

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RODRIGO DE CASTRO SILVEIRA**

**CÁLCULO DE AMPACIDADE PARA LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO:  
um comparativo entre as normas IEEE 738-2012 e CIGRÉ WG 22.12: TB 207**

**Porto Alegre  
2017**

**RODRIGO DE CASTRO SILVEIRA**

**CÁLCULO DE AMPACIDADE PARA LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO:  
um comparativo entre as normas IEEE 738-2012 e CIGRÉ WG 22.12: TB 207**

*Projeto de Diplomação apresentado  
ao Departamento de Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, como parte dos  
requisitos para Graduação em  
Engenharia Elétrica.*

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Flávio Antonio Becon Lemos**

**Porto Alegre**

**2017**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Denise Carpena Dal Molin

Vice-Diretor: Carlos Eduardo Pereira

### CIP - Catalogação na Publicação

Silveira, Rodrigo de Castro  
CÁLCULO DE AMPACIDADE PARA LINHAS AÉREAS DE  
TRANSMISSÃO: um comparativo entre as normas IEEE 738-  
2012 e CIGRÉ WG 22.12: TB 207 / Rodrigo de Castro  
Silveira. -- 2017.  
122 f.  
Orientador: Flávio Antonio Becon Lemos.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2017.

1. Ampacidade. 2. Linhas Aéreas de Transmissão.  
3. Transmissão de Energia Elétrica. 4. Sistema  
Elétrico de Potência. I. Lemos, Flávio Antonio  
Becon, orient. II. Título.

**RODRIGO DE CASTRO SILVEIRA**

**CÁLCULO DE AMPACIDADE PARA LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO:  
um comparativo entre as normas IEEE 738-2012 e CIGRÉ WG 22.12: TB 207**

*Este Projeto de Diplomação foi julgado e analisado adequado para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.*

---

**Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos**  
**Orientador**

---

**Prof. Dr. Ály Flores Ferreira Filho**  
**Chefe do DELET**

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA:**

**Flávio Antônio Becon Lemos (Prof. Dr.) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

---

**Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro (Prof. Dr.) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

---

**Ruy Carlos Ramos de Menezes (Prof. Dr.) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

---

Aos meus filhos Henrique e Cecília, e à Sheila, pessoa com quem amo partilhar a vida. Com você tenho me sentido mais vivo de verdade. Obrigado pelo carinho, a paciência e por sua capacidade de me trazer paz na correria de cada semestre.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus por ter me concedido saúde, força e disposição para concluir o curso. Sem Ele nada disso seria possível.

Agradeço à minha esposa Sheila, companheira, parceira e amante, pelo apoio incondicional em todos os momentos, me incentivando a continuar e concluir o curso nas tantas adversidades ocorridas ao longo do caminho, sempre acreditando no meu potencial e entendendo as ausências que os estudos me obrigaram a fazer. Obrigado também por, nesse período de vida acadêmica, ter me dado a oportunidade de ser pai e termos hoje os nossos preciosos tesouros Henrique e Cecília.

Aos meus pais, Mauro e Nelcy, que são meus alicerces e me passaram valores como o amor, respeito, educação, justiça e fé, essenciais para qualquer ser humano, mas que, infelizmente, nem sempre é passado às crianças. Também aos meus sogros e segundos pais, Selvino e Neida, pelo apoio e confiança a mim despendidos.

Ao meu irmão e irmãs, Adriano, Denise e Andréia, pelo apoio, incentivo e por terem me proporcionado tantos momentos de amor fraternal, sabendo que sempre posso contar com vocês. Às minhas afilhadas, Rafaela e Júlia, pelo carinho e abraços amorosos. E aos meus cunhados, Charles e Jean, pela parceria e amizade.

Aos meus amigos, Juliano, Samanta, Marcio, Salete, João Gabriel, Eduardo, Vanessa, Mariana, Rodrigo, Diego, Luciana e Valentina, pelo apoio e momentos de descontração que foram essenciais para a continuação da jornada. Aos amigos de SEFAZ RS, em especial Paulo Espíndola e Rogerio Thudium, pelo apoio e ensinamentos passados.

Aos professores deixo uma palavra de gratidão, pois reconheço a paciência e dedicação de muitos, em especial ao meu orientador Flávio Becon Lemos, que se disponibilizou e me ajudou a concluir este trabalho.

E aos demais amigos e parentes que, nestes nove anos e meio de faculdade, participaram direta ou indiretamente dessa caminhada.

Não importa onde você parou...  
em que momento da vida você cansou...  
o que importa é que sempre é possível e  
necessário “Recomeçar”.

*Carlos Drummond de Andrade*

## RESUMO

Neste trabalho foi realizada uma análise comparativa entre os métodos CIGRÉ e IEEE para o cálculo de ampacidade em regime permanente para linhas aéreas de transmissão (LAT). Ambos os métodos utilizam o princípio do balanço térmico para o equacionamento do problema, porém com algumas diferenças em determinadas parcelas de calor. O método CIGRÉ é mais complexo que o método IEEE e apresenta valores mais conservativos em grande parte das situações. A comparação completa, com a variação de quatorze parâmetros por meio de rotinas matemáticas computacionais, foi efetuada com o condutor CAA Drake, que apresentou diferenças de até 13% para situações de ventos fortes, caso em que os valores obtidos método CIGRÉ deixam de se comportar de forma conservadora. Outros cinco tipos de condutores com diâmetros externos semelhantes, porém materiais e/ou métodos construtivos diferentes, foram analisados para algumas situações específicas. Foi verificado que os condutores com fios de perfis “Z” e trapezoidais e materiais termorresistentes apresentaram menores diferenças entre os métodos para casos não extremos. Também foi desenvolvido um aplicativo em ambiente *MATLAB* para uso didático no estudo do cálculo de ampacidade.

Palavras-chave: Ampacidade. Linhas aéreas de transmissão. Transmissão de energia elétrica. Sistema elétrico de potência.

## ABSTRACT

In this work, a comparative analysis was performed between the CIGRÉ and IEEE methods for the calculation of ampacity in a steady state for overhead transmission lines. Both methods use the principle of thermal balance to solve the problem, but with some differences in certain portions of heat. The CIGRÉ method is more complex than the IEEE method and presents more conservative values in most situations. The complete comparison, with the variation of fourteen parameters by means of computational mathematical routines, was carried out with ACSR Drake conductor, who presented differences of up to 13% in high winds situations, in which case the values obtained by CIGRÉ method no longer behave conservatively. Five other types of conductors with similar external diameters, but different materials and/or constructive methods, were analyzed for some specific situations. It was verified that conductors with "Z" and trapezoidal profile wires and thermoresistant materials presented smaller differences among the non-extreme methods. An application was also developed in *MATLAB* environment for didactic use in the study of the calculation of ampacity.

Keywords: Ampacity. Overhead transmission lines. Power transmission. Power system.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Exemplo de deformação causado por sobrecarga excessiva.....                                  | 18 |
| Figura 2 – Fluxograma de algoritmo para cálculo de corrente em regime permanente.<br>.....              | 21 |
| Figura 3 – Fluxograma de algoritmo para cálculo de temperatura no condutor.....                         | 21 |
| Figura 4 – Principais formações para Condutores de Alumínio Nu (CA). ....                               | 24 |
| Figura 5 – Principais formações para Condutores de Alumínio com Alma de Aço<br>(CAA).....               | 24 |
| Figura 6 – Principais formações para Condutores de Alumínio Termorresistentes (T-<br>CA). ....          | 25 |
| Figura 7 – Principais formações para Condutores de Alumínio Termorresistente .....                      | 25 |
| Figura 8 - Modelo de perfil Z utilizado na linha AeroZ™ da Nexans.....                                  | 26 |
| Figura 9 - Modelo de perfil trapezoidal utilizado nos condutores ACCC® da Condu spar<br>.....           | 27 |
| Figura 10 - Exemplo de condutor ACCR da 3M .....  | 27 |
| Figura 11 – Variação da temperatura na superfície do condutor.....                                      | 58 |
| Figura 12 - Variação da emissividade do condutor .....  | 59 |
| Figura 13 - Variação da absorvidade do condutor .....   | 60 |
| Figura 14 - Variação da temperatura ambiente.....   | 61 |
| Figura 15 - Variação da velocidade do vento .....   | 62 |
| Figura 16 - Variação do número de <i>Nusselt</i> de 90° em função do número de <i>Reynolds</i><br>..... | 63 |
| Figura 17 - Variação do ângulo de ataque do vento.....  | 64 |
| Figura 18 - Variação da inclinação do condutor com o horizonte - $V = 0$ m/s .....                      | 65 |
| Figura 19 - Variação da inclinação do condutor com o horizonte - $V = 1$ m/s .....                      | 66 |
| Figura 20 - Variação da altitude .....  | 67 |
| Figura 21 - Variação do azimute do condutor .....   | 68 |
| Figura 22 - Variação da latitude .....  | 69 |
| Figura 23 - Variação da clareza da atmosfera - Método IEEE com atmosfera limpa ...                      | 70 |
| Figura 24 - Variação da clareza da atmosfera - Método IEEE com atmosfera<br>industrial/nublada.....     | 70 |
| Figura 25 - Variação do dia do ano .....  | 71 |
| Figura 26 - Variação do horário do dia .....  | 72 |
| Figura 27 - Variação da reflectância do solo ou albedo.....   | 73 |
| Figura 28 - Quadro de participação dos parâmetros nas parcelas do balanço térmico                       | 74 |
| Figura 29 - Variação da velocidade do vento, com $T_s = 55^\circ\text{C}$ .....                         | 76 |
| Figura 30 - Variação da temperatura na superfície do condutor, com $\delta = 30^\circ$ .....            | 77 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 31 - Variação da velocidade do vento, com $\delta = 30^\circ$ .....   | 77  |
| Figura 32 - Parcelas de calor em função da reflectância do solo, F. (A) Perda de calor por convecção, Pc. (B) Perda de calor por radiação, Pr. (C) Ganho de calor por aquecimento solar, Ps. (D) Ganho de calor por efeito <i>Joule</i> , Pj ..... | 78  |
| Figura 33 - Variação da velocidade do vento, com (A) $T_s = 85^\circ\text{C}$ , (B) $T_s = 75^\circ\text{C}$ , (C) $T_s = 65^\circ\text{C}$ e (D) $T_s = 55^\circ\text{C}$ .....   | 80  |
| Figura 34 - Variação da temperatura na superfície do condutor, com (A) $\delta = 90^\circ$ , (B) $\delta = 60^\circ$ , (C) $\delta = 30^\circ$ e (D) $\delta = 0^\circ$ .....  | 80  |
| Figura 35 - Variação da velocidade do vento, com (A) $\delta = 90^\circ$ , (B) $\delta = 60^\circ$ , (C) $\delta = 30^\circ$ e (D) $\delta = 0^\circ$ .....  | 81  |
| Figura 36 - Variação da velocidade do vento - CA Anemone, com (A) $T_s = 85^\circ\text{C}$ , (B) $T_s = 75^\circ\text{C}$ , (C) $T_s = 65^\circ\text{C}$ e (D) $T_s = 55^\circ\text{C}$ .....  | 82  |
| Figura 37 - Variação da temperatura na superfície do condutor – CA Anemone, com (A) $\delta = 90^\circ$ , (B) $\delta = 60^\circ$ , (C) $\delta = 30^\circ$ e (D) $\delta = 0^\circ$ .....   | 83  |
| Figura 38 - Variação da velocidade do vento – CA Anemone, com (A) $\delta = 90^\circ$ , (B) $\delta = 60^\circ$ , (C) $\delta = 30^\circ$ e (D) $\delta = 0^\circ$ .....   | 84  |
| Figura 39 - Variação da velocidade do vento – T-Drake, (A) $T_s = 150^\circ\text{C}$ , (B) $T_s = 100^\circ\text{C}$ , (C) $T_s = 85^\circ\text{C}$ e (D) $T_s = 55^\circ\text{C}$ .....   | 85  |
| Figura 40 - Variação da temperatura na superfície do condutor – T-Drake, com (A) $\delta = 90^\circ$ , (B) $\delta = 60^\circ$ , (C) $\delta = 30^\circ$ e (D) $\delta = 0^\circ$ .....  | 86  |
| Figura 41 - Variação da velocidade do vento – T-Drake, com (A) $\delta = 90^\circ$ , (B) $\delta = 60^\circ$ , (C) $\delta = 30^\circ$ e (D) $\delta = 0^\circ$ .....  | 86  |
| Figura 42 - Variação da velocidade do vento – AeroZ™ Drake, com (A) $T_s = 150^\circ\text{C}$ , (B) $T_s = 100^\circ\text{C}$ , (C) $T_s = 85^\circ\text{C}$ e (D) $T_s = 55^\circ\text{C}$ .....  | 88  |
| Figura 43 - Variação da temperatura na superfície do condutor – AeroZ™ Drake, com (A) $\delta = 90^\circ$ , (B) $\delta = 60^\circ$ , (C) $\delta = 30^\circ$ e (D) $\delta = 0^\circ$ .....   | 88  |
| Figura 44 - Variação da velocidade do vento – AeroZ™ Drake, com (A) $\delta = 90^\circ$ , (B) $\delta = 60^\circ$ , (C) $\delta = 30^\circ$ e (D) $\delta = 0^\circ$ .....   | 89  |
| Figura 45 - Variação da velocidade do vento – ACCC® Drake, com (A) $T_s = 150^\circ\text{C}$ , (B) $T_s = 100^\circ\text{C}$ , (C) $T_s = 85^\circ\text{C}$ e (D) $T_s = 55^\circ\text{C}$ .....   | 90  |
| Figura 46 - Variação da temperatura na superfície do condutor – ACCC® Drake, com (A) $\delta = 90^\circ$ , (B) $\delta = 60^\circ$ , (C) $\delta = 30^\circ$ e (D) $\delta = 0^\circ$ .....  | 91  |
| Figura 47 - Variação da velocidade do vento – ACCC® Drake, com (A) $\delta = 90^\circ$ , (B) $\delta = 60^\circ$ , (C) $\delta = 30^\circ$ e (D) $\delta = 0^\circ$ .....  | 92  |
| Figura 48 - Variação da velocidade do vento – ACCR Drake, com (A) $T_s = 210^\circ\text{C}$ , (B) $T_s = 150^\circ\text{C}$ , (C) $T_s = 100^\circ\text{C}$ e (D) $T_s = 55^\circ\text{C}$ .....   | 93  |
| Figura 49 - Variação da temperatura na superfície do condutor – ACCR Drake, com (A) $\delta = 90^\circ$ , (B) $\delta = 60^\circ$ , (C) $\delta = 30^\circ$ e (D) $\delta = 0^\circ$ .....   | 93  |
| Figura 50 - Variação da velocidade do vento – AeroZ™ Drake, com (A) $\delta = 90^\circ$ , (B) $\delta = 60^\circ$ , (C) $\delta = 30^\circ$ e (D) $\delta = 0^\circ$ .....   | 94  |
| Figura 51 - Tela de abertura do aplicativo <i>CalcAmp</i> .....  | 97  |
| Figura 52 - Tela de operação do aplicativo <i>CalcAmp</i> .....  | 97  |
| Figura 53 - Exemplo de relatório gerado pelo <i>CalcAmp</i> .....  | 101 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 – Parâmetros de entrada para os métodos IEEE e CIGRÉ .....  | 29  |
| Tabela 2 – Coeficientes para cálculo do número de <i>Nusselt</i> em função de $\delta$ .....   | 32  |
| Tabela 3 – Coeficientes para cálculo do número de <i>Nusselt</i> de 90° .....  | 33  |
| Tabela 4 – Coeficientes para cálculo do número de <i>Nusselt</i> para convecção natural .  | 35  |
| Tabela 5 – Coeficientes para cálculo da intensidade de radiação global ao nível do mar .....   | 45  |
| Tabela 6 – Constantes para cálculo do azimute do sol .....   | 46  |
| Tabela 7 – Parâmetros de entrada para exemplo do método CIGRÉ .....  | 49  |
| Tabela 8 – Resultados, pelo método CIGRÉ, dos exemplos A e B para cálculo de corrente .....  | 50  |
| Tabela 9 – Resultados, pelo método CIGRÉ, dos exemplos A e B para cálculo de temperatura .....   | 52  |
| Tabela 10 – Parâmetros de entrada para exemplo do método IEEE, cálculo de corrente .....   | 53  |
| Tabela 11 – Resultados, pelo método IEEE, para cálculo de corrente .....   | 53  |
| Tabela 12 – Parâmetros de entrada para exemplo do método IEEE, cálculo de temperatura no .....   | 55  |
| Tabela 13 – Parâmetros de entrada padrão para testes comparativos .....  | 56  |
| Tabela 14 – Faixa de valores dos parâmetros de entrada para testes comparativos ..   | 56  |
| Tabela 15 - Parâmetros, faixas de valores, valor padrão e passo do valor disponíveis no <i>CalcAmp</i> .....                                   | 100 |
| Tabela 16 - Condutores disponíveis no <i>CalcAmp</i> , com suas respectivas faixas de valores e valores padrão.....                            | 100 |
| Tabela 17 - Comparação entre valores de ampacidade nos catálogos dos fabricantes e calculados pelo <i>CalcAmp</i> .....                        | 102 |
| Tabela 18 - Valores de parâmetros utilizados para cálculo de ampacidade no aplicativo <i>CalcAmp</i> quando não informado pelo fabricante..... | 103 |

## LISTA DE SIGLAS

|                 |   |
|-----------------|---|
| ACCC®           | <i>Aluminum Conductor Composite Core</i>  |
| ACCR            | <i>Aluminum Conductor Composite Reinforced</i>  |
| ANEEL           | Agência Nacional de Energia Elétrica  |
| CA ou AAC       | Condutor de Alumínio Nu ou <i>All Aluminum Conductor</i>  |
| CAA ou ACSR     | Condutor de Alumínio com Alma de Aço ou <i>Aluminum Conductor Steel-Reinforced</i>                                  |
| CIGRÉ           | <i>Conseil International des Grands Réseaux Electriques</i>   |
| HTLS            | <i>High Temperature Low Sag</i>   |
| IEEE            | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>  |
| LAT             | Linha Aérea de Transmissão de Energia Elétrica  |
| LAT-CA          | Linha Aérea de Transmissão em Corrente Alternada  |
| LAT-CC          | Linha Aérea de Transmissão em Corrente Contínua   |
| LST-CA          | Linha Subterrânea de Transmissão em Corrente Alternada  |
| LAST-CA         | Linha Aérea e Subterrânea de Transmissão em Corrente Alternada  |
| LT              | Linha de Transmissão de Energia Elétrica (genérico)   |
| MME             | Ministério de Minas e Energia   |
| ONS             | Operador Nacional do Sistema  |
| RIV             | <i>Radio Interference Voltage</i>   |
| SEP             | Sistema Elétrico de Potência  |
| SIN             | Sistema Interligado Nacional  |
| T-CA ou T-AAC   | Condutor de Alumínio Termorresistente ou <i>Thermoresistant All Aluminum Conductor</i>                              |
| T-CAA ou T-ACSR | Condutor de Alumínio Termorresistente com Alma de Aço ou <i>Thermoresistant Aluminum Conductor Steel-Reinforced</i> |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                       |   |                     |
|-----------------------|---|---------------------|
| $c_f$                 | Capacidade de calor específico do ar, 1005                      | $J/kg.K$            |
| $D$                   | Diâmetro externo do condutor                                    | $mm$                |
| $d$                   | Diâmetro de cada fio externo do condutor                        | $mm$                |
| $D_1$                 | Diâmetro do núcleo do condutor                                  | $mm$                |
| $F$                   | Reflectância do solo ou albedo                                  | <i>adimensional</i> |
| $\mathcal{F}_{c-g}$   | Fração de energia irradiada do condutor para o solo e arredores | <i>adimensional</i> |
| $\mathcal{F}_{c-sky}$ | Fração de energia irradiada do condutor para o céu              | <i>adimensional</i> |
| $g$                   | Aceleração gravitacional, 9.807                                 | $m/s^2$             |
| $Gr$                  | Número de <i>Grashof</i>  | <i>adimensional</i> |
| $H$                   | Horário   | <i>adimensional</i> |
| $H_s$                 | Altitude solar  | $^\circ$            |
| $I$                   | Ampacidade / Corrente elétrica                                  | $A$                 |
| $I_{B(0)}$            | Intensidade de radiação solar direta ao nível do mar            | $W/m^2$             |
| $I_{B(y)}$            | Intensidade de radiação solar direta ajustado para a altitude   | $W/m^2$             |
| $I_d$                 | Intensidade de radiação solar difusa                            | $W/m^2$             |
| $I_T$                 | Intensidade de radiação solar global                            | $W/m^2$             |
| $K_{angle}$           | Fator de direção do vento                                       | <i>adimensional</i> |
| $K_{solar}$           | Coeficiente de correção de altitude                             | <i>adimensional</i> |
| $N$                   | Dia do ano (1 para 1º de janeiro)                               | <i>adimensional</i> |
| $N_s$ ou $AT$         | Clareza da Atmosfera  | <i>adimensional</i> |
| $Nu_\beta$            | Número de <i>Nusselt</i> em função de $\beta$                   | <i>adimensional</i> |
| $Nu_\delta$           | Número de <i>Nusselt</i> em função de $\delta$                  | <i>adimensional</i> |
| $Nu_{90}$             | Número de <i>Nusselt</i> de 90°                                 | <i>adimensional</i> |
| $Nu_{nat}$            | Número de <i>Nusselt</i> para convecção natural                 | <i>adimensional</i> |
| $P_c$                 | Perda de calor por convecção                                    | $W/m$               |
| $P_{c,forced}$        | Perda de calor por convecção forçada                            | $W/m$               |
| $P_{c,nat}$           | Perda de calor por convecção natural                            | $W/m$               |
| $P_i$                 | Ganho de calor por efeito corona                                | $W/m$               |
| $P_J$                 | Ganho de calor por efeito <i>Joule</i>                          | $W/m$               |
| $P_M$                 | Ganho de calor por efeito magnético                             | $W/m$               |
| $P_r$                 | Perda de calor por radiação                                     | $W/m$               |

|              |  |                     |
|--------------|--|---------------------|
| $P_s$        | Ganho de calor por aquecimento solar                               | $W/m$               |
| $P_w$        | Perda de calor por evaporação                                      | $W/m$               |
| $Pr$         | Número de <i>Prandtl</i>   | <i>adimensional</i> |
| $R_{ac}$     | Resistência elétrica AC por unidade de comprimento                 | $\Omega/m$          |
| $R_s$        | Rugosidade superficial do condutor                                 | <i>adimensional</i> |
| $Re$         | Número de <i>Reynolds</i>  | <i>adimensional</i> |
| $T_1$        | Temperatura 1  | $^{\circ}C$         |
| $T_2$        | Temperatura 2  | $^{\circ}C$         |
| $T_a$        | Temperatura ambiente   | $^{\circ}C$         |
| $T_f$        | Temperatura de filme   | $^{\circ}C$         |
| $T_g$        | Temperatura do solo abaixo do condutor                             | $^{\circ}C$         |
| $T_s$        | Temperatura na superfície do condutor                              | $^{\circ}C$         |
| $T_{si}$     | Temperatura na superfície do condutor inicial                      | $^{\circ}C$         |
| $T_{sky}$    | Temperatura do céu acima do condutor                               | $^{\circ}C$         |
| $V$          | Velocidade do vento  | $m/s$               |
| $y$          | Altitude   | $m$                 |
| $Z$          | Hora ângulo do sol   | $^{\circ}$          |
| $\alpha_s$   | Absortividade do condutor  | <i>adimensional</i> |
| $\beta$      | Inclinação do condutor com o horizonte                             | $^{\circ}$          |
| $\gamma$     | Densidade do ar local  | $kg/m^3$            |
| $\gamma_c$   | Azimute do condutor  | $^{\circ}$          |
| $\gamma_s$   | Azimute do sol   | $^{\circ}$          |
| $\delta$     | Ângulo de ataque do vento  | $^{\circ}$          |
| $\delta_s$   | Ângulo de inclinação solar   | $^{\circ}$          |
| $\epsilon_s$ | Emissividade do condutor   | <i>adimensional</i> |
| $\eta$       | Ângulo de incidência do feixe solar em relação ao eixo do condutor | $^{\circ}$          |
| $\lambda_f$  | Condutividade térmica de filme                                     | $W/K.m$             |
| $\mu_f$      | Viscosidade dinâmica de temperatura de filme                       | $kg/m.s$            |
| $\nu_f$      | Viscosidade cinemática   | $m^2/s$             |
| $\sigma_B$   | Constante de Stefan-Boltzmann, $5.6697 * 10^{-8}$                  | $W/m^2.K^4$         |
| $\varphi$    | Latitude   | $^{\circ}$          |
| $\chi$       | Variável do azimute solar  | <i>adimensional</i> |

## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1.</b>    | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>16</b> |
| 1.1          | IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....                             | 18        |
| 1.2          | OBJETIVOS DO TRABALHO .....  | 19        |
| 1.3          | METODOLOGIA.....   | 20        |
| 1.4          | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....   | 21        |
| <b>1.4.1</b> | <b>Sistema Elétrico de Potência (SEP).....</b>                         | <b>22</b> |
| <b>1.4.2</b> | <b>Linha de Transmissão (LT) .....</b>                                 | <b>22</b> |
| <b>1.4.3</b> | <b>Cabos Condutores para LATs .....</b>                                | <b>22</b> |
| <b>2.</b>    | <b>MÉTODOS IEEE E CIGRÉ.....</b>                                       | <b>28</b> |
| 2.1          | PARÂMETROS DE ENTRADA .....  | 28        |
| 2.2          | EQUAÇÕES DO MÉTODO CIGRÉ .....   | 30        |
| <b>2.2.1</b> | <b>Perda de calor por convecção – <math>P_c</math> .....</b>           | <b>30</b> |
| <b>2.2.2</b> | <b>Perda de calor por radiação – <math>P_r</math> .....</b>            | <b>36</b> |
| <b>2.2.3</b> | <b>Ganho de calor por aquecimento solar – <math>P_s</math>.....</b>    | <b>37</b> |
| <b>2.2.4</b> | <b>Ganho de calor por aquecimento Joule – <math>P_j</math>.....</b>    | <b>40</b> |
| 2.3          | EQUAÇÕES DO MÉTODO IEEE .....  | 41        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Perda de calor por convecção – <math>P_c</math> .....</b>           | <b>41</b> |
| <b>2.3.2</b> | <b>Perda de calor por radiação – <math>P_r</math> .....</b>            | <b>43</b> |
| <b>2.3.3</b> | <b>Ganho de calor por aquecimento solar – <math>P_s</math>.....</b>    | <b>44</b> |
| <b>2.3.4</b> | <b>Ganho de calor por aquecimento Joule – <math>P_j</math>.....</b>    | <b>47</b> |
| 2.4          | PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE OS DOIS MÉTODOS .....                      | 47        |
| <b>3.</b>    | <b>VALIDAÇÃO DAS ROTINAS COMPUTACIONAIS .....</b>                      | <b>49</b> |
| 3.1          | VALIDAÇÃO DA ROTINA DO MÉTODO CIGRÉ .....                              | 49        |
| 3.2          | VALIDAÇÃO DA ROTINA DO MÉTODO IEEE.....                                | 52        |
| <b>4.</b>    | <b>COMPARAÇÃO NUMÉRICA DOS MÉTODOS.....</b>                            | <b>56</b> |
| 4.1          | VARIAÇÃO DA TEMPERATURA MÁXIMA NA SUPERFÍCIE DO CONDUTOR - $T_s$ ..... | 57        |
| 4.2          | VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE DO CONDUTOR - $\epsilon_s$ .....              | 58        |
| 4.3          | VARIAÇÃO DA ABSORTIVIDADE DO CONDUTOR - $\alpha_s$ .....               | 59        |
| 4.4          | VARIAÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE - $T_a$ .....                         | 60        |
| 4.5          | VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO - $V$ .....                            | 61        |
| 4.6          | VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATAQUE DO VENTO - $\delta$ .....                 | 63        |
| 4.7          | VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO CONDUTOR COM O HORIZONTE - $\beta$ .....     | 64        |
| 4.8          | VARIAÇÃO DA ALTITUDE - $y$ .....                                       | 66        |

|              |  |            |
|--------------|--|------------|
| 4.9          | VARIAÇÃO DO AZIMUTE DO CONDUTOR - $\gamma_c$ .....   | 67         |
| 4.10         | VARIAÇÃO DA LATITUDE - $\varphi$ .....   | 68         |
| 4.11         | VARIAÇÃO DA CLAREZA DA ATMOSFERA - $N_s$ ou $AT$ .....   | 69         |
| 4.12         | VARIAÇÃO DO DIA DO ANO - $N$ .....   | 71         |
| 4.13         | VARIAÇÃO DO HORÁRIO DO DIA - $H$ .....   | 72         |
| 4.14         | VARIAÇÃO DA REFLECTÂNCIA DO SOLO OU ALBEDO - $F$ .....   | 73         |
| 4.15         | INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ANALISADOS.....  | 74         |
| <b>5.</b>    | <b>ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS.....</b>  | <b>75</b>  |
| <b>6.</b>    | <b>ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE CONDUTORES.....</b>  | <b>79</b>  |
| 6.1          | CA ANEMONE.....  | 82         |
| 6.2          | T-CAA T-DRAKE.....   | 84         |
| 6.3          | T-CAA AeroZ™ DRAKE.....  | 86         |
| 6.4          | ACCC® DRAKE .....  | 89         |
| 6.5          | ACCR DRAKE .....   | 92         |
| 6.6          | CONSIDERAÇÕES FINAIS.....  | 94         |
| <b>7.</b>    | <b>APLICATIVO PARA CÁLCULO DE AMPACIDADE .....</b>   | <b>96</b>  |
| 7.1          | APRESENTANDO O <i>CalcAmp</i> .....  | 96         |
| 7.2          | UTILIZANDO o <i>CalcAmp</i> .....  | 98         |
| <b>7.2.1</b> | <b>Abrindo e utilizando o aplicativo .....</b>   | <b>98</b>  |
| <b>7.2.2</b> | <b>Comparação de valores de catálogo e calculados pelo <i>CalcAmp</i> .....</b>                | <b>102</b> |
| <b>8.</b>    | <b>CONCLUSÃO E MELHORIAS FUTURAS .....</b>   | <b>104</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>106</b> |
|              | <b>APÊNDICE A – Rotina em <i>MATLAB</i> para cálculo da ampacidade pelo método CIGRÉ .....</b> | <b>109</b> |
|              | <b>APÊNDICE B – Rotina em <i>MATLAB</i> para cálculo da ampacidade pelo método IEEE .....</b>  | <b>118</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente expansão do consumo de energia, o surgimento de restrições ambientais (dificultando a liberação de novos corredores de transmissão), a modificação no perfil de ocupação no entorno da linha, o elevado investimento requerido para indenização da servidão do terreno e para a construção de novos sistemas de transmissão, entre outros empecilhos, fez com que o tema ampacidade passasse a ser explorado mais a fundo (ANJOS, 2013).

Ampacidade é definida como “a capacidade de condução de corrente, expressa em ampères (A), de um condutor elétrico sob condições térmicas indicadas” (IEEE, 2012a). A ampacidade de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica (LAT) foi escolhida como tema a ser abordado neste Projeto de Diplomação em virtude da crescente importância do assunto na área de sistemas elétricos de potência (SEP). O motivo de tal importância deve-se ao constante aumento na demanda de energia elétrica, que desencadeia um aumento na potência transferida por linhas de transmissão e de distribuição. Uma solução seria construir novas linhas, mas isso pode não ser viável por questões econômicas ou ambientais (CIGRÉ, 2002).

O estudo da ampacidade de LAT tem sido explorado por muitos pesquisadores, e uma grande literatura pode ser encontrada abordando este tema. Como decorrência, ao longo dos anos surgiram muitas metodologias, sendo bastante comum que cada concessionária empregasse seu próprio método.

Em âmbito brasileiro, a fim de obter uma padronização para permitir a comparação de projetos de LAT, a ANEEL optou por escolher a metodologia proposta pelo CIGRE, editando a Nota Técnica N° 038/2005-SRT/ANEEL, de 14/11/2005.

O cálculo da ampacidade baseia-se na equação do balanço térmico (*heat equation*) do condutor, na qual levam-se em conta a corrente elétrica que atende a carga, as características elétricas do condutor e condições ambientais, como velocidade e direção do vento, temperatura ambiente e radiação solar. Para a situação de regime permanente, em operação normal, assumindo-se que a carga elétrica seja razoavelmente constante, a temperatura do condutor não muda significativamente, ou seja, o calor gerado pelo condutor é balanceado

pelo calor absorvido pelo ambiente (CIGRÉ, 2002). A equação de balanço térmico, neste caso, é dada pela Equação (1):

$$\begin{aligned} \text{Ganho de Calor} &= \text{Perda de Calor} \\ P_J + P_S + P_M + P_i &= P_c + P_r + P_w \end{aligned} \quad (1)$$

onde  $P_J$  é o ganho de calor por efeito *Joule*,  $P_S$  é o ganho de calor por aquecimento solar,  $P_M$  é o ganho de calor efeito magnético,  $P_i$  é o ganho de calor por corona,  $P_c$  é a perda de calor por convecção,  $P_r$  é a perda de calor por radiação e  $P_w$  é a perda de calor por evaporação. Todos os valores em *watts/metro (W/m)*.

A limitação térmica do cabo tem grande importância no comportamento dos condutores, uma vez que, em LAT, esses são tensionados mecanicamente e energizados em alta tensão. O aumento da temperatura nos materiais que compõem os condutores, seja por aumento da corrente ou por questões climáticas, causa dilatação e alongamento, aumentando a flecha e, conseqüentemente, diminuindo a distância de segurança que é estabelecida entre os condutores e as pessoas, o solo, a vegetação, os edifícios, os veículos e demais obstáculos sob a linha (ANJOS, 2013).

O aumento excessivo da temperatura no condutor pode acarretar uma deformação tal que ultrapasse os limites elásticos dos materiais do condutor, fazendo com que, mesmo em condições normais, este não retorne à sua posição original, conforme ilustra a Figura 1, onde  $D1$  representa a distância do condutor ao solo para uma condição de carga normal da linha,  $D2$  representa a distância para uma condição de sobrecarga excessiva, e  $D3$  representa a distância após a sobrecarga excessiva.

Portanto, o estudo da ampacidade é importante na fase de planejamento da expansão, onde auxilia na escolha do condutor mais econômico e adequado às condições de projeto, bem como ao atendimento das distâncias de segurança em condições normal e de emergência recomendadas por norma. Na fase de operação, o monitoramento da corrente, nas condições normal e de emergência, é realizada de forma a garantir que as distâncias de segurança não sejam violadas, sendo que esta tarefa, nas modernas linhas de transmissão, pode ser



2002 foi publicada a *WG 22.12 – Technical Brochure 207: Thermal Behaviour of Overhead Conductors* (CIGRÉ, 2002).

As duas publicações trazem metodologias diferentes para o cálculo da ampacidade em LAT. Apesar de ambas utilizarem o mesmo conceito básico de balanço térmico, suas aproximações para o cálculo dos termos do balanço térmico são diferentes. Em virtude disso, a ampacidade calculada por cada um dos métodos pode variar em quase 10%, dependendo das condições ambientais consideradas (SCHMIDT, 1999).

Ambos os métodos acabam por simplificar a Equação (1), alegando, conforme Cigré (2014), que o aquecimento por corona pode ser significativo em tempos de alta umidade e ventos com altas velocidades, mas isso é normalmente irrelevante para fins de avaliação devido ao fato de os efeitos da convecção nestas situações serem muito mais importantes. A perda de calor devido à evaporação pode ter um efeito maior na temperatura do condutor, mas na maioria das avaliações de cálculo térmico isso é ignorado por ser raro que toda a linha esteja molhada e também por ser difícil de avaliar. Também o aquecimento por efeito magnético é frequentemente incluído no termo do aquecimento Joule, pelo incremento da resistência efetiva do condutor. Assim, a Equação (1) simplifica-se, ficando como mostrada da Equação (2).

$$P_J + P_S = P_c + P_r \quad (2)$$

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo principal mensurar a diferença entre as duas metodologias, verificando quais variáveis mais influenciam para o distanciamento dos resultados, para a situação de regime permanente. Como objetivo secundário, há o desenvolvimento de um aplicativo em ambiente *MATLAB* para o cálculo de ampacidade em LAT, com interface gráfica, apresentando os resultados obtidos por meio dos dois métodos, em diferentes configurações ambientais e tipos de condutores.

### 1.3 METODOLOGIA

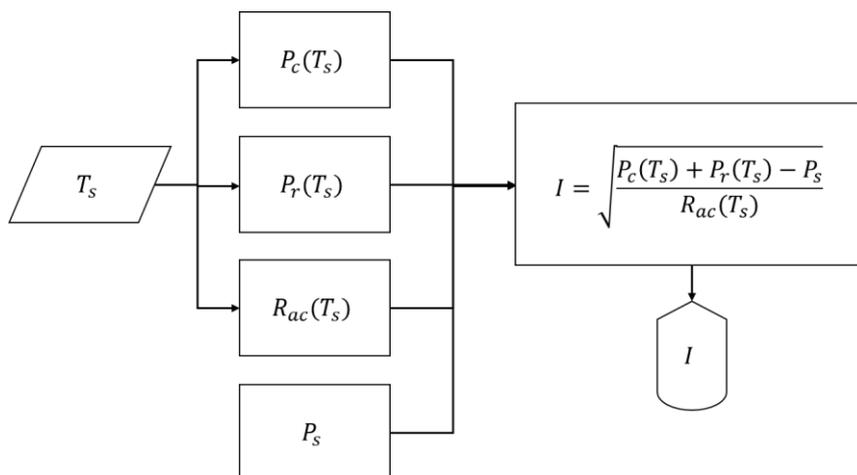
O trabalho foi executado utilizando-se comparações numéricas dos resultados das metodologias apontadas pelas normas IEEE 738-2012, chamada a partir deste ponto de *método IEEE*, e pela norma CIGRÉ WR 22.12: TB 207, chamada a partir deste ponto de *método CIGRÉ*, que tratam sobre o cálculo de ampacidade em LAT. Assim, foi aplicada uma metodologia experimental/comparativa em cada um dos métodos de cálculo. Ainda pode ser definida com gênero prático, objetivo explicativo, abordagem quantitativa e natureza aplicada.

Foram executadas rotinas em *MATLAB* com a aplicação dos dois métodos e as mesmas condições de entrada. Em uma primeira etapa as condições de entradas variam, porém, em conjunto. Em uma segunda etapa, é analisado o comportamento da variação de uma variável por vez, enquanto as outras se mantêm estáticas. Os resultados foram compilados e montados em tabelas e gráficos, para uma melhor análise. Ainda foram analisados quais parâmetros influenciam de forma mais significativa no resultado final.

Os dados das condições de entradas consistem de três fatores fundamentais: características do condutor, condições ambientais e carga da linha de transmissão. Foram analisados o comportamento de mais de um tipo de condutor, bem como condições ambientais e de carga em situações normais e extremas.

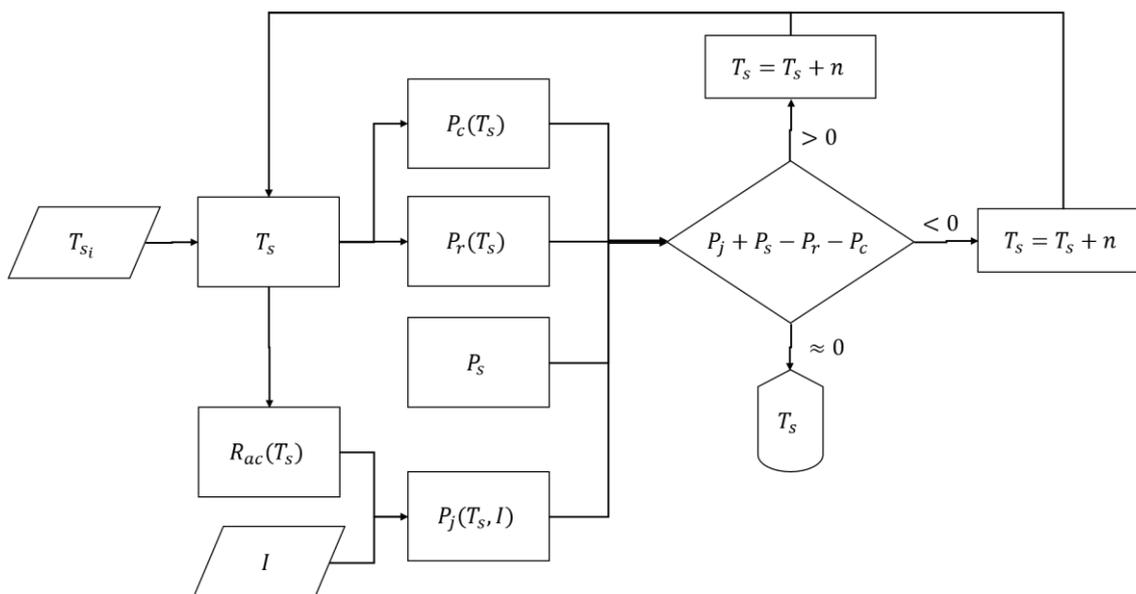
Há ainda duas modalidades de cálculo: determinação da ampacidade (Figura 2) em regime permanente para as condições dadas, e determinação da temperatura do condutor (Figura 3) em regime permanente para as condições dadas. No primeiro caso, entram-se com todos os parâmetros, com exceção da corrente ( $I$ ), que se deseja determinar, tendo como principal valor de entrada a temperatura no condutor ( $T_s$ ). No segundo caso, entram-se com todos os parâmetros, com exceção da temperatura do condutor ( $T_s$ ), a qual deseja-se determinar, tendo como principal valor de entrada a corrente ( $I$ ), porém um valor inicial de temperatura no condutor ( $T_{s_i}$ ) é arbitrado para que se dê início a um processo iterativo.

Figura 2 – Fluxograma de algoritmo para cálculo de corrente em regime permanente.



Fonte: CIGRÉ, 2014 (adaptado)

Figura 3 – Fluxograma de algoritmo para cálculo de temperatura no condutor em regime permanente



Fonte: CIGRÉ, 2014 (adaptado)

#### 1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados alguns conceitos e definições a respeito do tema principal do trabalho.

#### 1.4.1 Sistema Elétrico de Potência (SEP)

De acordo com a NBR 5460 (ABNT, 1992), o SEP, “em sentido amplo, é o conjunto de todas as instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica”. No Brasil, por força da Constituição Federal de 1988, quem regula e fiscaliza o SEP é o governo federal, sob a responsabilidade do Ministério de Minas e Energia (MME), exercida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). No ano de 1998 foi criado o Sistema Interligado Nacional (SIN), que congrega o sistema de produção e transmissão de energia elétrica, haja vista tratar-se de um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com multiproprietários. A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. A integração dos recursos de geração e transmissão permite o atendimento ao mercado com segurança e economicidade (ONS, 2017). O Operador Nacional do Sistema (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle das operações no SIN.

