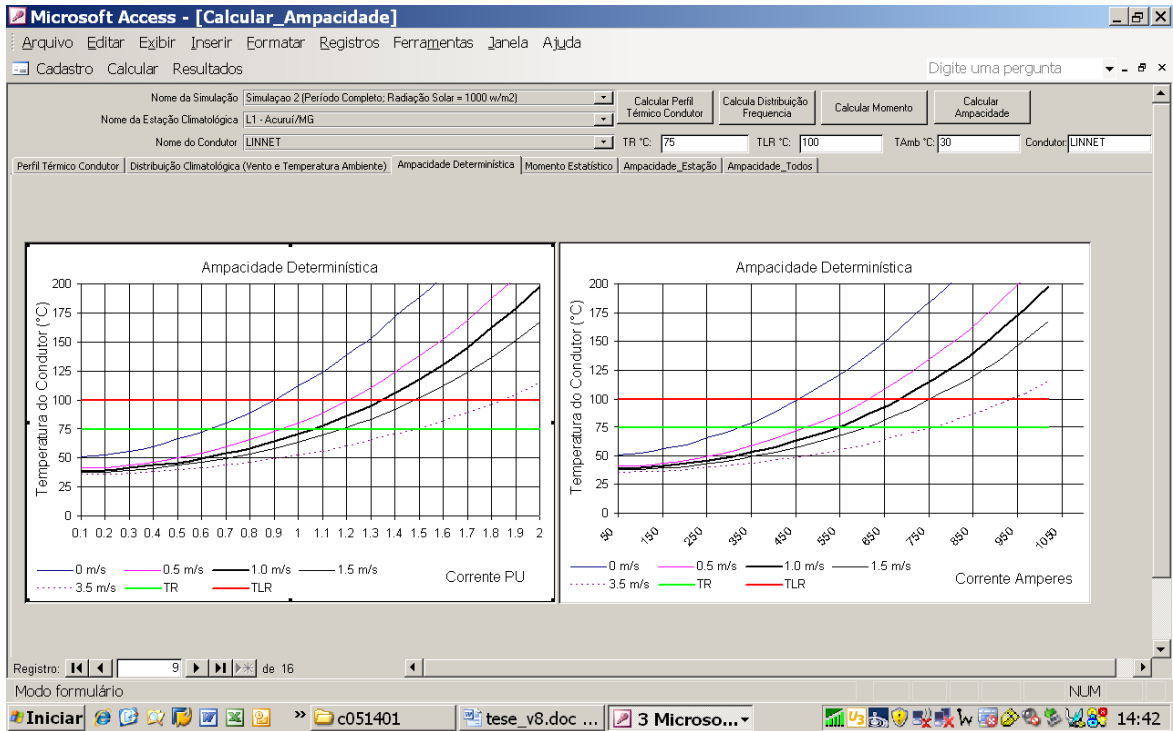


Figura E. 12 Cálculo da Ampacidade Determinística.

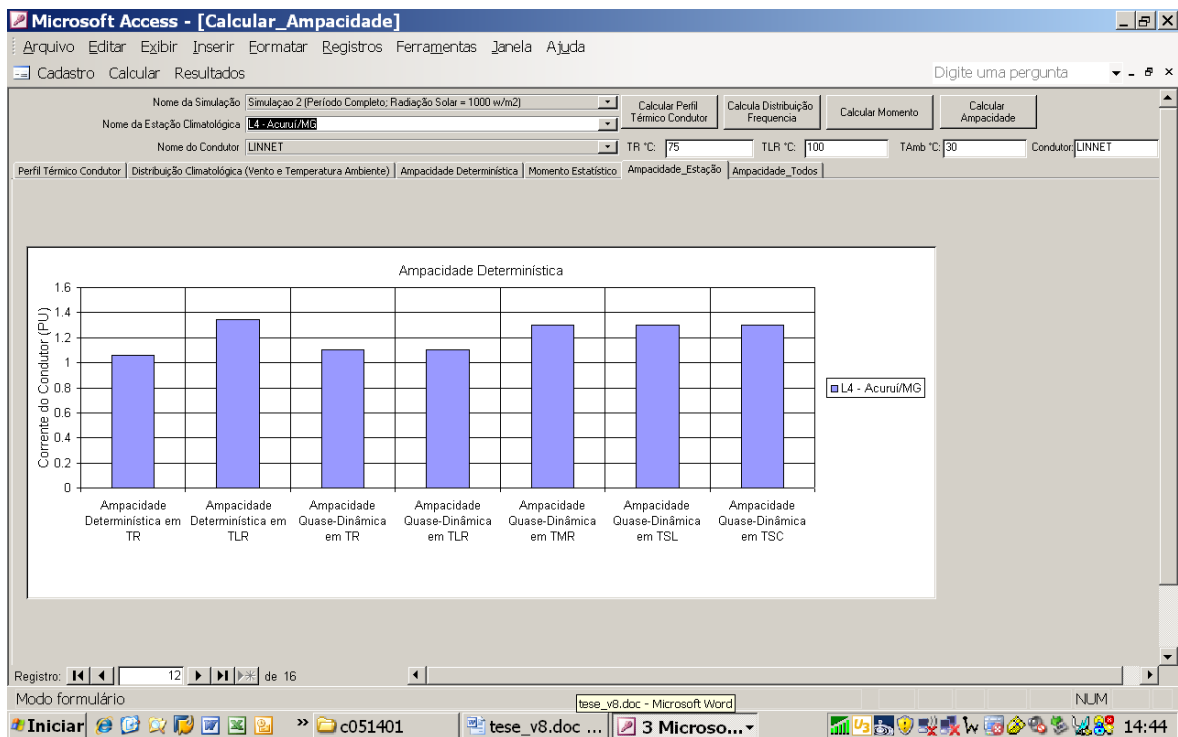


Figura E. 13 Cálculo da Ampacidade Probabilística.

## ***APÊNDICE F. Dados Simulados para as Estações de Vento em Acuruí-MG***

CFX_Acurui_Estação_Vento							
Código_Estação	CC_Direcao_Vento (graus)	CC_Magnitude_Vento (m/s)	Modulo_Vento (m/s)	Velocidade_U (m/s)	Velocidade_V (m/s)	Velociade_W (m/s)	
1	45	0,2	3,70848942	2,69324756	2,54401636	0,165203437	
1	45	0,4	0,416045725	0,285826683	0,301883608	0,016230203	
1	45	0,6	0,629090369	0,43233937	0,456327051	0,024555383	
1	45	0,8	3,38311028	2,50339556	2,2698729	0,161626428	
1	45	1	3,38251472	2,47600794	2,29934192	0,15432331	
1	45	2	3,49290371	2,38075519	2,55289698	0,12287119	
1	45	3	4,06694984	2,7093482	3,03014946	0,133075267	
1	45	4	4,87959719	3,25434947	3,63217449	0,164284602	
1	45	5	5,87994385	3,95372987	4,3472414	0,207982242	
1	135	0,2	0,240600541	-0,175213858	0,162341073	-0,028880792	
1	135	0,4	0,488209099	-0,355804473	0,329039514	-0,059027899	
1	135	0,6	0,737808943	-0,537900448	0,496996939	-0,089549705	
1	135	0,8	0,988702774	-0,721006215	0,665738761	-0,120312795	
1	135	1	1,24036658	-0,904679358	0,834982276	-0,151224956	
1	135	2	2,50644565	-1,82897604	1,6860317	-0,307267308	
1	135	3	3,78056479	-2,75958204	2,54190874	-0,464840978	
1	135	4	2,22220802	-1,6541034	1,4585402	-0,273515821	
1	135	5	2,44297576	-1,727983	1,70221019	-0,291009188	
1	225	0,2	0,142844945	-0,106363699	-0,095049433	-0,007552781	
1	225	0,4	0,29318437	-0,216883957	-0,196709573	-0,01495872	
1	225	0,6	0,445795327	-0,328809708	-0,300194174	-0,022385201	
1	225	0,8	0,599660635	-0,441486835	-0,404713899	-0,029814307	
1	225	1	0,754413903	-0,554754734	-0,509901702	-0,037253115	
1	225	2	1,53647709	-1,12679064	-1,04189563	-0,074552894	
1	225	3	0,469125181	-0,444621086	-0,149627149	0,001494336	
1	225	4	2,62361264	-2,1938076	-1,4225378	-0,216650426	
1	225	5	3,984936	-3,13473582	-2,44345903	-0,28749615	
1	315	0,2	2,98381042	2,24125075	-1,93246996	0,381418169	
1	315	0,4	3,27390909	2,44653153	-2,13473368	0,419375241	
1	315	0,6	3,49266243	2,58248186	-2,30800223	0,45011729	
1	315	0,8	3,53796697	2,60035968	-2,35470557	0,45902285	