#### 1.4.2 Linha de Transmissão (LT)

Uma Linha de Transmissão (LT) é a parte de um sistema de transmissão responsável pelo transporte de energia elétrica entre centros de produção e centros de consumo e também a interligação de centros de produção (FUCHS, 1977), caracterizado pelo valor nominal de tensão. A Rede Básica de transmissão é aquela que opera com tensões iguais ou superiores a 230 KV. Uma LT pode ser: aérea em corrente alternada (LAT-CA), operando entre 230 KV e 765 KV; aérea em corrente contínua (LAT-CC), operando entre  $\pm 500$  KV e  $\pm 800$  KV; subterrânea em corrente alternada (LST-CA), operando entre 230 KV e 525 KV; e composta por partes aérea e subterrânea em corrente alternada (LAST-CA), operando entre 230 KV e 525 KV. Uma LAT é composta basicamente de três partes: estruturas ou suportes e acessórios, cadeias de isoladores e acessórios, cabos condutores e acessórios.

#### 1.4.3 Cabos Condutores para LATs

De acordo com Fuchs (1977), “constituem os elementos ativos propriamente ditos das LTs, devendo, portanto, possuir características especiais. Sua escolha adequada representa um problema de fundamental importância no

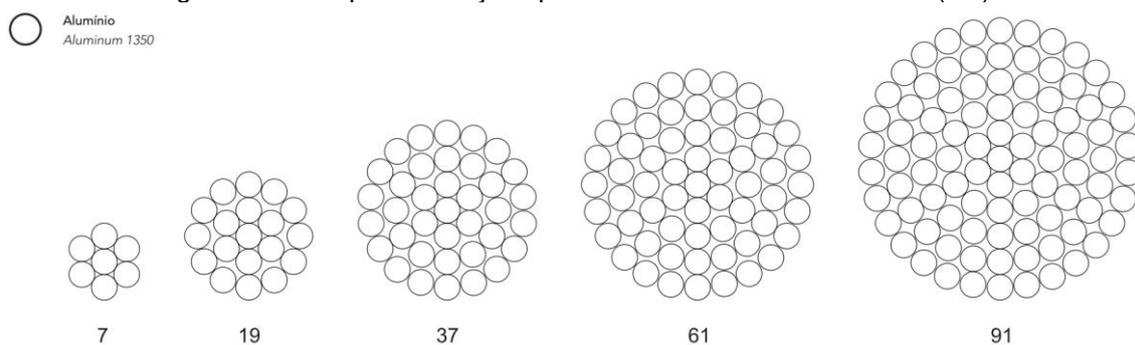
dimensionamento das linhas, pois não só depende dela o bom desempenho da linha, como tem importantes implicações de natureza econômica”. Um condutor ideal para LT deveria apresentar as seguintes características: alta condutividade elétrica, baixo custo, boa resistência mecânica, baixo peso específico e alta resistência à oxidação e à corrosão por agentes químicos poluentes. Porém, essas condições não são atendidas simultaneamente por nenhum material em particular. Os metais que mais atendem a esses requisitos são o cobre e o alumínio, bem como suas ligas. Num primeiro momento, os condutores de cobre foram largamente utilizados pois, à época, o preço do alumínio ainda era muito elevado comparado ao cobre, e também apresenta menor resistência mecânica. Com o surgimento dos cabos com alma de aço, esta última desvantagem foi suprida. Outra vantagem dos cabos de alumínio perante os de cobre é seu melhor desempenho em relação ao efeito Corona em virtude de seus diâmetros maiores. Mais posteriormente, por volta da metade do século XX, com o avanço da tecnologia do alumínio, é que o cobre foi definitivamente deixado de ser implementado em LTs.

Dentre os diversos tipos de cabos condutores de alumínio nu, podemos destacar:

- Condutor de Alumínio Nu (CA) ou *All Aluminum Conductor (AAC)*: condutor encordado concentricamente com uma ou mais camadas de alumínio 1350-H19. Por apresentar baixa resistência mecânica, é pouco utilizado em LTs, pois requer vãos curtos entre as torres. Suas principais formações podem ser verificadas na Figura 4.

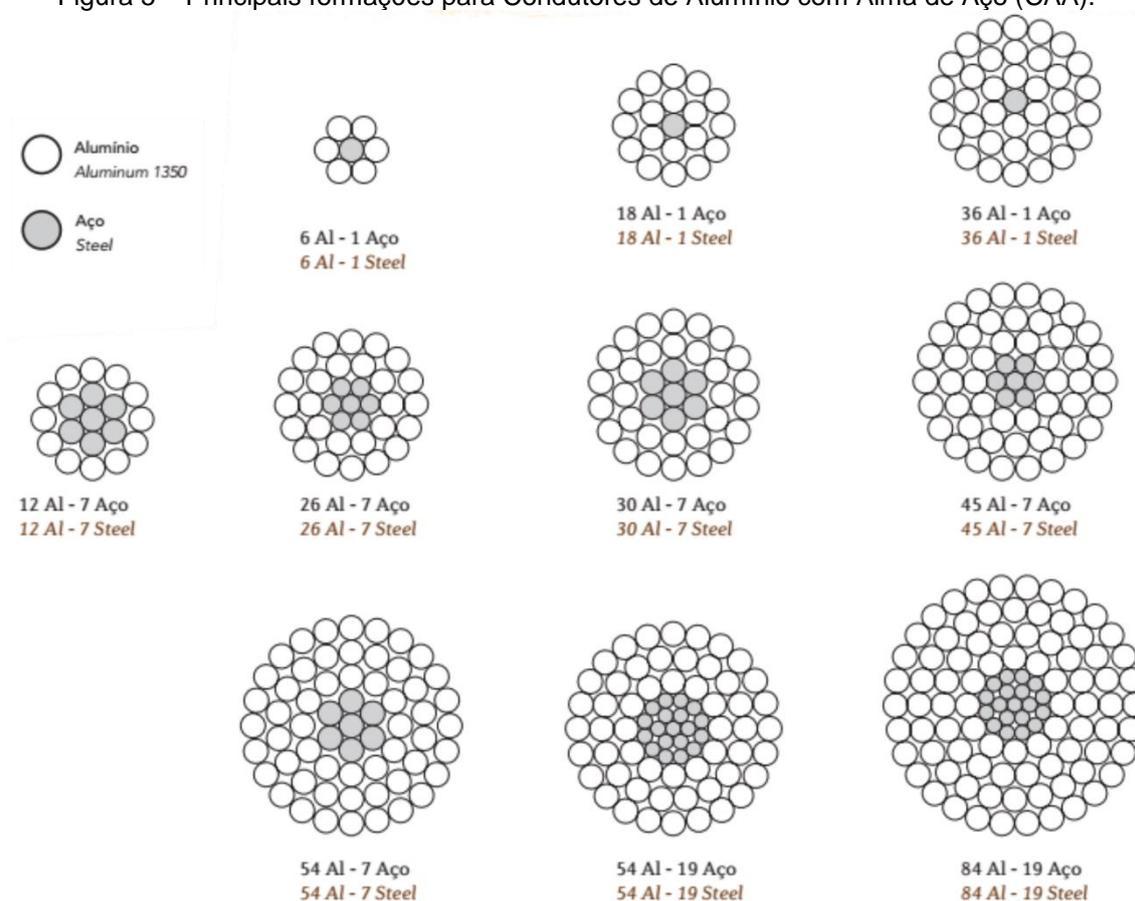
- Condutor de Alumínio com Alma de Aço (CAA) ou *Aluminum Conductor Steel-Reinforced (ACSR)*: condutor encordado concentricamente com uma ou mais camadas de alumínio 1350-H19 sobre uma alma de aço galvanizado, podendo ser constituída de um único fio de aço ou vários encordados. Muito utilizado em LTs, pois suporta maior esforço mecânico, propiciando um maior afastamento das torres. Suas principais formações podem ser verificadas na Figura 5.

Figura 4 – Principais formações para Condutores de Alumínio Nu (CA).



Fonte: ALUBAR, 2015

Figura 5 – Principais formações para Condutores de Alumínio com Alma de Aço (CAA).

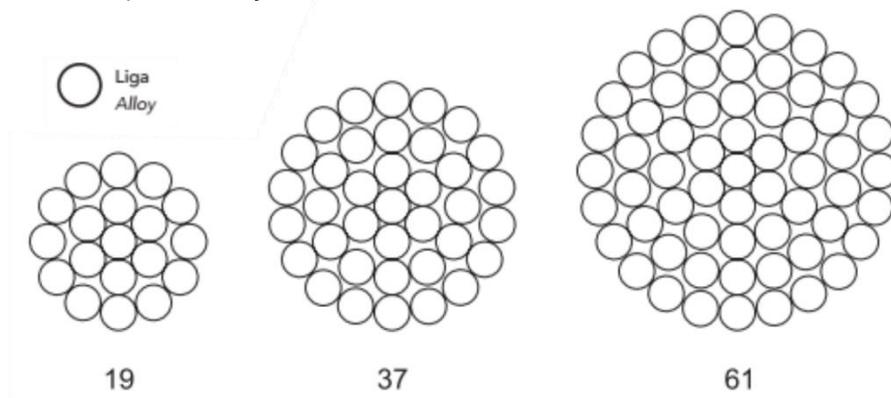


Fonte: ALUBAR, 2015

- Condutor de Alumínio Termorresistente (T-CA) ou *Thermoresistant Aluminum Conductor (T-AAC)*: tem as mesmas características de formação dos cabos CA, com a vantagem de poder ser utilizado em regime permanente contínuo de trabalho com temperaturas de até 150°C (para o AL 1350 a temperatura máxima é de 90°C), sem alteração de suas características mecânicas. Isso permite a essa categoria de condutor uma ampacidade até 50%

superior em relação àquela de um cabo de liga tradicional de mesma característica construtiva (mesma bitola). Suas principais formações podem ser verificadas na Figura 6.

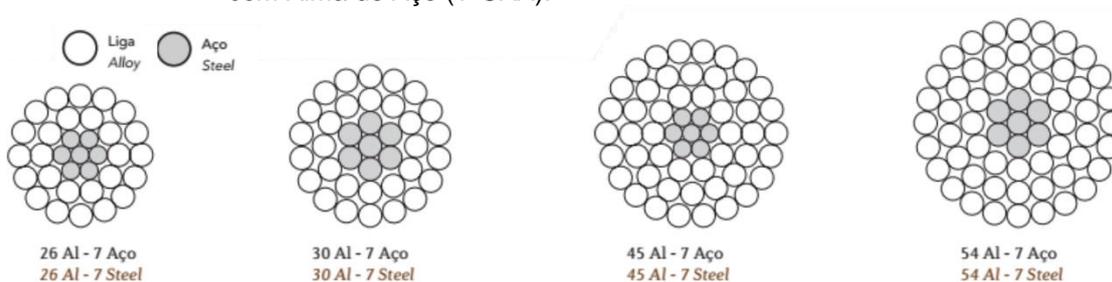
Figura 6 – Principais formações para Condutores de Alumínio Termorresistentes (T-CA).



Fonte: ALUBAR, 2015

- Condutor de Alumínio Termorresistente com Alma de Aço (T-CAA) ou *Thermoresistant Aluminum Conductor Steel-Reinforced (T-ACSR)*: tem as mesmas características de formação dos cabos CAA. Assim como os cabos T-CA, possuem a vantagem térmica em relação aos cabos tradicionais AL 1350, podendo chegar a uma ampacidade 50% superior ao seu equivalente CAA. Suas principais formações podem ser verificadas na Figura 7.

Figura 7 – Principais formações para Condutores de Alumínio Termorresistente com Alma de Aço (T-CAA).

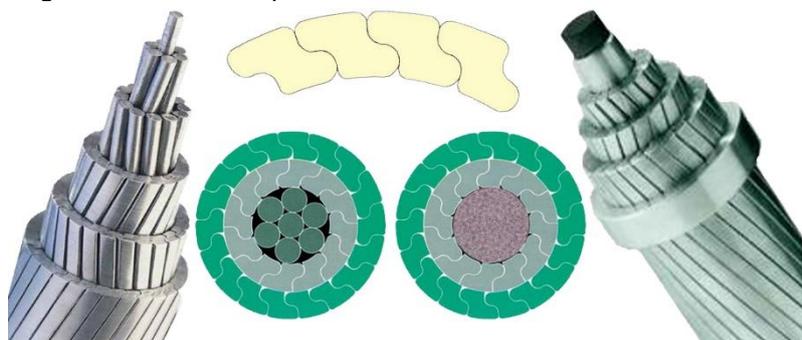


Fonte: ALUBAR, 2015

Alguns fabricantes de condutores têm lançado no mercado outros tipos de cabos, como os HTLS (*High Temperature Low Sag*), que são construídos com ligas de alumínio que suportam altas temperaturas, podendo trabalhar em até 180°C em regime permanente, chegando a 200°C em situação de emergência, e possuem núcleos fabricados em ligas metálicas especiais ou em compósitos, em

sua maioria fibras carbono, que garantem uma flecha menor quando comparados ao cabo CAA de mesmo diâmetro nominal. Outra característica dos HTLS é o formato dos fios utilizados no encordoamento, que na sua maioria fogem da tradicional seção transversal circular para formatos perfilados, como trapezoidais ou “Z”, como é o caso da linha AeroZ™ da fabricante de condutores Nexans, que pode ser observado na Figura 8, com núcleo de aço ou fibra de carbono.

Figura 8 - Modelo de perfil Z utilizado na linha AeroZ™ da Nexans



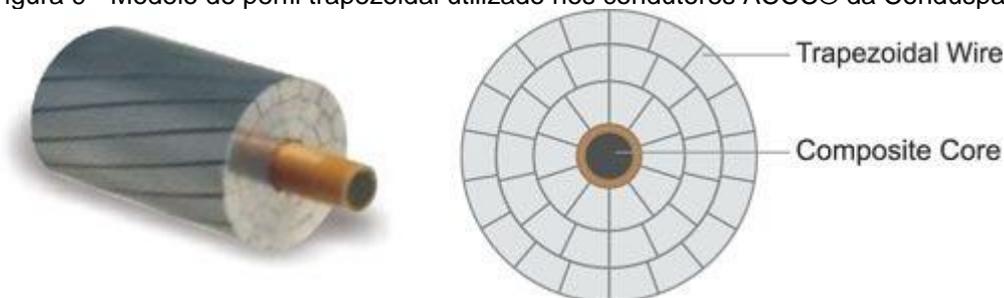
Fonte: Nexans Brasil (adaptado)

Segundo a Nexans (2016), o AeroZ™, quando comparado a um condutor redondo normal de mesmo diâmetro, possui capacidade de transmissão até 100% maior, flechas menores nas máximas ampacidades, menor resistência elétrica, propiciando menores perdas por efeito *Joule*, os fios em “Z” são intertravados, com uma superfície mais lisa e de melhor aerodinâmica, gerando menores perdas por RIV (*Radio Interference Voltage*) e corona.

Outra fabricante de condutores, a Condu spar Condutores Elétricos, em parceria com a empresa CTC Global, apresenta uma linha de condutores HTLS chamada de ACCC® (*Aluminum Conductor Composite Core*), construído com fios trapezoidais de alumínio tipo 1350 recozido, têmpera O, e núcleo em compósito de fibra de carbono e fibra de vidro, envolvidos por resina epóxi resistente ao calor, conforme ilustra a Figura 9. De acordo com a Condu spar (2017), quando comparados com cabos CAA de mesmo diâmetro, um cabo ACCC® pode conter até 28% mais massa de alumínio, ainda com uma redução no seu peso total, apresentando condutividade superior, permitindo uma operação mais eficiente. Oferece também uma redução substancial nas flechas,

em virtude da sua maior resistência à tração e menor coeficiente de expansão térmica, trabalhando a 180°C em regime permanente e 200°C em emergência.

Figura 9 - Modelo de perfil trapezoidal utilizado nos condutores ACCC® da Condu spar



Fonte: Indiamart (<https://www.indiamart.com/proddetail/accc-conductors-10540176433.html>)

A empresa 3M desenvolveu o cabo ACCR (*Aluminum Conductor Composite Reinforced*) para a sua linha de HTLS. Seus fios externos de alumínio-zircônio permitem o aquecimento do cabo a altas temperaturas sem recozimento e são oferecidos em seção circular ou trapezoidal, conforme a Figura 10. Cada fio de sua alma é composto por uma matriz de fios de alumínio de altíssima pureza reforçados com fibras de alumina (óxido de alumínio). Os condutores ACCR permitem a sua operação em regime permanente a uma temperatura de 210°C, e 240°C em regime de urgência (3M, 2017), podendo oferecer duas vezes ou mais ampacidade do que um condutor CAA de mesmo diâmetro externo.

Figura 10 - Exemplo de condutor ACCR da 3M



Fonte: 3M, 2017 (adaptado)

## 2. MÉTODOS IEEE E CIGRÉ

Neste capítulo são apresentadas as metodologias de cada parcela que contribui para o cálculo de ampacidade para cada um dos dois métodos avaliados (CIGRÉ e IEEE), bem como os parâmetros de entrada necessários para as suas aplicações, suas equações e principais diferenças entre os dois métodos.

Conforme a Equação (2), o balanço térmico, na sua forma resumida, sugerido para o cálculo da ampacidade provém dos cálculos de quatro parcelas de calor, sendo elas:  $P_J$  - ganho de calor por efeito *Joule*,  $P_S$  - ganho de calor por aquecimento solar,  $P_C$  - perda de calor por convecção,  $P_r$  - perda de calor por radiação, com todos os valores em *Watts/metro* ( $W/m$ ).

### 2.1 PARÂMETROS DE ENTRADA

Os dois métodos necessitam dos parâmetros do condutor, ambientais (ambiente e solar) e de carga da LAT. O método IEEE, porém, utiliza dois parâmetros ambientais a menos do que o método CIGRÉ. A Tabela 1 apresenta todos os parâmetros necessários, com seus respectivos símbolos e unidades, para a aplicação dos métodos analisados, na qual os parâmetros necessários apenas no método CIGRÉ estão assinalados com um asterisco (\*).

No que diz respeito ao condutor, as informações referentes aos parâmetros  $D$ ,  $D_1$ ,  $d$  e  $R_{ac}(T_1)$  podem ser encontrados em catálogos de fabricantes de condutores. Há fabricantes ainda que informam o valor de  $R_{ac}(T_2)$ , na qual  $T_2 > T_1$ , e, caso não seja informado, pode-se calcular esse valor a partir das especificações do condutor. O parâmetro  $T_s$ , também é conhecido por temperatura de projeto, isto é, define-se uma temperatura que esteja dentro dos limites de temperatura suportados pelo condutor. Os valores referentes aos parâmetros de absorvidade ( $\alpha_s$ ) e emissividade ( $\epsilon_s$ ) são dados em função do estado físico dos cabos devido ao seu tempo de uso, variando de 0,28 a 0,93 para a absorvidade, e de 0,27 a 0,95 para a emissividade (MORGAN, 1982).

Tabela 1 – Parâmetros de entrada para os métodos IEEE e CIGRÉ

| <b>Parâmetro</b>                     | <b>Símbolo</b>  | <b>Unidade</b> |
|--------------------------------------|-----------------|----------------|
| <b>Características do condutor</b>   |                 |                |
| Diâmetro externo do condutor         | $D$             | $mm$           |
| Diâmetro do núcleo                   | $D_1$           | $mm$           |
| Diâmetro cada fio externo            | $d$             | $mm$           |
| Temperatura máxima no condutor       | $T_s$           | $^{\circ}C$    |
| Emissividade                         | $\varepsilon_s$ | Adimensional   |
| Absortividade                        | $\alpha_s$      | Adimensional   |
| Resistência ac @ T1                  | $R_{ac}(T_1)$   | $\Omega/m$     |
| Resistência ac @ T2                  | $R_{ac}(T_2)$   | $\Omega/m$     |
| <b>Condições do ambiente</b>         |                 |                |
| Temperatura ambiente                 | $T_a$           | $^{\circ}C$    |
| Velocidade do vento                  | $V$             | $m/s$          |
| Ângulo de ataque do vento            | $\delta$        | $^{\circ}$     |
| Inclinação do condutor c/ horizonte* | $\beta$         | $^{\circ}$     |
| Altitude                             | $y$             | $m$            |
| <b>Condições solares</b>             |                 |                |
| Azimute do condutor                  | $\gamma_c$      | $^{\circ}$     |
| Latitude                             | $\varphi$       | $^{\circ}$     |
| Clareza da Atmosfera                 | $N_s$           | Adimensional   |
| Dia do Ano                           | $N$             | Adimensional   |
| Hora                                 | $H$             | Adimensional   |
| Reflectância do Solo*                | $F$             | Adimensional   |
| <b>Condições de carga da LAT</b>     |                 |                |
| Corrente                             | $I$             | $A$            |

\* = parâmetro utilizado apenas no método CIGRÉ

Fonte: Autor

Para as condições do ambiente e solares, analisam-se os aspectos locais de instalação da LAT, utilizando-se valores médios e extremos para aqueles parâmetros em que há a possibilidade de uma variação considerável independentemente do local geográfico, como é o caso da temperatura ambiente ( $T_a$ ), da velocidade do vento ( $V$ ), do ângulo de ataque do vento ( $\delta$ ), da clareza da atmosfera ( $N_s$ ) e do dia do ano ( $N$ ) e hora ( $H$ ). A reflectância do solo ( $F$ ), também denominada de albedo, refere-se ao tipo de terreno que há sob a LAT, assumindo valores, por exemplo, de 0,1 para florestas, 0,15 para áreas urbanas, 0,2 para campos e 0,3 para areia (MORGAN, 1982).

A corrente ( $I$ ), refere-se às condições de carga da linha e pode ser definida em projeto, com a finalidade de verificar se a temperatura no condutor ( $T_s$ ), dadas

as condições ambientais, está dentro dos limites definidos pelo fabricante, ou ainda pode ser calculada, especificando-se as condições ambientais e a temperatura no condutor ( $T_s$ ).

## 2.2 EQUAÇÕES DO MÉTODO CIGRÉ

### 2.2.1 Perda de calor por convecção – $P_c$

A perda de calor por convecção é devida à transferência de calor pelo movimento do ar que passa pela superfície do condutor. Dois tipos de convecção são considerados: natural, que ocorre quando a velocidade do vento é zero; e a forçada, que depende da velocidade do vento e da direção em relação do condutor. Em situações de velocidade do vento de moderada a alta, a forçada domina e a natural pode ser ignorada. Já em baixas velocidades de vento, a convecção natural pode ter um efeito significativo, tornando-se um mecanismo dominante de convecção em velocidades de vento muito baixas.

Conforme Cigré (2014):

[...] a variabilidade do vento, mesmo dentro de um único espaço, torna muito difícil avaliar o comportamento térmico das linhas aéreas, particularmente a baixas velocidades do vento e altas densidades de corrente. [...] Portanto, mesmo que as equações para modelar a transferência de calor local sejam precisas, o comportamento de toda a seção de linha ou uma única extensão pode ser diferente. Assim, para fins de classificação térmica, é necessário considerar esta variabilidade e modelar o vento adequadamente. Não é simples, e algumas abordagens baseadas em análises estatísticas estão em desenvolvimento para considerar esse problema. Por exemplo, o conceito de 'velocidade efetiva do vento' foi introduzido como a velocidade de vento laminar perpendicular, que produz o mesmo efeito de resfriamento ao longo de uma seção inteira.

Para o cálculo da perda de calor por convecção, calculam-se as perdas para a convecção natural e forçada, optando-se pela maior, conforme Equação (3).

$$P_c = \max(P_{c,forced}; P_{c,nat}) \quad (3)$$

Onde:

$P_c$  = Resfriamento por convecção [ $W/m$ ]

$P_{c,forced}$  = Resfriamento por convecção forçada [ $W/m$ ]

$P_{c,nat}$  = Resfriamento por convecção natural [ $W/m$ ]

A equação do resfriamento por convecção pode ser expressa como uma função do número de *Nusselt* (adimensional) que, por sua vez, também é função de outros dois números adimensionais, sendo o número de *Reynolds* e o número de *Prandtl*. De acordo com Çengel (1997), o número de *Nusselt*, também conhecido como *coeficiente adimensional de transferência de calor por convecção*, representa o aumento da transferência de calor através de uma camada de fluido como resultado da convecção em relação à condução através da mesma camada de fluido. Quanto maior o número de *Nusselt*, mais eficaz é a convecção. Um número *Nusselt* de  $Nu = 1$  para uma camada de fluido representa a transferência de calor somente por meio de condução, não havendo convecção. O número de *Reynolds* relaciona a proporção das forças de inércia pelas forças viscosas no fluido, que determina o regime de fluxo, determinando se esse fluxo é laminar ou turbulento. Para um número de *Reynolds* grande, as forças de inércia, que são proporcionais à densidade e à velocidade do fluido, são grandes em relação às forças viscosas e, portanto, as forças viscosas não podem evitar as flutuações aleatórias e rápidas do fluido. Contudo, em números pequenos ou moderados de *Reynolds*, as forças viscosas são grandes o suficiente para suprimir essas flutuações e manter o fluido "na linha". Assim, o fluxo é turbulento no primeiro caso e laminar no segundo. De acordo com Oliveira (2014), o número de *Prandtl* representa a relação entre a difusão da quantidade de movimento pela difusão do calor, isto é, para números de *Prandtl* muito maiores do que 1, o campo de velocidade desenvolve-se mais rapidamente; para número de *Prandtl* muito menores do que 1, o campo de temperatura desenvolve-se mais rapidamente; e para o caso de número de *Prandtl* próximos a 1, os campos de velocidade e temperatura desenvolvem-se simultaneamente, o que ocorre com os gases. Assim como o número de *Reynolds* define o regime de fluxo para a convecção forçada, para o caso de convecção natural utiliza-se o número de *Grashof*, ou seja, esse número fornece o critério principal para determinar se o fluxo de fluido é laminar ou turbulento na convecção natural.

Seja para o cálculo perda de calor por convecção natural, seja por convecção forçada, é necessário, antes de tudo, definir a temperatura de filme,  $T_f$ , que é definida pela média aritmética da temperatura ambiente e da temperatura na superfície do condutor, conforme a Equação (4).

$$T_f = 0,5 * (T_s + T_a) \quad (4)$$

Onde:

$T_f$  = Temperatura de filme [°C]

$T_s$  = Temperatura na superfície do condutor [°C]

$T_a$  = Temperatura ambiente [°C]

Como tratam-se de cálculos específicos, serão apresentados primeiramente os passos para a obtenção da perda de calor por convecção forçada e, após, por convecção natural.

**a) Perda de calor por convecção forçada -  $P_{c,forced}$**

A Equação (5) apresenta a expressão utilizada para se obter a perda de calor por convecção forçada.

$$P_{c,forced} = \pi * \lambda_f * (T_s - T_a) * Nu_\delta \quad (5)$$

Onde:

$P_{c,forced}$  = Resfriamento por convecção forçada [ $W/m$ ]

$\lambda_f$  = Condutividade térmica de filme [ $W/K.m$ ]

$T_s$  = Temperatura na superfície do condutor [°C]

$T_a$  = Temperatura ambiente [°C]

$Nu_\delta$  = Número de *Nusselt* em função de  $\delta$  [adimensional]

O número de *Nusselt* utilizado na Equação (5), chamado de  $Nu_\delta$ , recebe uma correção em função do ângulo de ataque do vento ( $\delta$ ), conforme a Equação (6). A Tabela 2 apresenta os coeficientes para  $A_1$ ,  $B_2$  e  $m_1$  que são dados em função do ângulo  $\delta$ .

$$Nu_\delta = Nu_{90} * (A_1 + B_2 * \sin(\delta)^{m_1}) \quad (6)$$

Onde:

$Nu_\delta$  = Número de *Nusselt* em função de  $\delta$  [adimensional]

$Nu_{90}$  = Número de *Nusselt* de 90° [adimensional]

$\delta$  = Ângulo de ataque do vento [°]

$A_1$ ,  $B_2$  e  $m_1$  = Coeficientes da Tabela 2 [adimensionais]

Tabela 2 – Coeficientes para cálculo do número de *Nusselt* em função de  $\delta$

| $\delta$        | $A_1$ | $B_2$ | $m_1$ |
|-----------------|-------|-------|-------|
| $\leq 24^\circ$ | 0,42  | 0,68  | 1,08  |
| $> 24^\circ$    | 0,42  | 0,58  | 0,90  |

Fonte: CIGRÉ, 2014

Por sua vez, para o cálculo do número de *Nusselt* corrigido em função do ângulo  $\delta$  de ataque do vento, calcula-se antes o número de *Nusselt* de 90°,  $Nu_{90}$ , conforme a Equação (7). A Tabela 3 traz os coeficientes  $B_1$  e  $n$ , dados em função do número de *Reynolds*,  $Re$ , e da rugosidade superficial do condutor,  $R_s$ .

$$Nu_{90} = B_1 * Re^n \quad (7)$$

Onde:

$Nu_{90}$  = Número de *Nusselt* de 90° [adimensional]

$Re$  = Número de *Reynolds* [adimensional]

$B_1$  e  $n$  = Coeficientes da Tabela 2 [adimensionais]

Tabela 3 – Coeficientes para cálculo do número de *Nusselt* de 90°

| $R_s$       | $Re$       | $B_1$ | $n$   |
|-------------|------------|-------|-------|
| $\leq 0,05$ | 100~2650   | 0,641 | 0,471 |
| $\leq 0,05$ | 2650~50000 | 0,178 | 0,633 |
| $> 0,05$    | 100~2650   | 0,641 | 0,471 |
| $> 0,05$    | 2650~50000 | 0,048 | 0,800 |

Fonte: CIGRÉ, 2014

A rugosidade superficial do condutor,  $R_s$ , segundo a Equação (8), mostra uma relação entre o diâmetro do fio na camada externa,  $d$ , e o diâmetro externo total do condutor,  $D$ , a fim de representar a topologia externa do condutor.

$$R_s = \frac{d}{2*(D-d)} \quad (8)$$

Onde:

$R_s$  = Rugosidade superficial do condutor [adimensional]

$d$  = Diâmetro do fio na camada externa [mm]

$D$  = Diâmetro externo total do condutor [mm]

O número de *Reynolds*,  $Re$ , conforme Equação (9), apresenta uma relação entre o produto da velocidade do vento ( $V$ ) com diâmetro externo total do condutor ( $D$ ), pela viscosidade cinemática ( $\nu_f$ ).

$$Re = \frac{V*D}{\nu_f} \quad (9)$$

Onde:

$Re$  = Número de *Reynolds* [adimensional]

$V$  = Velocidade do vento [ $m/s$ ]

$D$  = Diâmetro externo total do condutor [m]

$\nu_f$  = Viscosidade cinemática [ $m^2/s$ ]

Já a viscosidade cinemática,  $\nu_f$ , dada pela Equação (10), relaciona a viscosidade dinâmica de temperatura de filme,  $\mu_f$ , na Equação (11), e a densidade do ar local,  $\gamma$ , na Equação (12).

$$\nu_f = \frac{\mu_f}{\gamma} \quad (10)$$

Onde:

$\nu_f$  = Viscosidade cinemática [ $m^2/s$ ]

$\mu_f$  = Viscosidade dinâmica de temperatura de filme [ $kg/m.s$ ]

$\gamma$  = Densidade do ar local  $[kg/m^3]$

$$\mu_f = (17,239 + 4,635 * 10^{-2} * T_f - 2,03 * 10^{-5} * T_f^2) * 10^{-6} \quad (11)$$

Onde:

$\mu_f$  = Viscosidade dinâmica de temperatura de filme  $[kg/m.s]$

$T_f$  = Temperatura de filme  $[^\circ C]$

$$\gamma = \frac{1,293 - 1,525 * 10^{-4} * y + 6,379 * 10^{-9} * y^2}{1 + 0,00367 * T_f} \quad (12)$$

Onde:

$\gamma$  = Densidade do ar local  $[kg/m^3]$

$y$  = Altitude acima do nível do mar  $[m]$

$T_f$  = Temperatura de filme  $[^\circ C]$

A Equação (13) expressa a condutividade térmica de filme,  $\lambda_f$ , que também é utilizada na Equação (5), para a obtenção da perda de calor por convecção forçada, fechando assim esse equacionamento.

$$\lambda_f = 2,368 * 10^{-2} + 7,23 * 10^{-5} * T_f - 2,763 * 10^{-8} * T_f^2 \quad (13)$$

Onde:

$\lambda_f$  = Condutividade térmica de filme  $[W/K.m]$

$T_f$  = Temperatura de filme  $[^\circ C]$

#### b) Perda de calor por convecção natural - $P_{c,nat}$

A Equação (14) apresenta a expressão utilizada para se obter a perda de calor por convecção natural.

$$P_{c,nat} = \pi * \lambda_f * (T_s - T_a) * Nu_\beta \quad (14)$$

Onde:

$P_{c,nat}$  = Resfriamento por convecção natural  $[W/m]$

$\lambda_f$  = Condutividade térmica de filme  $[W/K.m]$

$T_s$  = Temperatura na superfície do condutor  $[^\circ C]$

$T_a$  = Temperatura ambiente  $[^\circ C]$

$Nu_\beta$  = Número de *Nusselt* para convecção natural em função de  $\beta$  *[adimensional]*

Na Equação (14), similar ao que ocorreu na Equação (5), tem-se a presença de um número de *Nusselt* com uma correção, agora em função do ângulo de inclinação  $\beta$  do condutor com a horizontal,  $Nu_\beta$ , dado na Equação (15).

$$Nu_{\beta} = Nu_{nat} * (1 - 6,76 * 10^{-6} * \beta^{2,5}) \quad (15)$$

Onde:

$Nu_{\beta}$  = Número de *Nusselt* para convecção natural em função de  $\beta$  [adimensional]

$Nu_{nat}$  = Número de *Nusselt* para convecção natural [adimensional]

$\beta$  = Ângulo de inclinação do condutor com a horizontal [°]

O número de *Nusselt* para a convecção natural sem correções,  $Nu_{nat}$ , é dado pela Equação (16), que depende do produto do número de *Grashof*,  $Gr$ , e do número de *Prandtl*,  $Pr$ , além dos coeficientes  $A_2$  e  $m_2$ , conforme a Tabela 4.

$$Nu_{nat} = A_2 * (Gr * Pr)^{m_2} \quad (16)$$

Onde:

$Nu_{nat}$  = Número de *Nusselt* para convecção natural [adimensional]

$Gr$  = Número de *Grashof* [adimensional]

$Pr$  = Número de *Prandtl* [adimensional]

$A_2$  e  $m_2$  = Coeficientes da Tabela 4 [adimensionais]

Tabela 4 – Coeficientes para cálculo do número de *Nusselt* para convecção natural

| (Gr * Pr) |           | $A_2$ | $m_2$ |
|-----------|-----------|-------|-------|
| De        | Até       |       |       |
| $10^{-1}$ | $10^2$    | 1,02  | 0,148 |
| $10^2$    | $10^4$    | 0,850 | 0,188 |
| $10^4$    | $10^7$    | 0,480 | 0,250 |
| $10^7$    | $10^{12}$ | 0,125 | 0,333 |

Fonte: CIGRÉ, 2014

O número de *Grashof*,  $Gr$ , é dado pela Equação (17) e leva em consideração o diâmetro externo total do condutor,  $D$ , as temperaturas na superfície do condutor,  $T_s$ , e ambiente,  $T_a$ , a aceleração gravitacional,  $g$ , a temperatura de filme,  $T_f$ , dada na Equação (4), e a viscosidade cinemática,  $\nu_f$ , dada na Equação (10).

$$Gr = \frac{D^3 * (T_s - T_a) * g}{(T_f + 273) * \nu_f^2} \quad (17)$$

Onde:

$Gr$  = Número de *Grashof* [adimensional]

$D$  = Diâmetro externo total do condutor [m]

$T_s$  = Temperatura na superfície do condutor [°C]

$T_a$  = Temperatura ambiente [°C]

$g$  = Aceleração gravitacional [ $9,807 \text{ m/s}^2$ ]

$T_f$  = Temperatura de filme [°C]

$\nu_f$  = Viscosidade cinemática [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

O número de *Prandtl*,  $Pr$ , apresentado na Equação (18), relaciona a capacidade de calor específico do ar,  $c_f$ , a viscosidade dinâmica de temperatura

de filme,  $\mu_f$ , dada na Equação (11), e a condutividade térmica de filme,  $\lambda_f$ , dada na Equação (13), sendo essa última também utilizada na Equação (14) para o cálculo da perda de calor por convecção natural.

$$Pr = \frac{c_f \cdot \mu_f}{\lambda_f} \quad (18)$$

Onde:

$Pr$  = Número de *Prandtl* [adimensional]

$c_f$  = Capacidade de calor específico do ar [ $1005 \text{ J/kg.K}$ ]

$\mu_f$  = Viscosidade dinâmica de temperatura de filme [ $\text{kg/m.s}$ ]

$\lambda_f$  = Condutividade térmica de filme [ $\text{W/K.m}$ ]

Com os valores calculados da perda de calor por convecção forçada, Equação (5), e da perda de calor por convecção natural, Equação (14), e aplicando a Equação (3), verifica-se a perda que obteve maior valor e utiliza-se essa como perda de calor por convecção,  $P_c$ .

### 2.2.2 Perda de calor por radiação – $P_r$

A perda líquida de calor por radiação de um condutor é a energia radiante total transmitida a partir da sua superfície. O modelo apontado por Cigré (2014) apresenta o cálculo de perda de calor por radiação dividido em dois componentes: o calor irradiado para o solo e os arredores, e o calor irradiado diretamente para o céu. Aplicando a lei de *Stefan-Boltzmann*, a perda de calor do condutor devido à radiação pode ser expressa conforme a Equação (19).

$$P_r = \pi * D * \sigma_B * \mathcal{F}_{c-g} * \varepsilon_s * [(T_s + 273)^4 - (T_g + 273)^4] + \pi * D * \sigma_B * \mathcal{F}_{c-sky} * \varepsilon_s * [(T_s + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4] \quad (19)$$

Onde:

$P_r$  = Perda de calor por radiação [ $\text{W/m}$ ]

$D$  = Diâmetro externo total do condutor [ $m$ ]

$\sigma_B$  = Constante de Stefan-Boltzmann [ $5,6697 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ]

$\varepsilon_s$  = Emissividade da superfície do condutor [adimensional]

$T_s$  = Temperatura na superfície do condutor [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_g$  = Temperatura do solo abaixo do condutor [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{sky}$  = Temperatura do céu acima do condutor [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\mathcal{F}_{c-g}$  = Fração de energia irradiada do condutor para o solo e arredores [adimensional]

$\mathcal{F}_{c-sky}$  = Fração de energia irradiada do condutor para o céu [adimensional]

Porém, para fins de classificação, é suficientemente aceitável igualar as temperaturas  $T_g$  e  $T_{sky}$  à temperatura ambiente,  $T_a$ , sendo essa muito mais fácil

de ser estimada ou mensurada. A Equação (20) apresenta o rearranjo da Equação (19) devido a essa simplificação.

$$P_r = \pi * D * \sigma_B * \varepsilon_s * (\mathcal{F}_{c-g} + \mathcal{F}_{c-sky}) * [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (20)$$

A soma das duas frações de energia irradiadas do condutor, tanto ao solo ( $\mathcal{F}_{c-g}$ ), quanto ao céu ( $\mathcal{F}_{c-sky}$ ), é o total da energia irradiada da superfície do condutor, que é igual a um. Assim, a Equação (21) apresenta a essa adaptação, com a forma final do equacionamento para a obtenção da perda de calor por radiação.

$$P_r = \pi * D * \sigma_B * \varepsilon_s * [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (21)$$

A emissividade,  $\varepsilon_s$ , de condutores energizados operando em alta tensão em ambientes industriais ou agrícolas pesados aumentam rapidamente com a idade, variando entre 0,2 e 0,3 quando novos, e entre 0,8 e 0,9 após um ou dois anos. Usualmente é recomendado o uso de valores entre 0,8 e 0,9 para condutores expostos ao tempo, mas também é possível encontrar condutores com tratamentos de superfície que podem apresentar valores diferentes (CIGRÉ, 2014).

### 2.2.3 Ganho de calor por aquecimento solar – $P_s$

O ganho de calor por aquecimento solar em um condutor,  $P_s$ , é diretamente proporcional ao diâmetro externo total do condutor,  $D$ , à absorvidade da superfície do condutor,  $\alpha_s$ , e à intensidade global de radiação,  $I_T$ , conforme a Equação (22).

$$P_s = \alpha_s * I_T * D \quad (22)$$

Onde:

$P_s$  = Aquecimento solar [ $W/m$ ]

$\alpha_s$  = Absortividade solar do condutor [adimensional]

$I_T$  = Intensidade de radiação solar global [ $W/m^2$ ]

$D$  = Diâmetro externo total do condutor [ $m$ ]

Os valores de absorvidade,  $\alpha_s$ , variam de 0,2 para condutores polidos novos, até cerca de 0,9 para condutores em ambientes industriais após um ano. Não é fácil mensurar a absorvidade de uma forma muito precisa, mas recomenda-se o uso de um valor-padrão não inferior a 0,8 (CIGRÉ, 2014).

A intensidade de radiação solar global,  $I_T$ , é a combinação da radiação solar difusa,  $I_B$ , da radiação solar direta,  $I_d$ , e da radiação refletida pelo solo ou albedo,  $F$ . Assim, a fórmula para o cálculo de  $I_T$  pode ser dado conforme a Equação (23).

$$I_T = I_{B(y)} * \left[ \sin(\eta) + \frac{\pi}{2} * F * \sin(H_s) \right] + I_d * \left( 1 + \frac{\pi}{2} * F \right) \quad (23)$$

Onde:

$I_T$  = Intensidade de radiação solar global  $[W/m^2]$

$I_{B(y)}$  = Intensidade de radiação solar direta ajustado para a altitude  $[W/m^2]$

$\eta$  = Ângulo de incidência do feixe solar em relação ao eixo do condutor  $[^\circ]$

$H_s$  = Altitude solar  $[^\circ]$

$F$  = Reflectância do solo (Albedo)  $[adimensional]$

$I_d$  = Intensidade de radiação solar difusa  $[W/m^2]$

Para o cálculo da intensidade de radiação solar direta ajustada para a altitude,  $I_{B(y)}$ , dado na Equação (24), deve-se primeiro calcular a intensidade de radiação solar direta ao nível do mar,  $I_{B(0)}$ , dado na Equação (25), que leva alguns outros parâmetros em conta.

$$I_{B(y)} = I_{B(0)} * \left[ 1 + 1,4 * 10^{-4} * y * \left( \frac{1367}{I_{B(0)}} - 1 \right) \right] \quad (24)$$

Onde:

$I_{B(y)}$  = Intensidade de radiação solar direta ajustado para a altitude  $[W/m^2]$

$I_{B(0)}$  = Intensidade de radiação solar direta ao nível do mar  $[W/m^2]$

$y$  = Altitude acima do nível do mar  $[m]$

$$I_{B(0)} = N_s * \left[ \frac{1280 * \sin(H_s)}{\sin(H_s) + 0,314} \right] \quad (25)$$

Onde:

$I_{B(0)}$  = Intensidade de radiação solar direta ao nível do mar  $[W/m^2]$

$N_s$  = Clareza da atmosfera  $[adimensional]$

$H_s$  = Altitude solar  $[^\circ]$

A clareza da atmosfera,  $N_s$ , apresenta valores de  $N_s = 0$  para nuvens grossas,  $N_s = 0,5$  para atmosfera industrial e  $N_s = 1$  para céu limpo, numa atmosfera padrão. A altitude solar,  $H_s$ , é apresentada na Equação (26), e leva em conta a latitude,  $\varphi$ , o ângulo de inclinação solar,  $\delta_s$ , dado na Equação (27), e a hora ângulo do sol,  $Z$ , dada na Equação (28).

$$H_s = \arcsin[\sin(\varphi) * \sin(\delta_s) + \cos(\varphi) * \cos(\delta_s) * \cos(Z)] \quad (26)$$

Onde:

$H_s$  = Altitude solar  $[^\circ]$

$\varphi$  = Latitude [°]  
 $\delta_s$  = Ângulo de inclinação solar [°]  
 $Z$  = Hora ângulo do sol [°]

$$\delta_s = 23,4 * \sin \left[ \frac{2 * \pi * (284 + N)}{365} \right] \quad (27)$$

Onde:

$\delta_s$  = Ângulo de inclinação solar [°]  
 $N$  = Dia do ano (1º de janeiro = 1) [adimensional]

$$Z = 15 * (12 - H) \quad (28)$$

Onde:

$Z$  = Hora ângulo do sol [°]  
 $H$  = Hora do dia (0~24) [adimensional]

Há uma relação entre a radiação direta,  $I_B$ , e a radiação difusa,  $I_d$ , já que as nuvens causam uma redução em  $I_B$  e um aumento em  $I_d$ . Cigré (2014) aponta uma equação para calcular a radiação difusa, conforme a Equação (29).

$$I_d = (430,5 - 0,3288 * I_{B(y)}) * \sin(H_s) \quad (29)$$

Onde:

$I_d$  = Intensidade de radiação solar difusa [ $W/m^2$ ]  
 $I_{B(y)}$  = Intensidade de radiação solar direta ajustado para a altitude [ $W/m^2$ ]  
 $H_s$  = Altitude solar [°]

Outra variável utilizada na Equação (23) refere-se ao ângulo de incidência do feixe solar em relação ao eixo do condutor,  $\eta$ , dado na Equação (30), que leva em conta a altitude solar,  $H_s$ , o azimute da linha,  $\gamma_c$ , e o azimute do sol,  $\gamma_s$ , dado na Equação (31).

$$\eta = \arccos[\cos(H_s) * \cos(\gamma_s - \gamma_c)] \quad (30)$$

Onde:

$\eta$  = Ângulo de incidência do feixe solar em relação ao eixo do condutor [°]  
 $H_s$  = Altitude solar [°]  
 $\gamma_s$  = Azimute do sol [°]  
 $\gamma_c$  = Azimute da linha [°]

$$\gamma_s = \arcsin \left[ \frac{\cos(\delta_s) * \sin(Z)}{\cos(H_s)} \right] \quad (31)$$

Onde:

$\gamma_s$  = Azimute do sol [°]  
 $\delta_s$  = Ângulo de inclinação solar [°]  
 $Z$  = Hora ângulo do sol [°]  
 $H_s$  = Altitude solar [°]

Assim, é possível obter todos os parâmetros necessários para o cálculo do ganho de calor por aquecimento solar em um condutor,  $P_s$ , com as Equações (22) a (31).