1	315	1	3,90205121	2,81079221	-2,65865183	0,506971955	
1	315	2	4,93212461	3,65348625	-3,2530477	0,628946126	
1	315	3	6,20663309	4,41401958	-4,29699707	0,757983267	
1	315	4	6,58756161	4,64301777	-4,60320234	0,805531204	
1	315	5	6,85927343	4,79868841	-4,8285079	0,841268659	
2	45	0,2	4,23014879	3,15724325	2,81525493	0,017702067	
2	45	0,4	0,451122433	0,310041249	0,327676564	0,003737509	
2	45	0,6	0,678889871	0,466633499	0,493064046	0,005701262	
2	45	0,8	3,50126863	2,48027277	2,47116899	0,021294786	
2	45	1	3,12106729	2,16766977	2,24538612	0,022591487	
2	45	2	3,31439877	2,15589786	2,51728106	0,025297375	
2	45	3	3,90331817	2,55022979	2,95488453	0,029656485	
2	45	4	4,84874201	3,24296117	3,60446191	0,03681498	

CFX_Acurui_Estação_Vento							
Código_Estação	CC_Direcao_Vento (graus)	CC_Magnitude_Vento (m/s)	Modulo_Vento (m/s)	Velocidade_U (m/s)	Velocidade_V (m/s)	Velocidade_W (m/s)	
2	45		5	6,01092196	4,09896231	4,39632034	0,045328714
2	135		0,2	0,234871462	-0,161260813	0,170714289	0,004022919
2	135		0,4	0,472317219	-0,32441619	0,343180478	0,008053281
2	135		0,6	0,710453212	-0,488095254	0,51610142	0,01208587
2	135		0,8	0,949007511	-0,652038515	0,68934834	0,016123273
2	135		1	1,18786108	-0,816256106	0,862747729	0,020162288
2	135		2	2,38447666	-1,63876009	1,73163617	0,040382993
2	135		3	3,58346534	-2,46298432	2,60216355	0,060639408
2	135		4	1,40183675	-0,649376094	1,24154937	0,044856522
2	135		5	4,22587776	-3,63134694	2,16081023	0,047546916
2	225		0,2	0,226363659	-0,147966713	-0,171292201	-0,002311296
2	225		0,4	0,45741412	-0,299350262	-0,345824033	-0,004778945
2	225		0,6	0,689484894	-0,451544523	-0,521002889	-0,007275809
2	225		0,8	0,923129916	-0,60500592	-0,697165787	-0,009825557
2	225		1	1,15702236	-0,75875634	-0,873405099	-0,012372924
2	225		2	2,32899761	-1,52827656	-1,7572614	-0,025158132
2	225		3	5,04652405	-2,97849774	-4,07301235	-0,080805294
2	225		4	5,4165678	-3,23029494	-4,34713078	-0,082781248
2	225		5	5,90980291	-3,65152097	-4,6461792	-0,071997792
2	315		0,2	4,12781525	2,28448319	-3,43719292	-0,075522259
2	315		0,4	4,22351074	2,38845539	-3,48241234	-0,078275509
2	315		0,6	4,2860527	2,4479835	-3,51727843	-0,079852
2	315		0,8	4,28921175	2,44518447	-3,52307391	-0,079742007
2	315		1	4,20881033	2,43816948	-3,42978311	-0,07745754