#### 2.2.4 Ganho de calor por aquecimento Joule – $P_j$

O aquecimento *Joule* refere-se à energia gerada pelo fluxo de corrente através do condutor. Ele leva em consideração a resistência em corrente contínua e o “efeito *skin*”, devido ao aumento da densidade de corrente para a superfície do condutor, quando utilizado em correntes alternadas (CIGRÉ, 2014).

Na Equação (32) verifica-se a expressão necessária para o cálculo do calor gerado pelo aquecimento *Joule*.

$$P_j = I^2 * R_{ac}(T_s) \quad (32)$$

Onde:

$P_j$  = Aquecimento Joule [ $W/m$ ]

$I$  = Ampacidade / Corrente no condutor [ $A$ ]

$R_{ac}(T_s)$  = Resistência elétrica AC na temperatura do condutor [ $\Omega$ ]

A fim de considerar o efeito “*skin*” nos condutores, a grande maioria dos fabricantes apresenta em seus catálogos os valores de resistência AC,  $R_{ac}$ , que consideram, em alguns casos, além do efeito “*skin*”, os efeitos magnéticos causados em condutores com núcleo ferroso sob corrente alternada. Na Equação (32) utiliza-se um valor de resistência AC que leva em conta a temperatura no condutor,  $T_s$ , haja vista que a resistência elétrica aumenta com a temperatura e os valores encontrados em catálogos são para uma determinada temperatura. Conforme Cigré (2014), uma boa aproximação para a temperatura desejada pode ser obtida por interpolação linear, como verifica-se na Equação (33), na qual tem-se dois valores de resistência AC em diferentes temperaturas conhecidas e, juntamente com a temperatura no condutor,  $T_s$ , chega-se ao valor corrigido para a temperatura desejada.

$$R_{ac}(T_s) = R_{ac}(T_1) + (T_s - T_1) * \left( \frac{R_{ac}(T_2) - R_{ac}(T_1)}{T_2 - T_1} \right) \quad (33)$$

Onde:

$R_{ac}(T_s)$  = Resistência elétrica AC na temperatura do condutor [ $\Omega$ ]

$R_{ac}(T_1)$  = Resistência elétrica AC na temperatura  $T_1$  [ $\Omega$ ]

$R_{ac}(T_2)$  = Resistência elétrica AC na temperatura  $T_2$  [ $\Omega$ ]

$T_s$  = Temperatura na superfície do condutor [ $^{\circ}C$ ]

$T_1$  = Temperatura  $T_1$  [ $^{\circ}C$ ]

$T_2$  = Temperatura  $T_2$  [ $^{\circ}C$ ], onde  $T_1 < T_2$

Outro valor necessário para se calcular o aquecimento Joule é a corrente no condutor,  $I$ . Essa variável influencia de forma quadrática na Equação (32). Ela é obtida aplicando-se a equação do balanço térmico, já apresentado na Equação (2) que, rearranjada, é apresentada na Equação (34). O valor encontrado pelo cálculo dessa equação é justamente a AMPACIDADE.

$$I = \sqrt{\frac{P_r + P_c - P_s}{R_{ac}(T_s)}} \quad (34)$$

Onde:

$I$  = Ampacidade / Corrente no condutor [A]

$P_r$  = Resfriamento por radiação [ $W/m$ ]

$P_c$  = Resfriamento por convecção [ $W/m$ ]

$P_s$  = Aquecimento solar [ $W/m$ ]

$R_{ac}(T_s)$  = Resistência elétrica AC na temperatura do condutor [ $\Omega$ ]

## 2.3 EQUAÇÕES DO MÉTODO IEEE

As componentes das equações apresentadas nesta seção podem ter sofrido alguma alteração na sua simbologia, quando comparadas com a literatura original, em IEEE (2012b), promovendo o maior intercâmbio de informações entre os métodos, facilitando as suas comparações.

### 2.3.1 Perda de calor por convecção – $P_c$

Assim como no método CIGRÉ, no método IEEE a perda de calor por convecção também é dividida em dois tipos: natural e forçada. A Equação (35) apresenta a fórmula para a obtenção da perda de calor por convecção. Nota-se que a perda será o maior valor entre três calculados, sendo  $P_{c1}$  e  $P_{c2}$  as perdas de calor por convecção forçada, e  $P_{c,nat}$  as perdas de calor por convecção natural.

$$P_c = \max(P_{c1}; P_{c2}; P_{c,nat}) \quad (35)$$

Onde:

$P_c$  = Resfriamento por convecção [ $W/m$ ]

$P_{c1}$  = Resfriamento por convecção forçada 1 [ $W/m$ ]

$P_{c2}$  = Resfriamento por convecção forçada 2 [ $W/m$ ]

$P_{c,nat}$  = Resfriamento por convecção natural [ $W/m$ ]

Os cálculos para perda de calor por convecção pelo método IEEE utilizam-se de algumas equações já apresentadas e utilizadas pelo método CIGRÉ, como

é o caso da temperatura de filme,  $T_f$ , dada na Equação (4), a condutividade térmica de filme,  $\lambda_f$ , dada na Equação (13), e a densidade do ar local,  $\gamma$ , dada na Equação (12).

**a) Perda de calor por convecção forçada -  $P_{c1}$  e  $P_{c2}$**

O método de cálculo da perda de calor por convecção forçada apresentado por IEEE (2012b) compreende de duas equações, sendo elas a  $P_{c1}$  dada na Equação (36), e a  $P_{c2}$  dada na Equação (37). A primeira é correta para ventos fracos, mas subestimada para ventos fortes, ao passo que a segunda é correta para ventos fortes, mas subestimada para ventos fracos. Com qualquer velocidade de vento, recomenda-se calcular a perda de calor por convecção com ambas as equações e usar a maior das duas.

$$P_{c1} = K_{angle} * [1,01 + 1,35 * Re^{0,52}] * \lambda_f * (T_s - T_a) \quad (36)$$

Onde:

$P_{c1}$  = Resfriamento por convecção forçada 1 [ $W/m$ ]

$K_{angle}$  = Fator de direção do vento [adimensional]

$Re$  = Número de Reynolds [adimensional]

$\lambda_f$  = Condutividade térmica de filme [ $W/K.m$ ]

$T_s$  = Temperatura na superfície do condutor [ $^{\circ}C$ ]

$T_a$  = Temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]

$$P_{c2} = K_{angle} * 0,754 * Re^{0,6} * \lambda_f * (T_s - T_a) \quad (37)$$

Onde:

$P_{c2}$  = Resfriamento por convecção forçada 2 [ $W/m$ ]

$K_{angle}$  = Fator de direção do vento [adimensional]

$Re$  = Número de Reynolds [adimensional]

$\lambda_f$  = Condutividade térmica de filme [ $W/K.m$ ]

$T_s$  = Temperatura na superfície do condutor [ $^{\circ}C$ ]

$T_a$  = Temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]

A variável  $K_{angle}$ , que é o fator de direção do vento, pondera o ângulo de ataque do vento no condutor, é apresentado na Equação (38).

$$K_{angle} = 1,194 - \cos(\delta) + 0,194 * \cos(2\delta) + 0,368 * \sin(2\delta) \quad (38)$$

Onde:

$K_{angle}$  = Fator de direção do vento [adimensional]

$\delta$  = Ângulo de ataque do vento [ $^{\circ}$ ]

O número de *Reynolds*,  $Re$ , assim como no método CIGRÉ, determina o regime de fluxo, relacionando a proporção das forças de inércia pelas forças viscosas no fluido, e sua fórmula é apresentado na Equação (39).

$$Re = \frac{V * D * \gamma}{\mu_f} \quad (39)$$

Onde:

$Re$  = Número de Reynolds [adimensional]

$V$  = Velocidade do vento [ $m/s$ ]

$D$  = Diâmetro externo total do condutor [ $m$ ]

$\gamma$  = Densidade do ar local [ $kg/m^3$ ]

$\mu_f$  = Viscosidade dinâmica de temperatura de filme [ $kg/m.s$ ]

A viscosidade dinâmica de temperatura de filme,  $\mu_f$ , dada na Equação (40), é determinada em função da temperatura de filme,  $T_f$ .

$$\mu_f = \frac{1,458 * 10^{-6} * (T_f + 273)^{1,5}}{T_f + 383,4} \quad (40)$$

Onde:

$\mu_f$  = Viscosidade dinâmica de temperatura de filme [ $kg/m.s$ ]

$T_f$  = Temperatura de filme [ $^{\circ}C$ ]

#### b) Perda de calor por convecção natural - $P_{c,nat}$

Para o cálculo da perda de calor por convecção natural,  $P_{c,nat}$ , dada na Equação (41), utiliza-se o diâmetro externo total do condutor,  $D$ , as temperaturas na superfície do condutor,  $T_s$ , e temperatura ambiente,  $T_a$ , assim como a densidade do ar local,  $\gamma$ , já apresentado na Equação (12).

$$P_{c,nat} = 3,645 * \gamma * D^{0,75} * (T_s - T_a)^{1,25} \quad (41)$$

Onde:

$P_{c,nat}$  = Resfriamento por convecção natural [ $W/m$ ]

$\gamma$  = Densidade do ar local [ $kg/m^3$ ]

$D$  = Diâmetro externo total do condutor [ $m$ ]

$T_s$  = Temperatura na superfície do condutor [ $^{\circ}C$ ]

$T_a$  = Temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]

Assim, tem-se todas as equações necessárias para o cálculo da perda de calor por convecção,  $P_c$ , sendo essa a maior das três calculadas:  $P_{c1}$  (Equação (36)),  $P_{c2}$  (Equação (37)) e  $P_{c,nat}$  (Equação (41)).

#### 2.3.2 Perda de calor por radiação – $P_r$

De acordo com IEEE (2012b), quando um condutor que está exposto diretamente ao ambiente é aquecido acima da temperatura ao seu redor, uma certa quantidade de energia é transmitida para o ambiente por meio de radiação. A taxa com que essa energia é irradiada depende principalmente da diferença

de temperatura entre o condutor e seus arredores, que se supõe que estão à temperatura ambiente. A condição de superfície do condutor, sua emissividade  $\varepsilon_s$ , bem como seu diâmetro externo total,  $D$ , também afetam a transferência de calor por radiação. Esse fenômeno é descrito pela lei *Stefan-Boltzmann*, que relaciona a transmissão de energia radiante com a diferença entre a temperatura da superfície do condutor,  $T_s$ , e a temperatura ambiente,  $T_a$ , expressa em graus absolutos (Kelvin) para a quarta potência. As constantes nas Equações (42) incluem a constante *Stefan-Boltzmann* e fatores de conversão para produzir um resultado nas unidades desejadas.

$$P_r = 17,8 * D * \varepsilon_s * \left[ \left( \frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (42)$$

Onde:

$P_r$  = Resfriamento por radiação [ $W/m$ ]

$D$  = Diâmetro externo total do condutor [ $m$ ]

$\varepsilon_s$  = Emissividade da superfície do condutor [*adimensional*]

$T_s$  = Temperatura na superfície do condutor [ $^{\circ}C$ ]

$T_a$  = Temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]

### 2.3.3 Ganho de calor por aquecimento solar – $P_s$

O sol fornece energia térmica ao condutor. A quantidade de energia de calor solar entregue ao condutor depende da absorvidade solar do condutor,  $\alpha_s$ , do diâmetro externo do condutor,  $D$ , do ângulo de incidência do feixe solar em relação ao eixo do condutor,  $\eta$ , e da intensidade de radiação solar global ajustada para a altitude,  $I_{T(y)}$ , conforme verifica-se na Equação (43).

$$P_s = \alpha_s * I_{T(y)} * \sin(\eta) * D \quad (43)$$

Onde:

$P_s$  = Aquecimento solar [ $W/m$ ]

$\alpha_s$  = Absorvidade solar do condutor [*adimensional*]

$I_{T(y)}$  = Intensidade de radiação solar global ajustada para altitude [ $W/m^2$ ]

$\eta$  = Ângulo de incidência do feixe solar em relação ao eixo do condutor [ $^{\circ}$ ]

$D$  = Diâmetro externo total do condutor [ $m$ ]

A intensidade de radiação solar global pode ser obtida por meio de atlas solarimétricos desenvolvidos por institutos de pesquisa na área, porém o método IEEE traz uma série de equações para o cálculo dessa variável. A intensidade de radiação solar global ajustada para a altitude,  $I_{T(y)}$ , dada na Equação (44), é obtida por meio do cálculo da intensidade de radiação solar global ao nível do mar,  $I_{T(0)}$ , dado na Equação (45), ponderado pelo coeficiente de correção de

altitude,  $K_{solar}$ , dado na Equação (46). A Equação (45) utiliza ainda os dados da Tabela 5 na obtenção dos coeficientes  $Aa$  a  $Ga$ , com base na clareza da atmosfera.

$$I_{T(y)} = I_{T(0)} * K_{solar} \quad (44)$$

Onde:

$I_{T(y)}$  = Intensidade de radiação solar global ajustada para altitude  $[W/m^2]$

$I_{T(0)}$  = Intensidade de radiação solar global ao nível do mar  $[W/m^2]$

$K_{solar}$  = Coeficiente de correção de altitude [adimensional]

$$I_{T(0)} = Aa + Ba * H_s + Ca * H_s^2 + Da * H_s^3 + Ea * H_s^4 + Fa * H_s^5 + Ga * H_s^6 \quad (45)$$

Onde:

$I_{T(0)}$  = Intensidade de radiação solar global ao nível do mar  $[W/m^2]$

$H_s$  = Altitude solar  $[^\circ]$

$Aa \dots Ga$  = Coeficientes do polinômio conforme Tabela 6 [adimensional]

Tabela 5 – Coeficientes para cálculo da intensidade de radiação global ao nível do mar

| Coeficiente | Atmosfera Limpa      | Atmosfera Industrial |
|-------------|----------------------|----------------------|
| $Aa$        | -42,2391             | 53,1821              |
| $Ba$        | 63,8044              | 14,2110              |
| $Ca$        | -1,9220              | $6,6138 * 10^{-1}$   |
| $Da$        | $3,46921 * 10^{-2}$  | $-3,1658 * 10^{-2}$  |
| $Ea$        | $-3,61118 * 10^{-4}$ | $5,4654 * 10^{-4}$   |
| $Fa$        | $1,94318 * 10^{-6}$  | $-4,3446 * 10^{-6}$  |
| $Ga$        | $-4,07608 * 10^{-9}$ | $1,3236 * 10^{-8}$   |

Fonte: IEEE, 2012b

$$K_{solar} = 1 + 1,148 * 10^{-4} * y - 1,108 * 10^{-8} * y^2 \quad (46)$$

Onde:

$K_{solar}$  = Coeficiente de correção de altitude [adimensional]

$y$  = Altitude acima do nível do mar [m]

A altitude solar,  $H_s$ , dada na Equação (47), é calculado com base na latitude,  $\varphi$ , em que se encontra o condutor, do ângulo de inclinação solar,  $\delta_s$ , dado na Equação (48), e da hora ângulo do sol,  $Z$ , dada na Equação (49).

$$H_s = \arcsin[\sin(\varphi) * \sin(\delta_s) + \cos(\varphi) * \cos(\delta_s) * \cos(Z)] \quad (47)$$

Onde:

$H_s$  = Altitude solar  $[^\circ]$

$\varphi$  = Latitude  $[^\circ]$

$\delta_s$  = Ângulo de inclinação solar  $[^\circ]$

$Z$  = Hora ângulo do sol  $[^\circ]$

$$\delta_s = 23,46 * \sin\left[\frac{(284+N)}{365} * 360\right] \quad (48)$$

Onde:

$\delta_s$  = Ângulo de inclinação solar  $[^\circ]$

$N$  = Dia do ano (1º de janeiro = 1) [adimensional]

$$Z = 15 * (12 - H) \quad (49)$$

Onde:

$Z$  = Hora ângulo do sol [°]

$H$  = Hora do dia (0~24) [adimensional]

O ângulo de incidência do feixe solar em relação ao eixo do condutor,  $\eta$ , que também é utilizado na Equação (43), é apresentado na Equação (50). Seu cálculo leva em conta a altitude solar,  $H_s$ , o azimute do sol,  $\gamma_s$ , dado na Equação (51), e o azimute de linha,  $\gamma_c$ . A Tabela 6 é utilizada para se determinar a constante  $C$  na Equação (51), com base no valor da hora ângulo do sol,  $Z$ , e da variável do azimute solar,  $\chi$ , dado na Equação (52).

$$\eta = \arccos[\cos(H_s) * \cos(\gamma_s - \gamma_c)] \quad (50)$$

Onde:

$\eta$  = Ângulo de incidência do feixe solar em relação ao eixo do condutor [°]

$H_s$  = Altitude solar [°]

$\gamma_s$  = Azimute do sol [°]

$\gamma_c$  = Azimute da linha [°]

$$\gamma_s = C + \arctan(\chi) \quad (51)$$

Onde:

$\gamma_s$  = Azimute do sol [°]

$\chi$  = Variável do azimute solar [adimensional]

$C$  = Constante do azimute solar conforme Tabela 5 [°]

| Tabela 6 – Constantes para cálculo do azimute do sol |                         |                      |  |
|--|-------------------------|----------------------|--|
| $Z$ [°]  | $C$ [°] $p/\chi \geq 0$ | $C$ [°] $p/\chi < 0$ |  |
| $-180 \leq Z < 0$                                    | 0                       | 180                  |  |
| $0 \leq Z < 180$                                     | 180                     | 360                  |  |

Fonte: IEEE, 2012b

$$\chi = \frac{\sin(Z)}{\sin(\varphi) * \cos(Z) - \cos(\varphi) * \tan(\delta_s)} \quad (52)$$

Onde:

$\chi$  = Variável do azimute solar [adimensional]

$Z$  = Hora ângulo do sol [°]

$\varphi$  = Latitude [°]

$\delta_s$  = Ângulo de inclinação solar [°]

Dessa forma, com o uso das Equações (43) a (52) é possível calcular o ganho de calor por aquecimento solar,  $P_s$ .

### 2.3.4 Ganho de calor por aquecimento *Joule* – $P_j$

O calor gerado por aquecimento *Joule*,  $P_j$ , no método IEEE, é calculado da mesma maneira que o apresentado no método CIGRÉ, pela Equação (32), como pode ser verificado na Equação (53).

$$P_j = I^2 * R_{ac}(T_s) \quad (53)$$

Onde:

$P_j$  = Aquecimento Joule [ $W/m$ ]

$I$  = Ampacidade / Corrente no condutor [ $A$ ]

$R_{ac}(T_s)$  = Resistência elétrica AC na temperatura do condutor [ $\Omega$ ]

IEEE (2012b) também considera o uso da resistência elétrica AC,  $R_{ac}$ , como forma de considerar o efeito “*skin*”, em conjunto com a correção dessa resistência elétrica em função da temperatura no condutor, com a mesma expressão já apresentada no método CIGRÉ, na Equação (33), por meio da interpolação linear utilizando-se de dois valores de resistência elétrica, sendo uma em temperatura “baixa”,  $T_1$ , e outra em temperatura “alta”,  $T_2$ , de forma que a temperatura do condutor,  $T_s$ , esteja entre essas duas temperaturas ou muito próximas a elas.

Com o uso da resistência elétrica AC na temperatura do condutor,  $R_{ac}(T_s)$ , e os demais valores de energia perdidas ou ganhas pelo condutor ( $P_c$ ,  $P_r$  e  $P_s$ ), utilizando-se da Equação (2), do balanço térmico, é possível se calcular a máxima corrente suportada pelo condutor,  $I$ , de acordo com as condições dadas, conforme a Equação (54).

$$I = \sqrt{\frac{P_r + P_c - P_s}{R_{ac}(T_s)}} \quad (54)$$

Onde:

$I$  = Ampacidade / Corrente no condutor [ $A$ ]

$P_r$  = Resfriamento por radiação [ $W/m$ ]

$P_c$  = Resfriamento por convecção [ $W/m$ ]

$P_s$  = Aquecimento solar [ $W/m$ ]

$R_{ac}(T_s)$  = Resistência elétrica AC na temperatura do condutor [ $\Omega$ ]

## 2.4 PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE OS DOIS MÉTODOS

Ao analisar as inúmeras equações apresentadas na subseção anterior, certifica-se que ambos os métodos apresentam o mesmo princípio do balanço térmico. As equações finais de cada etapa são praticamente idênticas. As

diferenças existentes nos dois métodos estão concentradas nas etapas de cálculo de ganho de calor por aquecimento solar ( $P_s$ ) e perda de calor por convecção ( $P_c$ ).

Em  $P_s$ , o método CIGRÉ utiliza a composição da radiação solar direta e difusa para calcular o nível de radiação solar global, enquanto o método IEEE utiliza apenas a parcela de radiação solar direta.

Para  $P_c$  a diferença maior encontra-se no cálculo da convecção forçada. O método IEEE utiliza apenas o número de *Reynolds* para os equacionamentos envolvendo o vento. Já CIGRÉ utiliza, além do número de *Reynolds*, o número de *Nusselt*, que é o coeficiente adimensional de transferência de calor por convecção, dando um aproveitamento maior para situações com ventos mais intensos.

No capítulo 4 serão verificadas com maior profundidade essas diferenças.

### 3. VALIDAÇÃO DAS ROTINAS COMPUTACIONAIS

Os resultados apresentados neste capítulo são oriundos da execução das equações que cada método aponta. Foram desenvolvidas rotinas em *MATLAB* de forma a aplicar essas equações. Tanto o método CIGRÉ quanto o método IEEE, por meio de suas publicações, trazem exemplos numéricos, com os quais é possível verificar a aplicação das equações e validar as rotinas executadas no software de cálculo computacional.

#### 3.1 VALIDAÇÃO DA ROTINA DO MÉTODO CIGRÉ

O guia de Cigré (2014), em seu Anexo E – Exemplos de Cálculos, no item E.1 – Cálculo térmico para regime permanente, traz dois exemplos de cálculos de ampacidade de regime permanente para o condutor CAA “Drake” 26/7 à temperatura de 100°C. A Tabela 7 apresenta os parâmetros de entrada para a resolução das equações.

Tabela 7 – Parâmetros de entrada para exemplo do método CIGRÉ

| <i>Parâmetro</i>                                      | <i>Valor Exemplo A</i>        | <i>Valor Exemplo B</i>            | <i>Unidade</i> |
|---|-------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| <b>Características do condutor – CAA “Drake” 26/7</b> |                               |                                   |                |
| Diâmetro externo do condutor                          | 28,1                          | 28,1                              | mm             |
| Diâmetro do núcleo                                    | 10,4                          | 10,4                              | mm             |
| Diâmetro cada fio externo                             | 4,44                          | 4,44                              | mm             |
| Temperatura máxima no condutor                        | 100                           | 100                               | °C             |
| Emissividade  | 0,8                           | 0,9                               | Adimensional   |
| Absortividade   | 0,8                           | 0,9                               | Adimensional   |
| Resistência ac @ T1                                   | $7,283 * 10^{-5}$             | $7,283 * 10^{-5}$                 | $\Omega/m$     |
| Resistência ac @ T2                                   | $8,688 * 10^{-5}$             | $8,688 * 10^{-5}$                 | $\Omega/m$     |
| <b>Condições do ambiente</b>                          |                               |                                   |                |
| Temperatura ambiente                                  | 40                            | 20                                | °C             |
| Velocidade do vento                                   | 0,61                          | 1,66                              | m/s            |
| Ângulo de ataque do vento                             | 60                            | 80                                | °              |
| Inclinação do condutor c/ horizonte*                  | 0                             | 10                                | °              |
| Altitude  | 0                             | 500                               | m              |
| <b>Condições solares</b>                              |                               |                                   |                |
| Azimute do condutor                                   | 90 ( <i>leste – oeste</i> )   | 0 ( <i>norte – sul</i> )          | °              |
| Latitude  | 30                            | 50                                | °              |
| Clareza da Atmosfera                                  | <i>Limpo</i> ( $N_s = 1$ )    | <i>Industrial</i> ( $N_s = 0,5$ ) | Adimensional   |
| Dia do Ano  | 10 <i>de junho</i>            | 3 <i>de outubro</i>               | Adimensional   |
| Hora  | 11 <i>AM</i>                  | 2 <i>PM</i>                       | Adimensional   |
| Reflectância do Solo*                                 | <i>Floresta</i> ( $F = 0,1$ ) | <i>Urbano</i> ( $F = 0,15$ )      | Adimensional   |

Fonte: CIGRÉ, 2014

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos por meio da execução da rotina em *MATLAB* para o método CIGRÉ, para os exemplos A e B, conforme os parâmetros de entrada apresentados na Tabela 7.

Tabela 8 – Resultados, pelo método CIGRÉ, dos exemplos A e B para cálculo de corrente

| <i>Parâmetro</i>  | <i>Valor Exemplo A</i>                           | <i>Valor Exemplo B</i>                           | <i>Unidades</i>   |
|---|--|--|-------------------|
| <b>Perda de Calor por Convecção - <math>P_c</math></b>  |  |  |                   |
| $T_f$ = Temperatura de filme  | 70   | 60   | °C                |
| $\lambda_f$ = Condutividade térmica de filme  | 0,0286   | 0,0279   | W/K.m             |
| $\gamma$ = Densidade do ar local  | 1,0287   | 0,9985   | kg/m <sup>3</sup> |
| $\mu_f$ = Viscosidade dinâmica de temperatura de filme  | $2,0384 * 10^{-5}$                               | $1,9947 * 10^{-5}$                               | kg/m.s            |
| $\nu_f$ = Viscosidade cinemática  | $1,9815 * 10^{-5}$                               | $1,9977 * 10^{-5}$                               | m <sup>2</sup> /s |
| $R_s$ = Rugosidade superficial do condutor  | 0,0938   | 0,0938   | Adimensional      |
| $Re$ = Número de Reynolds   | 865  | 2335   | Adimensional      |
| $B_1$ e $n$ = Coeficientes para cálculo do número de <i>Nusselt</i> de 90°                          | $B_1 = 0,641$ e<br>$n = 0,471$                   | $B_1 = 0,641$ e<br>$n = 0,471$                   | Adimensional      |
| $Nu_{90}$ = Número de <i>Nusselt</i> de 90°   | 15,495   | 24,73  | Adimensional      |
| $A_1$ , $B_2$ e $m_1$ = Coeficientes para cálculo do número de <i>Nusselt</i> em função de $\delta$ | $A_1 = 0,42$ ,<br>$B_2 = 0,58$ e<br>$m_1 = 0,90$ | $A_1 = 0,42$ ,<br>$B_2 = 0,58$ e<br>$m_1 = 0,90$ | Adimensional      |
| $Nu_\delta$ = Número de <i>Nusselt</i> em função de $\delta$  | 14,4   | 24,53  | Adimensional      |
| $P_{c,forced}$ = Resfriamento por convecção forçada   | 77,6   | 172,1  | W/m               |
| $Gr$ = Número de <i>Grashof</i>   | $9,695 * 10^4$                                   | $1,31 * 10^5$                                    | Adimensional      |
| $Pr$ = Número de <i>Prandtl</i>   | 0,716  | 0,718  | Adimensional      |
| $A_2$ e $m_2$ = Coeficientes para cálculo do número de <i>Nusselt</i> para convecção natural        | $A_2 = 0,48$ e<br>$m_2 = 0,25$                   | $A_2 = 0,48$ e<br>$m_2 = 0,25$                   | Adimensional      |
| $Nu_{nat}$ = Número de <i>Nusselt</i> para convecção natural  | 7,7916   | 8,41   | Adimensional      |
| $Nu_\beta$ = Número de <i>Nusselt</i> para convecção natural em função de $\beta$                   | 7,7916   | 8,39   | Adimensional      |
| $P_{c,nat}$ = Resfriamento por convecção natural  | 42,0   | 58,9   | W/m               |
| $P_c$ = Resfriamento por convecção  | 77,6   | 172,1  | W/m               |
| <b>Perda de Calor por Radiação - <math>P_r</math></b>   |  |  |                   |
| $P_r$ = Resfriamento por radiação   | 39,1   | 54,0   | W/m               |
| <b>Ganho de Calor por Aquecimento Solar - <math>P_s</math></b>                                      |  |  |                   |
| $\delta_s$ = Ângulo de inclinação solar   | 23   | -5   | °                 |
| $Z$ = Hora ângulo do sol  | 165  | -30  | °                 |
| $H_s$ = Altitude solar  | 75   | 29,2   | °                 |
| $\gamma_s$ = Azimute do sol   | 65,85  | 34,8   | °                 |
| $\eta$ = Ângulo de incidência do feixe solar em relação ao eixo do condutor                         | 76,2   | 44,2   | °                 |

Tabela 8 – Resultados, pelo método CIGRÉ, dos exemplos A e B para cálculo de corrente (conclusão)

| <b>Parâmetro</b>   | <b>Valor Exemplo A</b> | <b>Valor Exemplo B</b> | <b>Unidades</b> |
|--|------------------------|------------------------|-----------------|
| <b>Ganho de Calor por Aquecimento Solar - <math>P_s</math></b>             |                        |                        |                 |
| $I_{B(0)}$ = Intensidade de radiação solar direta ao nível do mar          | 965,8                  | 389,4                  | $W/m^2$         |
| $I_{B(y)}$ = Intensidade de radiação solar direta ajustado para a altitude | 965,8                  | 457,8                  | $W/m^2$         |
| $I_d$ = Intensidade de radiação solar difusa                               | 109                    | 136,6                  | $W/m^2$         |
| $I_T$ = Intensidade de radiação solar global                               | 1210                   | 540,6                  | $W/m^2$         |
| $P_s$ = Aquecimento solar  | 27,2                   | 13,7                   | $W/m$           |
| <b>Cálculo de Ampacidade – <math>I</math></b>                              |                        |                        |                 |
| $R_{ac}(T_s)$ = Resistência elétrica AC na temperatura do condutor         | $9,3905 * 10^{-5}$     | $9,3905 * 10^{-5}$     | $\Omega/m$      |
| $I$ = Ampacidade / Corrente no condutor                                    | 976                    | 1504                   | A               |

Fonte: Autor

O item E.2 – Temperatura do condutor para regime permanente, do Anexo E de Cigré (2014) exemplifica os cálculos para verificação da temperatura do condutor, utilizando-se dos mesmos parâmetros apresentados na Tabela 7, exceto para a temperatura no condutor ( $T_s$ ), cujo valor é o objetivo deste cálculo. Porém, é necessário a informação da corrente que circula pelo condutor que, segundo o exemplo, são os mesmos valores encontrados e apresentados na Tabela 8, de  $I = 976A$  e  $I = 1504A$  para os exemplos A e B, respectivamente. Por se tratar de um processo iterativo, é necessário ainda um valor inicial de temperatura no condutor ( $T_{si}$ ), que é de  $85^\circ C$ . Conforme o fluxograma apresentado na Figura 3, neste processo são calculados os valores das componentes da equação do balanço térmico, dada a temperatura inicial, e verifica-se se o balanço foi atingido (*calor ganho + calor perdido = 0*). Em caso positivo, o processo encerra-se e a temperatura utilizada nos cálculos é a temperatura no condutor ( $T_s$ ). Caso o balanço não tenha sido atingido, faz-se o incremento da temperatura de teste, para um resultado positivo do balanço, ou um decréscimo da temperatura de teste para um resultado negativo do balanço. A Tabela 9 apresenta os valores dos passos iniciais e finais do processo.

Tabela 9 – Resultados, pelo método CIGRÉ, dos exemplos A e B para cálculo de temperatura

| <b>Passo</b>               | <b>Descrição</b>                | <b>Exemplo A</b>       | <b>Exemplo B</b>         | <b>Unidades</b> |
|----------------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------|
| 1º<br>$T_s = 85^\circ C$   | $P_c; P_r; P_s; P_j$            | 58,2; 27,3; 27,2; 85,4 | 139,9; 40,8; 13,7; 202,9 | $W/m$           |
|                            | $P_s + P_j - P_c - P_r$         | 27,1 (> 0)             | 35,9 (> 0)               | $W/m$           |
|                            | $T_s = T_s + 1$                 | 86                     | 86                       | $^\circ C$      |
| 2º<br>$T_s = 86^\circ C$   | $P_c; P_r; P_s; P_j$            | 59,5; 28,1; 27,2; 85,7 | 142,0; 41,6; 13,7; 203,5 | $W/m$           |
|                            | $P_s + P_j - P_c - P_r$         | 25,3 (> 0)             | 33,6 (> 0)               | $W/m$           |
|                            | $T_s = T_s + 1$                 | 87                     | 87                       | $^\circ C$      |
| 3º<br>$T_s = 87^\circ C$   | $P_c; P_r; P_s; P_j$            | 60,8; 28,8; 27,2; 86,0 | 144,2; 42,4; 13,7; 204,1 | $W/m$           |
|                            | $P_s + P_j - P_c - P_r$         | 23,6 (> 0)             | 31,2 (> 0)               | $W/m$           |
|                            | $T_s = T_s + 1$                 | 88                     | 88                       | $^\circ C$      |
| ...                        |                                 |                        |                          |                 |
| 15º<br>$T_s = 99^\circ C$  | $P_c; P_r; P_s; P_j$            | 76,4; 38,2; 27,2; 89,2 | 170,0; 53,0; 13,7; 211,8 | $W/m$           |
|                            | $P_s + P_j - P_c - P_r$         | 1,8 (> 0)              | 2,5 (> 0)                | $W/m$           |
|                            | $T_s = T_s + 1$                 | 100                    | 100                      | $^\circ C$      |
| 16º<br>$T_s = 100^\circ C$ | $P_c; P_r; P_s; P_j$            | 77,7; 39,0; 27,2; 89,4 | 172,2; 54,0; 13,7; 212,4 | $W/m$           |
|                            | $P_s + P_j - P_c - P_r$         | -0,1 ( $\approx$ 0)    | -0,1 ( $\approx$ 0)      | $W/m$           |
|                            | <b>Balanco térmico atingido</b> | 100                    | 100                      | $^\circ C$      |

Fonte: Autor

Ambos processos, para cálculo da corrente ( $I$ ) e para cálculo da temperatura no condutor ( $T_s$ ), executados por meio da rotina no software de cálculo computacional, apresentaram os mesmos valores que os descritos nos exemplos E.1 e E.2 de Cigré (2014), validando assim a rotina elaborada.

### 3.2 VALIDAÇÃO DA ROTINA DO MÉTODO IEEE

A seção 4.6.1 de IEEE (2012b) apresenta um exemplo numérico para o cálculo térmico para regime permanente. Este exemplo utiliza o mesmo condutor utilizado no método CIGRÉ, CAA “Drake” 26/7, porém, com algumas condições ambientais um pouco diferente do exemplo anterior. A Tabela 10 mostra os parâmetros de entrada para a execução dos cálculos.

Tabela 10 – Parâmetros de entrada para exemplo do método IEEE, cálculo de corrente

| <b>Parâmetro</b>                                      | <b>Valor</b>                        | <b>Unidade</b> |
|---|-------------------------------------|----------------|
| <b>Características do condutor – CAA “Drake” 26/7</b> |                                     |                |
| Diâmetro externo do condutor                          | 28,14                               | mm             |
| Diâmetro do núcleo                                    | 10,4                                | mm             |
| Diâmetro cada fio externo                             | 4,44                                | mm             |
| Temperatura máxima no condutor                        | 100                                 | °C             |
| Emissividade  | 0,8                                 | Adimensional   |
| Absortividade   | 0,8                                 | Adimensional   |
| Resistência ac @ T1                                   | $7,283 * 10^{-5}$                   | $\Omega/m$     |
| Resistência ac @ T2                                   | $8,688 * 10^{-5}$                   | $\Omega/m$     |
| <b>Condições do ambiente</b>                          |                                     |                |
| Temperatura ambiente                                  | 40                                  | °C             |
| Velocidade do vento                                   | 0,61                                | m/s            |
| Ângulo de ataque do vento                             | 90                                  | °              |
| Altitude  | 0                                   | m              |
| <b>Condições solares</b>                              |                                     |                |
| Azimute do condutor                                   | 90 ( <i>leste – oeste</i> )         | °              |
| Latitude  | 30                                  | °              |
| Clareza da Atmosfera                                  | <i>Limpo (<math>N_s = 1</math>)</i> | Adimensional   |
| Dia do Ano  | <i>10 de junho</i>                  | Adimensional   |
| Hora  | <i>11 AM</i>                        | Adimensional   |

Fonte: IEEE, 2012b

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos por meio da execução da rotina em *MATLAB* para o método IEEE, conforme os parâmetros de entrada apresentados na Tabela 10.

Tabela 11 – Resultados, pelo método IEEE, para cálculo de corrente

| <b>Parâmetro</b>                                       | <b>Valor</b>      | <b>Unidades</b> |
|--|-------------------|-----------------|
| <b>Perda de Calor por Convecção - <math>P_c</math></b> |                   |                 |
| $T_f$ = Temperatura de filme                           | 70                | °C              |
| $\lambda_f$ = Condutividade térmica de filme           | 0,0294            | $W/K.m$         |
| $\gamma$ = Densidade do ar local                       | 1,0287            | $kg/m^3$        |
| $\mu_f$ = Viscosidade dinâmica de temperatura de filme | $2,043 * 10^{-5}$ | $kg/m.s$        |
| $P_{c,nat}$ = Resfriamento por convecção natural       | 4,4               | $W/m$           |
| $Re$ = Número de Reynolds                              | 865               | Adimensional    |
| $K_{angte}$ = Fator de direção do vento                | 1                 | Adimensional    |
| $P_{c1}$ = Resfriamento por convecção forçada 1        | 81,9              | $W/m$           |
| $P_{c2}$ = Resfriamento por convecção forçada 2        | 77,0              | $W/m$           |
| $P_c$ = Resfriamento por convecção                     | 81,9              | $W/m$           |

Tabela 11 – Resultados, pelo método IEEE, para cálculo de corrente (conclusão)

| <b>Parâmetro</b>  | <b>Valor</b>     | <b>Unidades</b> |
|---|------------------|-----------------|
| <b>Perda de Calor por Radiação - <math>P_r</math></b>                       |                  |                 |
| $P_r$ = Resfriamento por radiação   | 70               | $W/m$           |
| <b>Ganho de Calor por Aquecimento Solar - <math>P_s</math></b>              |                  |                 |
| $\delta_s$ = Ângulo de inclinação solar                                     | 23               | °               |
| $Z$ = Hora ângulo do sol  | -15              | °               |
| $H_s$ = Altitude solar  | 74,9             | °               |
| $\chi$ = Variável do azimute solar  | -2,25            | Adimensional    |
| $C$ = Constante do azimute solar  | 180              | °               |
| $\gamma_s$ = Azimute do sol   | 114              | °               |
| $\eta$ = Ângulo de incidência do feixe solar em relação ao eixo do condutor | 76,2             | °               |
| $I_{T(0)}$ = Intensidade de radiação solar global ao nível do mar           | 1027             | $W/m^2$         |
| $K_{solar}$ = Coeficiente de correção de altitude                           | 1                | Adimensional    |
| $I_{T(y)}$ = Intensidade de radiação solar global ajustada para altitude    | 1027             | $W/m^2$         |
| $P_s$ = Aquecimento solar   | 22,46            | $W/m$           |
| <b>Cálculo de Ampacidade - <math>I</math></b>                               |                  |                 |
| $R_{ac}(T_s)$ = Resistência elétrica AC na temperatura do condutor          | $9,39 * 10^{-5}$ | $\Omega/m$      |
| $I$ = Ampacidade / Corrente no condutor                                     | 1024             | A               |

Fonte: Autor

Para o cálculo de temperatura no condutor ( $T_s$ ), pelo método IEEE, o documento de IEEE (2012b) apresenta, em seu Anexo B, um exemplo numérico baseado na rotina RATEIEEE, descrita no Anexo A do mesmo documento. Essa rotina permite executar diversos cálculos numéricos utilizando a metodologia IEEE. Os parâmetros de entrada utilizados no exemplo do Anexo B estão elencados na Tabela 12. Foi utilizado o mesmo condutor do exemplo anterior, CAA “Drake”, com uma corrente  $I = 1000A$ .