2	315		2	4,74046135	2,78284836	-3,83647728	-0,095767595
2	315		3	5,41519833	3,34376764	-4,25793362	-0,116572015
2	315		4	5,81738806	3,69319773	-4,49312019	-0,119009256
2	315		5	6,76604319	4,51592731	-5,03656721	-0,136859983
4	45		0,2	2,9991796	1,93028712	2,2916398	0,132124469
4	45		0,4	0,56032753	0,413633376	0,377331972	0,022248244
4	45		0,6	0,847800672	0,626766264	0,569917679	0,033524897
4	45		0,8	4,88798189	3,47835922	3,42869592	0,193462163
4	45		1	4,91562939	3,47006893	3,47607017	0,197409153
4	45		2	5,58397102	3,90729332	3,98266172	0,228462815
4	45		3	6,10691404	4,38377619	4,24440861	0,248798624
4	45		4	6,7950716	5,00111866	4,59210777	0,272683203
4	45		5	7,90041304	5,84468174	5,30620718	0,316834867
4	135		0,2	0,281463355	-0,202688307	0,195088953	0,008909064
4	135		0,4	0,566425562	-0,408596188	0,391866207	0,018110424
4	135		0,6	0,852809966	-0,615668952	0,589479148	0,027403658
4	135		0,8	1,13943481	-0,823206306	0,786951184	0,036755707
4	135		1	1,42710829	-1,03141534	0,985236347	0,046149384
4	135		2	2,86756682	-2,07537198	1,97662055	0,093497582
4	135		3	4,30614233	-3,119802	2,96474981	0,141260356
4	135		4	3,74895787	-2,79746819	2,49329281	0,111116692
4	135		5	4,12310696	-3,14595342	2,66273212	0,11334382
4	225		0,2	0,268479586	-0,191953823	-0,187445208	-0,009965505
4	225		0,4	0,544484317	-0,389368594	-0,380055815	-0,020319661
4	225		0,6	0,822084844	-0,587987244	-0,573714614	-0,030756457
4	225		0,8	1,10058415	-0,787226975	-0,768022418	-0,041241024
4	225		1	1,37972343	-0,986922741	-0,962777853	-0,051759236
4	225		2	2,78055334	-1,98908997	-1,94011533	-0,104640342
4	225		3	4,42208767	-3,06692648	-3,18136692	-0,166514695
4	225		4	5,83299875	-3,95407343	-4,28130102	-0,244212449
4	225		5	7,49055147	-5,04618311	-5,52581263	-0,33134535
4	315		0,2	3,41610765	2,525383	-2,29822206	-0,102017492

CFX_Acurui_Estação_Vento						
Código_Estação	CC_Direcao_Vento (graus)	CC_Magnitude_Vento (m/s)	Modulo_Vento (m/s)	Velocidade_U (m/s)	Velocidade_V (m/s)	Velocidade_W (m/s)
4	315	0,4	3,90052605	2,86624622	-2,64293265	-0,116805732
4	315	0,6	4,31974363	3,16368699	-2,93845868	-0,129344389
4	315	0,8	4,45542574	3,25946474	-3,03461409	-0,133518919
4	315	1	4,96289062	3,60537958	-3,40717578	-0,150590166
4	315	2	5,48758984	3,97837114	-3,77601385	-0,16710709
4	315	3	5,54270124	4,069345	-3,75972795	-0,162529662
4	315	4	6,04929113	4,50843668	-4,02971458	-0,171227261
4	315	5	7,23220015	5,52931643	-4,65717936	-0,205094516
6	45	0,2	3,70564222	2,29774928	2,90071201	0,194940642
6	45	0,4	0,438893169	0,271094978	0,344323397	0,024002675
6	45	0,6	0,66768539	0,413335264	0,523120821	0,036088038
6	45	0,8	3,84034443	2,32936239	3,04540133	0,2187417
6	45	1	3,83017373	2,22562122	3,10824966	0,235849574
6	45	2	4,15895748	2,20797682	3,51199389	0,296084464
6	45	3	4,24237394	2,1222856	3,65761638	0,339829683
6	45	4	4,44642639	2,25108409	3,81334376	0,402164638
6	45	5	5,95257282	3,49776697	4,80404091	0,346326739
6	135	0,2	0,152313143	-0,071403056	0,132606149	0,022726784
6	135	0,4	0,309851527	-0,149352133	0,267478138	0,046447307
6	135	0,6	0,469157755	-0,229068518	0,403320491	0,070492476
6	135	0,8	0,62891686	-0,309828997	0,539058149	0,094650492
6	135	1	0,78975147	-0,391354769	0,675566614	0,118989602
6	135	2	1,59825766	-0,805181265	1,35932326	0,241559044
6	135	3	2,41066432	-1,22594094	2,04332638	0,364950538
6	135	4	2,58666158	-0,774935901	2,44444084	0,339117289
6	135	5	3,35006142	-1,21583438	3,09096885	0,436541736
6	225	0,2	0,270067394	-0,173533291	-0,206592828	-0,011916014
6	225	0,4	0,542173326	-0,348527133	-0,414608389	-0,02409593
6	225	0,6	0,814861596	-0,523937464	-0,623030782	-0,036352962
6	225	0,8	1,08790326	-0,69959712	-0,831702948	-0,048656959
6	225	1	1,36119187	-0,875436842	-1,04054475	-0,060994629
6	225	2	2,72984552	-1,75622547	-2,08628941	-0,122984886
6	225	3	4,31524611	-2,38431859	-3,58786535	-0,252181232
6	225	4	5,76148653	-3,48989105	-4,57569122	-0,280067265
6	225	5	7,1931181	-4,55417252	-5,55885649	-0,315553844
6	315	0,2	2,12927556	0,799517095	-1,95255947	-0,286527097
6	315	0,4	1,79411578	0,533703208	-1,69859135	-0,22090596
6	315	0,6	1,84561014	0,568048835	-1,74114716	-0,228044242
6	315	0,8	1,92695522	0,629192591	-1,80511022	-0,242590964
6	315	1	1,56814742	0,491599113	-1,47764862	-0,184313327
6	315	2	2,25249863	0,737936139	-2,10705113	-0,299226224
6	315	3	1,98999131	1,08349538	-1,65979373	-0,176601201
6	315	4	3,22752881	2,01618624	-2,49148703	-0,380035967