Tabela 12 – Parâmetros de entrada para exemplo do método IEEE, cálculo de temperatura no condutor

| <b>Parâmetro</b>                                      | <b>Valor</b>                        | <b>Unidade</b> |
|---|-------------------------------------|----------------|
| <b>Características do condutor – CAA “Drake” 26/7</b> |                                     |                |
| Diâmetro externo do condutor                          | 28,14                               | mm             |
| Diâmetro do núcleo                                    | 10,4                                | mm             |
| Diâmetro cada fio externo                             | 4,44                                | mm             |
| Emissividade  | 0,5                                 | Adimensional   |
| Absortividade   | 0,5                                 | Adimensional   |
| Resistência ac @ T1                                   | $7,283 * 10^{-5}$                   | $\Omega/m$     |
| Resistência ac @ T2                                   | $8,688 * 10^{-5}$                   | $\Omega/m$     |
| <b>Condições do ambiente</b>                          |                                     |                |
| Temperatura ambiente                                  | 40                                  | $^{\circ}C$    |
| Velocidade do vento                                   | 0,61                                | m/s            |
| Ângulo de ataque do vento                             | 90                                  | $^{\circ}$     |
| Altitude  | 0                                   | m              |
| <b>Condições solares</b>                              |                                     |                |
| Azimute do condutor                                   | 45                                  | $^{\circ}$     |
| Latitude  | 43                                  | $^{\circ}$     |
| Clareza da Atmosfera                                  | <i>Limpo (<math>N_s = 1</math>)</i> | Adimensional   |
| Dia do Ano  | <i>10 de junho</i>                  | Adimensional   |
| Hora  | <i>2 PM</i>                         | Adimensional   |

Fonte: IEEE, 2012b

Executando a rotina em *MATLAB* com o uso das equações do método IEEE, teve-se como resultado a temperatura no condutor  $T_s = 101^{\circ}C$ , mesmo resultado apresentado no exemplo do Anexo B de IEEE (2012b).

As rotinas para cálculo de corrente e para cálculo de temperatura no condutor elaboradas foram testadas com êxito, tendo como base exemplos numéricos propostos em Cigré (2014) e IEEE (2012b). Pequenas divergências nos valores calculados devem-se aos arredondamentos utilizados, já que são de ordens muito pequenas, não interferindo na validação dos testes.

#### 4. COMPARAÇÃO NUMÉRICA DOS MÉTODOS

Para a execução dos testes comparativos entre os dois métodos, foram especificados os parâmetros de variação de alguns componentes do cálculo, conforme a Tabela 13. O condutor padrão utilizado foi o CAA “Drake” 26/7.

Tabela 13 – Parâmetros de entrada padrão para testes comparativos

| <b>Parâmetro</b>                                      | <b>Valor Padrão</b>                 | <b>Unidade</b> |
|---|-------------------------------------|----------------|
| <b>Características do condutor – CAA “Drake” 26/7</b> |                                     |                |
| Diâmetro externo do condutor                          | 28,1                                | mm             |
| Diâmetro do núcleo                                    | 10,4                                | mm             |
| Diâmetro cada fio externo                             | 4,44                                | mm             |
| Temperatura máxima no condutor                        | 85                                  | °C             |
| Emissividade  | 0,8                                 | Adimensional   |
| Absortividade   | 0,8                                 | Adimensional   |
| Resistência ac @ T1                                   | $7,283 * 10^{-5}$                   | $\Omega/m$     |
| Resistência ac @ T2                                   | $8,688 * 10^{-5}$                   | $\Omega/m$     |
| <b>Condições do ambiente</b>                          |                                     |                |
| Temperatura ambiente                                  | 25                                  | °C             |
| Velocidade do vento                                   | 1                                   | m/s            |
| Ângulo de ataque do vento                             | 60                                  | °              |
| Inclinação do condutor c/ horizonte*                  | 0                                   | °              |
| Altitude  | 0                                   | m              |
| <b>Condições solares</b>                              |                                     |                |
| Azimute do condutor                                   | 90 (leste – oeste)                  | °              |
| Latitude  | -30                                 | °              |
| Clareza da Atmosfera                                  | <i>Limpo</i> ( $N_s = 1 / AT = 0$ ) | Adimensional   |
| Dia do Ano  | 21 de março (80)                    | Adimensional   |
| Hora  | 11 AM                               | Adimensional   |
| Reflectância do Solo*                                 | <i>Floresta</i> ( $F = 0,1$ )       | Adimensional   |

Fonte: Autor

Tabela 14 – Faixa de valores dos parâmetros de entrada para testes comparativos

| <b>Parâmetro</b>                                      | <b>Faixa de Valores</b> | <b>Unidade</b> |
|---|-------------------------|----------------|
| <b>Características do condutor – CAA “Drake” 26/7</b> |                         |                |
| Temperatura máxima no condutor                        | 55 ~ 85                 | °C             |
| Emissividade  | 0,27 ~ 0,95             | Adimensional   |
| Absortividade   | 0,28 ~ 0,93             | Adimensional   |
| <b>Condições do ambiente</b>                          |                         |                |
| Temperatura ambiente                                  | 0 ~ 40                  | °C             |
| Velocidade do vento                                   | 0 ~ 8                   | m/s            |
| Ângulo de ataque do vento                             | 0 ~ 90                  | °              |
| Inclinação do condutor c/ horizonte*                  | 0 ~ 40                  | °              |
| Altitude  | 0 ~ 2000                | m              |

Tabela 14 – Faixa de valores dos parâmetros de entrada para testes comparativos (conclusão)

| <b>Parâmetro</b>         | <b>Faixa de Valores</b>                             | <b>Unidade</b> |
|--------------------------|---|----------------|
| <b>Condições solares</b> |   |                |
| Azimute do condutor      | 0 ~ 90  | °              |
| Latitude                 | -33 ( <i>Chuí</i> ) ~ + 5 ( <i>Uiramutã</i> )       | °              |
| Clareza da Atmosfera     | 0 ( <i>Nuvens Espessas</i> ) ~ 1,0 ( <i>Limpo</i> ) | Adimensional   |
| Dia do Ano               | 1 (01/jan) ~ 365 (31/dez)                           | Adimensional   |
| Hora                     | 8 ~ 16  | Adimensional   |
| Reflectância do Solo*    | 0,1 ( <i>Floresta</i> ) ~ 0,3 ( <i>Areia</i> )      | Adimensional   |

Fonte: Autor

Os parâmetros de “Inclinação do condutor com o horizonte” e “Reflectância do solo”, marcados com um asterisco “\*” nas Tabelas, são utilizados apenas no método CIGRÉ.

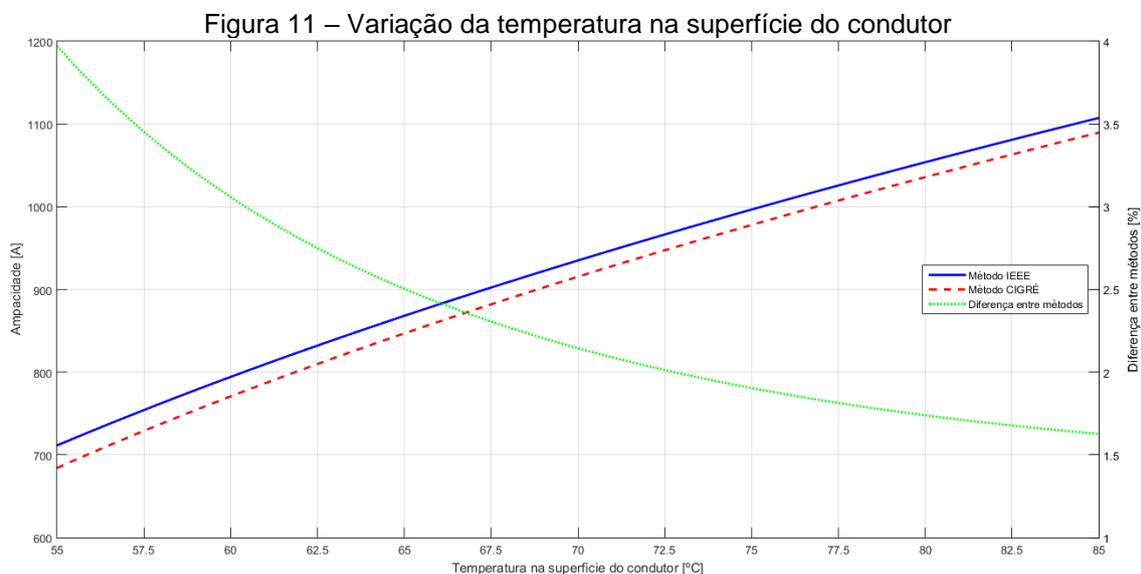
Os gráficos gerados apresentam as curvas com a evolução dos dois métodos, e ainda uma terceira curva com a diferença percentual, em módulo, entre os métodos. Isto é, há duas curvas que se apresentam na forma *Parâmetro Analisado X Ampacidade*, e outra curva na forma *Parâmetro Analisado X Diferença Percentual Absoluta Entre os Métodos*.

#### 4.1 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA MÁXIMA NA SUPERFÍCIE DO CONDUTOR - $T_s$

O primeiro parâmetro analisado foi a variação da temperatura máxima no condutor,  $T_s$ . Esse parâmetro é utilizado em muitas equações que levam ao cálculo da ampacidade, sejam nas perdas de calor por convecção ( $P_c$ ), nas perdas de calor por radiação ( $P_r$ ) e no ganho de calor por efeito *Joule* ( $P_j$ ), em ambos os métodos. A faixa de valores utilizada foi de 55°C a 85°C.

Como verifica-se na Figura 11, essa variação provoca uma alteração muito significativa no valor da ampacidade, variando de 711,4A a 1107A no método IEEE, e de 684,2A a 1090A no método CIGRÉ, significando um aumento de 55,6% e 59,3%, respectivamente. O aumento do parâmetro da temperatura na superfície do condutor provoca um aumento na ampacidade. Porém, analisando-se ponto-a-ponto, nota-se que a diferença entre os métodos é da ordem de 4% para temperaturas no início da faixa, chegando a 1,6% no final.

Observa-se ainda que os valores pelo método IEEE são sempre superiores ao método CIGRÉ.

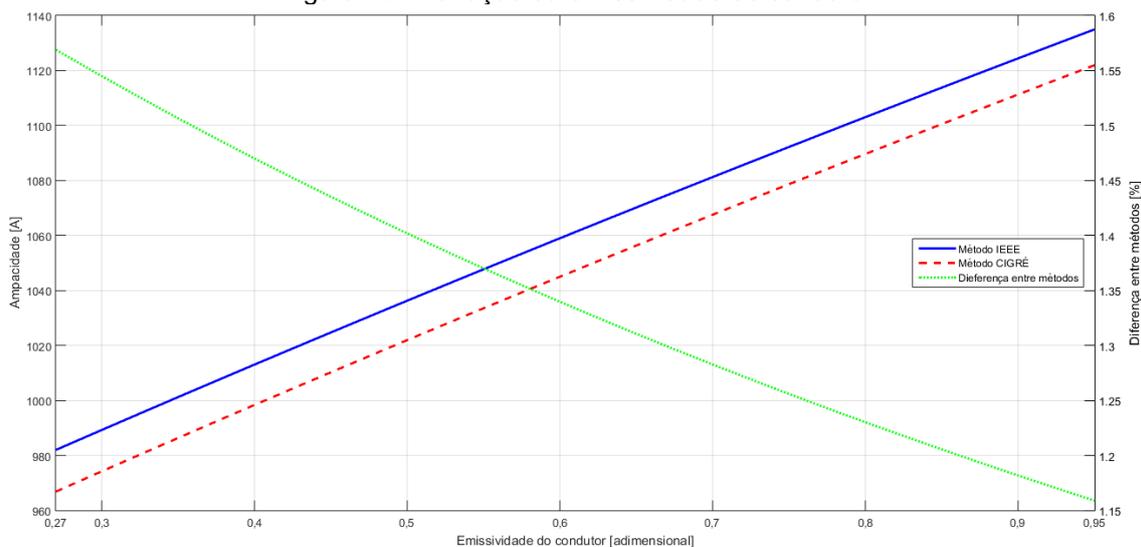


#### 4.2 VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE DO CONDUTOR - $\varepsilon_s$

A emissividade do condutor,  $\varepsilon_s$ , para o caso de condutores de alumínio encordoado, de acordo com Morgan (1982), pode variar de 0,27 a 0,95, dependendo do seu ambiente e do tempo exposto a este ambiente, sendo os valores menores para condutores novos e brilhosos, e os valores maiores para condutores envelhecidos e em ambiente industrial. Esse parâmetro é utilizado apenas no cálculo da perda de calor por radiação ( $P_r$ ).

A Figura 12 mostra que a ampacidade do condutor aumenta com o aumento da emissividade, de forma praticamente linear. Esse aumento é de 15,6% para o método IEEE e de 16% para o método CIGRÉ. Porém, na comparação entre os dois métodos, os valores se diferenciam, em média, 1,35% apenas. Essa diferença tão pequena deve-se ao fato de que os valores das perdas de calor por radiação ( $P_r$ ) nos dois métodos serem praticamente iguais, diferenciando-se em cerca de 0,06%.

Figura 12 - Variação da emissividade do condutor



Fonte: Autor

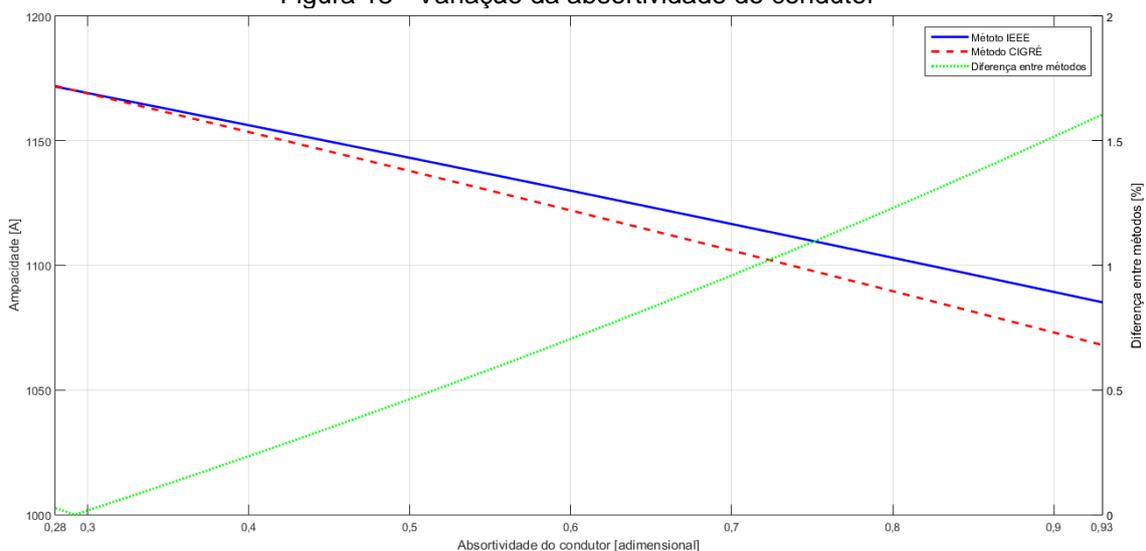
### 4.3 VARIAÇÃO DA ABSORTIVIDADE DO CONDUTOR - $\alpha_s$

Conforme Morgan (1982), a absorptividade do condutor,  $\alpha_s$ , para o caso de condutores de alumínio encordado, pode variar de 0,28 a 0,93, dependendo do seu ambiente e do tempo exposto a este ambiente, sendo os valores menores para condutores novos e brilhosos, e os valores maiores para condutores envelhecidos e em ambiente industrial, a exemplo do que ocorre com a emissividade,  $\varepsilon_s$ . Esse parâmetro é utilizado apenas no cálculo do ganho de calor por aquecimento solar ( $P_s$ ).

A Figura 13 a variação da absorptividade do condutor ao longo da faixa estipulada, e seu reflexo na ampacidade. Percebe-se que, com o aumento do parâmetro, o limite de corrente decresce, caindo em 7,4% para o método IEEE, e em 8,9% para o método CIGRÉ. Por outro lado, quando comparados os dois métodos, a diferença parte de 0% no início da faixa, chegando a 1,6% no final, notando-se que a ampacidade calculada pelo método IEEE é superior à calculada pelo método CIGRÉ, para valores a contar de  $\alpha_s = 0,292$ .

Analisando-se apenas a componente referente ao calor ganho por aquecimento solar ( $P_s$ ), a diferença entre os métodos fica em torno de 19,3%. Porém, como  $P_s$  contribui pouco frente ao calor ganho por aquecimento *Joule* ( $P_j$ ), sua influência no resultado final também é pequena.

Figura 13 - Variação da absortividade do condutor

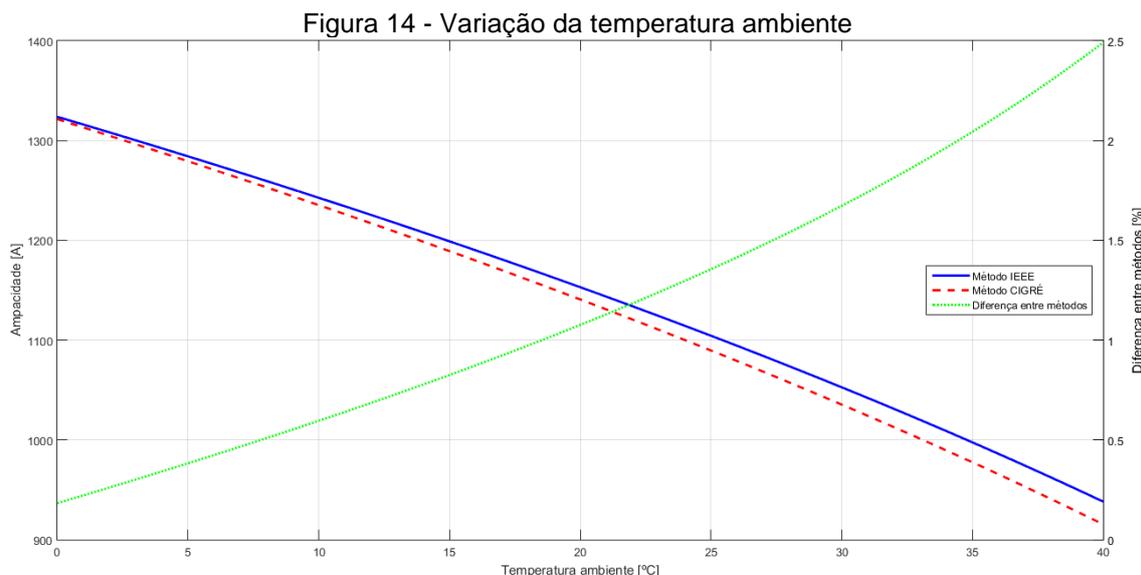


Fonte: Autor

#### 4.4 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE - $T_a$

A variação da temperatura ambiente,  $T_a$ , é percebida, em ambos os métodos, na perda de calor por convecção ( $P_c$ ) e na perda de calor por radiação ( $P_r$ ). Foi utilizada uma faixa de 0°C a 40°C, abrangendo a grande maioria das temperaturas ambientes do Brasil.

A Figura 14 apresenta a evolução da ampacidade em função da variação de  $T_a$ . Percebe-se que, com o aumento do parâmetro, a ampacidade decresce, mostrando uma diminuição de 29,1% no método IEEE, e uma diminuição de 30,7% no método CIGRÉ.



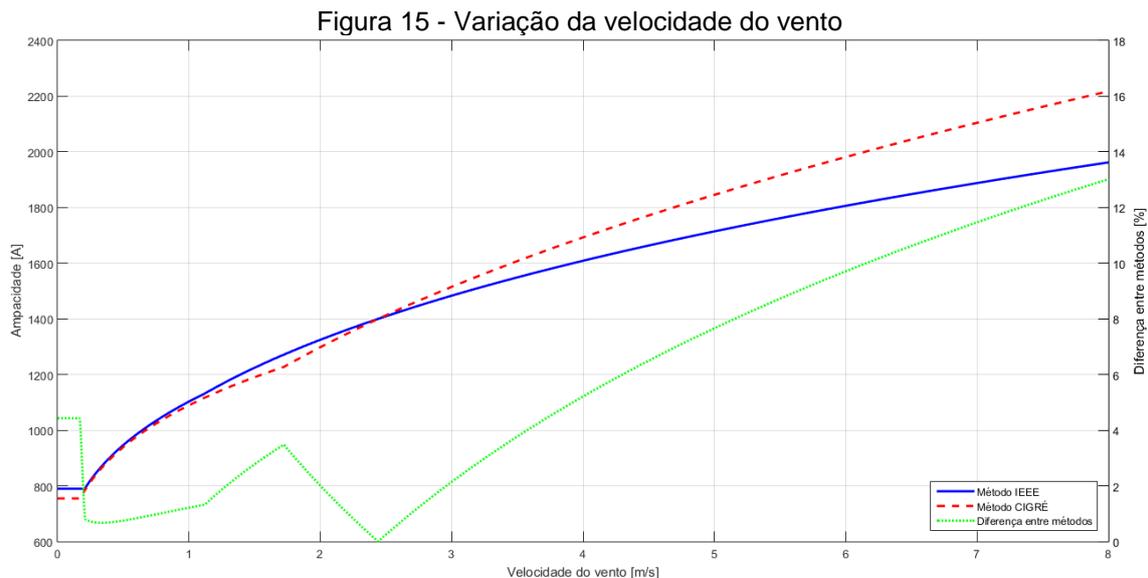
Fonte: Autor

A diferença entre os métodos, observado na Figura 14, é de 0,2% para  $T_a = 0^\circ\text{C}$  e de 2,5% para  $T_a = 40^\circ\text{C}$ , notando que os valores para o método IEEE são sempre superiores ao do método CIGRÉ.

#### 4.5 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO - $V$

A velocidade do vento,  $V$ , impacta apenas na perda de calor por convecção ( $P_c$ ), mais precisamente no cálculo da perda de calor por convecção forçada. Apesar de constar apenas nesta parcela, o parâmetro tem grande influência nos resultados finais dos cálculos.