6	315	5	3,37212372	2,02583456	-2,6664598	-0,39648968
7	45	0,2	3,25819945	2,04440594	2,50555134	0,398096591
7	45	0,4	0,555442452	0,385504514	0,393593609	0,070616201
7	45	0,6	0,836856723	0,580647409	0,5931862	0,106338494
7	45	0,8	3,53112149	1,83725941	2,98385859	0,435756505
7	45	1	3,48743939	1,5496459	3,09573436	0,421022505
7	45	2	3,50198412	1,80019712	2,97178531	0,437807381
7	45	3	4,74022055	3,30563307	3,34664869	0,585170865
7	45	4	6,03205109	4,19983339	4,2642231	0,750624776
7	45	5	7,40132999	5,13456726	5,24867058	0,93132323
7	135	0,2	0,257106751	-0,176936641	0,186509401	0,003398588
7	135	0,4	0,524977028	-0,361766398	0,380366534	0,006874186
7	135	0,6	0,795023799	-0,548101723	0,575794578	0,010390131

CFX_Acurui_Estação_Vento							
Código_Estação	CC_Direcao_Vento (graus)	CC_Magnitude_Vento (m/s)	Modulo_Vento (m/s)	Velocidade_U (m/s)	Velocidade_V (m/s)	Velociade_W (m/s)	
7	135		0,8	1,06915808	-0,737682164	0,773777008	0,01389925
7	135		1	1,34254849	-0,9262954	0,971652329	0,017470378
7	135		2	2,72255111	-1,88099408	1,96796942	0,035240673
7	135		3	4,10921144	-2,8392148	2,97012424	0,053305712
7	135		4	3,00070739	-1,9790132	2,25488186	0,057097141
7	135		5	2,56666398	-1,59436643	2,01032233	0,066065446
7	225		0,2	0,295668721	-0,19425419	-0,21990791	-0,036411692
7	225		0,4	0,597375989	-0,392597169	-0,444172382	-0,073732302
7	225		0,6	0,900811195	-0,592101276	-0,669690788	-0,111315578
7	225		0,8	1,20517814	-0,792254448	-0,895864606	-0,149043217
7	225		1	1,51024377	-0,992877126	-1,12254584	-0,186874405
7	225		2	3,04260063	-2,0004797	-2,26126289	-0,377080679
7	225		3	6,19325686	-3,73435807	-4,88196182	-0,75990212
7	225		4	7,4429841	-4,71374846	-5,68595266	-0,921156526
7	225		5	8,94875526	-5,78013229	-6,7400403	-1,11451495
7	315		0,2	3,36238289	2,02541494	-2,68245077	-0,08814875
7	315		0,4	3,72489262	2,258605	-2,96043515	-0,096708506
7	315		0,6	4,08519697	2,4793241	-3,24503994	-0,107243031
7	315		0,8	4,21925688	2,56189418	-3,35058951	-0,111252561
7	315		1	4,590693	2,79644942	-3,63863564	-0,121086732
7	315		2	5,23674154	3,30938005	-4,05663061	-0,123346999
7	315		3	6,37639475	4,08253384	-4,89600229	-0,143143088
7	315		4	6,87062263	4,45140505	-5,23157787	-0,145057395
7	315		5	7,44240379	4,84646463	-5,64606476	-0,152016938