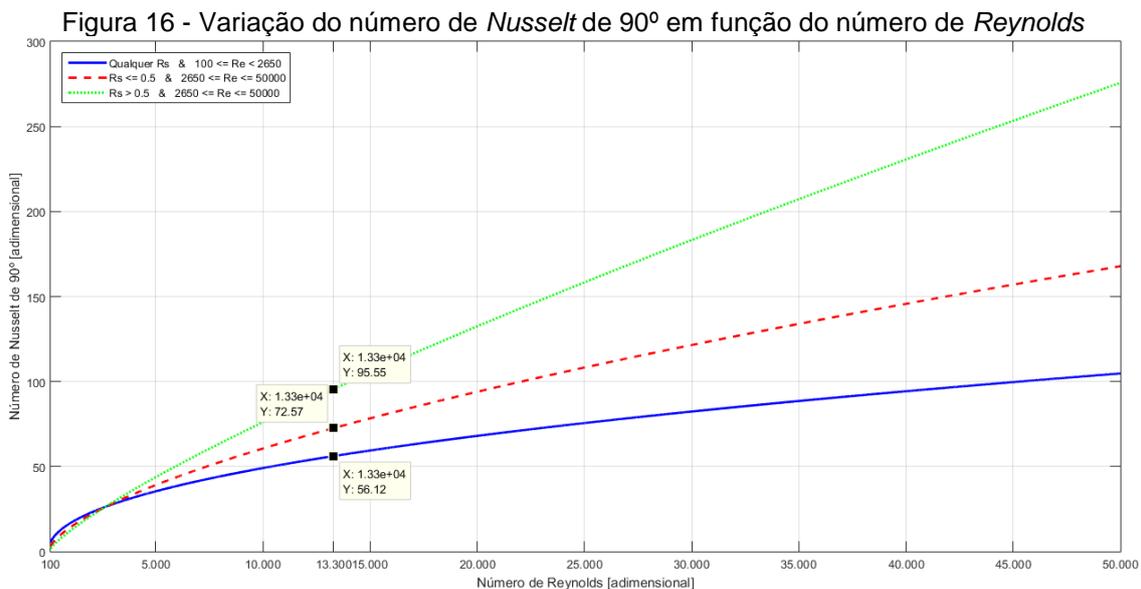
A Figura 15 mostra a evolução da ampacidade pela variação de  $V$ , numa faixa de  $0\text{ m/s}$  a  $8\text{ m/s}$ . Nota-se que, até aproximadamente  $V = 0,2\text{ m/s}$ , os valores de ampacidade, em ambos os métodos, não se altera. Isso se dá devido à perda de calor por convecção natural, que até esse ponto é superior aos valores calculados para convecção forçada. A partir desse ponto os valores começam a crescer, com o aumento de  $V$ . Pelo método IEEE, o aumento da ampacidade é de 148% e, pelo método CIGRÉ, chega a 194%. Os valores, pelo método IEEE são superiores até  $V = 2,44\text{ m/s}$ . Após, os valores calculados pelo método CIGRÉ ficam superiores e crescendo de forma mais rápida. No final da faixa de análise, com  $V = 8\text{ m/s}$ , a diferença entre os métodos é de 13%.



Fonte: Autor

Há de se notar um comportamento não linear nas curvas, muito claramente percebido observando-se a curva referente à diferença entre os métodos, na Figura 15. Essa curva apresenta quatro pontos de inflexão, em  $V = 0,2 \text{ m/s}$ ,  $V = 1,12 \text{ m/s}$ ,  $V = 1,72 \text{ m/s}$  e  $V = 2,44 \text{ m/s}$ . O primeiro refere-se ao limite de quando a perda de calor por convecção forçada supera a perda de calor por convecção natural, que não depende de  $V$ . O segundo ponto diz respeito ao momento em que  $P_{c2}$  (Equação (37)) ultrapassa  $P_{c1}$  (Equação (36)), no método IEEE. O terceiro ponto ocorre quando, no método CIGRÉ, o número de *Reynolds*,  $Re$ , ultrapassa de 2650, e altera os coeficientes  $B_1$  e  $n$ , para determinação do número de *Nusselt* de  $90^\circ$ ,  $Nu_{90}$ , dado na Equação (7). Já o quarto ponto refere-se ao momento em que a curva referente ao método CIGRÉ ultrapassa a curva referente ao método IEEE.

Nota-se que é a partir do ponto em que, no método CIGRÉ, o número de *Reynolds* ultrapassa de 2650, que ocorre a mudança na inclinação da curva, tornando o seu crescimento mais rápido e, assim, distanciando-se bastante da curva referente ao método IEEE. A Figura 16 mostra o número de *Nusselt* de  $90^\circ$ ,  $Nu_{90}$ , em função da variação do número de *Reynolds*,  $Re$ , para as três situações apresentadas na Tabela 3. Para um valor de  $Re = 13300$ , que é o valor máximo para a situação simulada (Condutor CAA *Drake* e  $V = 8 \text{ m/s}$ ), e rugosidade superficial  $R_s = 0,0938$ , a diferença percentual nos valores de  $Nu_{90}$  são de 70,26%.

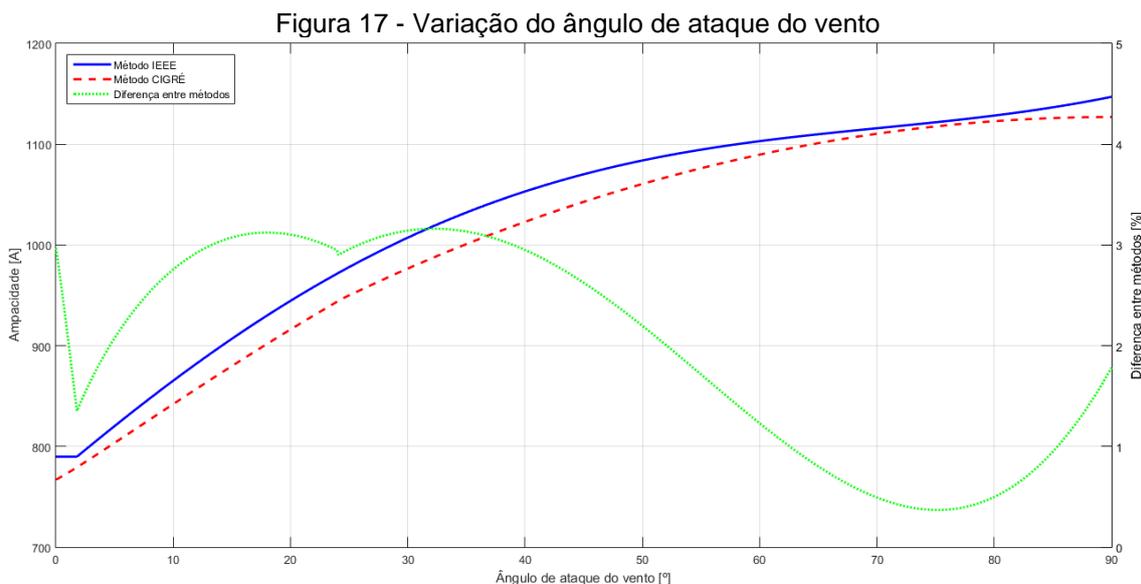


Fonte: Autor

#### 4.6 VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATAQUE DO VENTO - $\delta$

O ângulo de ataque do vento,  $\delta$ , que é o ângulo entre o vento e a direção da linha, é utilizado nos dois métodos para o cálculo da perda de calor por convecção,  $P_c$ , mais especificamente, na convecção forçada. De acordo com CIGRÉ (2014), a direção do vento desempenha um papel importante na eficácia do resfriamento convectivo forçado. Em virtude dessa importância, o método CIGRÉ propõe uma correção por meio do número de *Nusselt* em função de  $\delta$ , dado na Equação (6), e o método IEEE propõe uma correção por meio do fator de direção do vento,  $K_{angle}$ , apresentado na Equação (38).

A Figura 17 traz as curvas da ampacidade em função de  $\delta$  para os dois métodos e uma curva com a diferença percentual entre os métodos. Para o método IEEE, o resultado permanece constante até  $\delta = 1,8^\circ$ , com uma ampacidade de 790A, cerca de 69% do valor para  $\delta = 90^\circ$ , que é de 1147A. Com um  $\delta = 55^\circ$ , a ampacidade é de 1095A, que representa mais de 95% do valor máximo. Para o método CIGRÉ a curva cresce constantemente, perdendo velocidade ao se aproximar de  $\delta = 90^\circ$ , onde apresenta uma ampacidade de 1127A. Para um  $\delta = 0^\circ$ , tem um valor de 68% do valor máximo, com 767A, e com um  $\delta = 55^\circ$  chega a 1076A, que corresponde a mais de 95% da ampacidade para um ângulo de ataque perpendicular ao eixo da linha.



Fonte: Autor

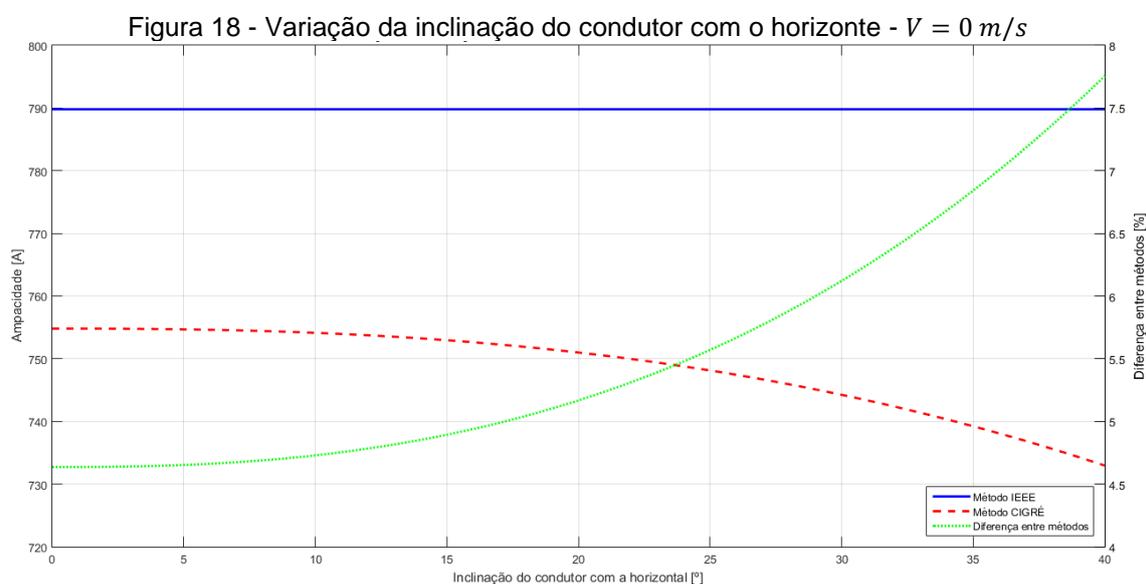
Na comparação entre os métodos, as ampacidades têm uma máxima diferença percentual quando  $\delta = 32,5^\circ$ , chegando a 3,16%. Após, essa diferença diminui, chegando ao seu mínimo para um  $\delta = 75^\circ$ , com 0,37% de diferença entre os métodos. Cabe ainda ressaltar que os valores referentes à curva do método IEEE são superiores aos do método CIGRÉ em toda a faixa analisada.

#### 4.7 VARIAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO CONDUTOR COM O HORIZONTE - $\beta$

O parâmetro de inclinação do condutor com o horizonte,  $\beta$ , é utilizado apenas no método CIGRÉ, no cálculo da perda de calor por convecção,  $P_c$ . O aumento de  $\beta$  reduz a perda de calor por convecção natural. Na Equação (15) essa variável faz uma correção no número de *Nusselt* para convecção natural,  $Nu_{nat}$ , gerando o número de *Nusselt* para convecção natural em função de  $\beta$ ,  $Nu_\beta$ .

Para uma condição sem vento, ou seja,  $V < 0,5 \text{ m/s}$ , a convecção natural prevalece e é possível observar a influência de  $\beta$  no resultado final do cálculo de ampacidade, como pode ser notado na Figura 18. Já para uma situação com vento, isto é,  $V \geq 0,5 \text{ m/s}$ , a convecção forçada tende a prevalecer e a variação  $\beta$  não é mais percebida no resultado final, como nota-se na Figura 19.

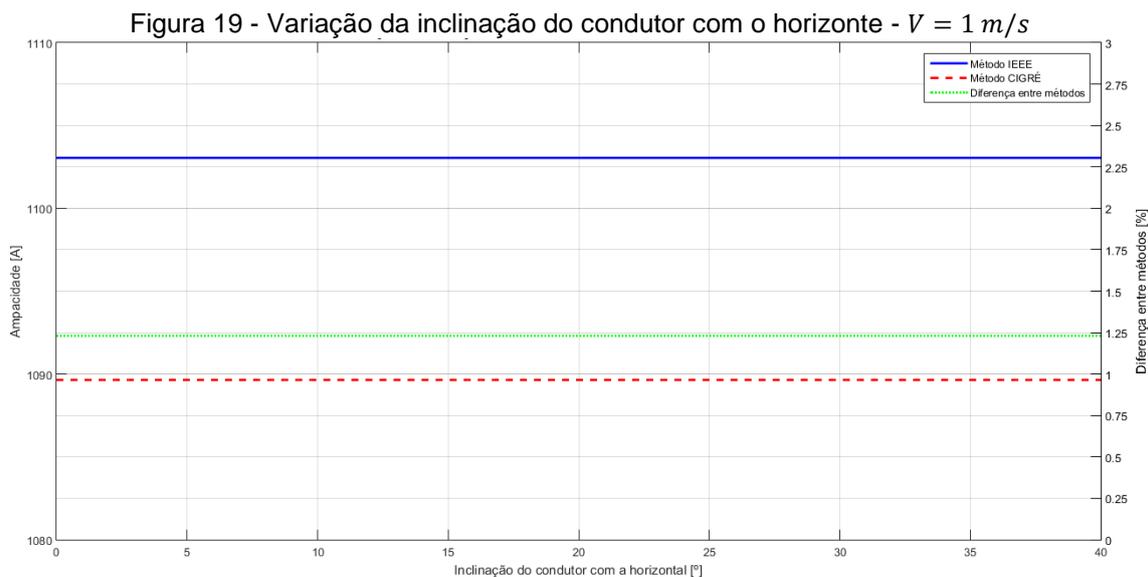
Na Figura 18, cujas curvas foram geradas com  $V = 0 \text{ m/s}$ , percebe-se um leve declínio no valor da ampacidade calculada pelo método CIGRÉ com o aumento de  $\beta$ , apresentando uma diferença de 2,9% entre o início e o final da faixa analisada, com  $0^\circ \leq \beta \leq 40^\circ$ . A ampacidade calculada pelo método IEEE permaneceu constante, haja vista que esse método não utiliza esse parâmetro. Comparando-se os dois métodos, nesta situação, verifica-se uma diferença percentual que varia de 4,6%, para  $\beta = 0^\circ$ , a 7,7%, para  $\beta = 40^\circ$ , com os valores do método IEEE superiores aos do método CIGRÉ em toda a faixa analisada.



Fonte: Autor

Na Figura 19, cujas curvas foram geradas com  $V = 1 \text{ m/s}$ , com a predominância das perdas de calor pela convecção forçada, os valores da ampacidade para o método CIGRÉ não se alteram ao longo da faixa analisada, assim como para o método IEEE também não, já que esse método não utiliza a variável  $\beta$  em suas equações. Com as duas curvas de ampacidade apresentando valores constantes, a diferença percentual entre elas permanece constante em cerca de 1,3%.

É válido fazer a observação de que a situação de inclinação do condutor com a horizontal ocorre de forma mais efetiva quando uma LAT está descendo ou subindo em altitude como, por exemplo, em encostas de morros, onde a incidência de ventos fortes geralmente é alta, fazendo com que esse parâmetro não faça efeito algum nos cálculos finais de ampacidade.

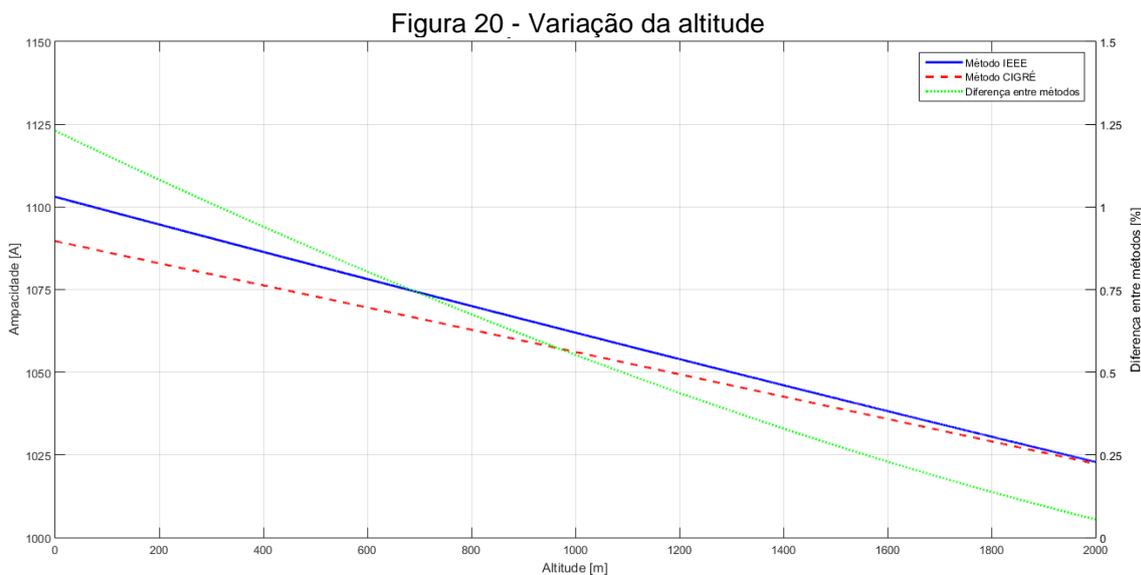


Fonte: Autor

#### 4.8 VARIAÇÃO DA ALTITUDE - $y$

A altitude,  $y$ , é utilizada em ambos os métodos, na perda de calor por convecção,  $P_c$ , e no ganho de calor por aquecimento solar,  $P_s$ . Em  $P_c$ , o aumento da altitude faz diminuir a perda de calor. Em  $P_s$ , o aumento da altitude provoca aumento no ganho de calor. Em questões de equilíbrio térmico, percebe-se que o condutor está com mais calor, logo, deve compensar no ganho de calor por efeito *Joule*, diminuindo a corrente que circula pelo condutor.

A Figura 20 mostra as curvas da ampacidade nos dois métodos, em função da altitude,  $y$ , e ainda a diferença percentual entre os valores obtidos pelos dois métodos. No método IEEE a ampacidade se reduz de 1103A para 1023A, na faixa analisada de  $y = 0 \text{ m}$  a  $y = 2000 \text{ m}$ , representando uma redução de 7,2%. Já no método CIGRÉ os valores se reduzem de 1090A para 1022A, também na faixa analisada, representando uma diminuição de 6,2%. Na comparação entre os métodos, a diferença percentual é de 1,23% no início da faixa, chegando a valores praticamente iguais quando  $y = 2000 \text{ m}$ .

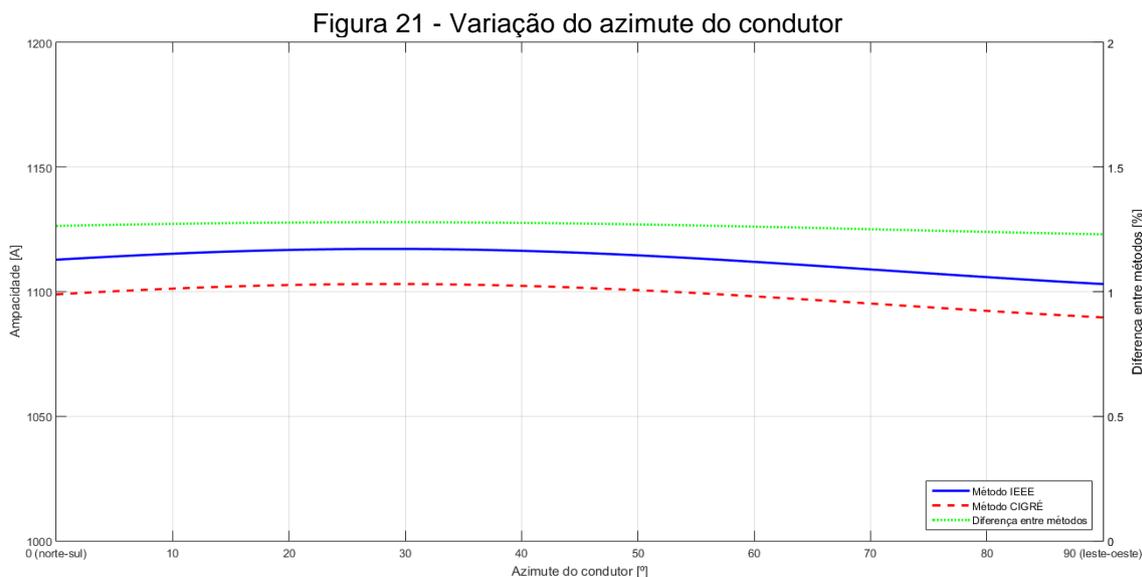


Fonte: Autor

#### 4.9 VARIAÇÃO DO AZIMUTE DO CONDUTOR - $\gamma_c$

O parâmetro de azimute do condutor,  $\gamma_c$ , é utilizado em ambos os métodos, no cálculo do ganho de calor por aquecimento solar,  $P_s$ . Esse parâmetro define o posicionamento da linha em relação ao norte, ou seja, se a linha está numa direção leste-oeste, esta faz  $90^\circ$  com o norte e seu  $\gamma_c = 90^\circ$ . Da mesma forma, se a linha está numa direção de norte-sul, seu  $\gamma_c = 0^\circ$ .

Pela Figura 21, percebe-se que  $\gamma_c$  pouco influencia no cálculo da ampacidade, dados os valores padrão assumidos. Tanto para o método IEEE quanto para o método CIGRÉ os valores da ampacidade calculada têm uma mediana de 1114A e 1100A, e desvio padrão de 4,27A e 4,06A, respectivamente. A diferença percentual entre os métodos fica quase estável, de 1,23% a 1,28%, com os valores calculados pelo método IEEE sempre superiores aos calculados pelo método CIGRÉ, em toda a faixa analisada.

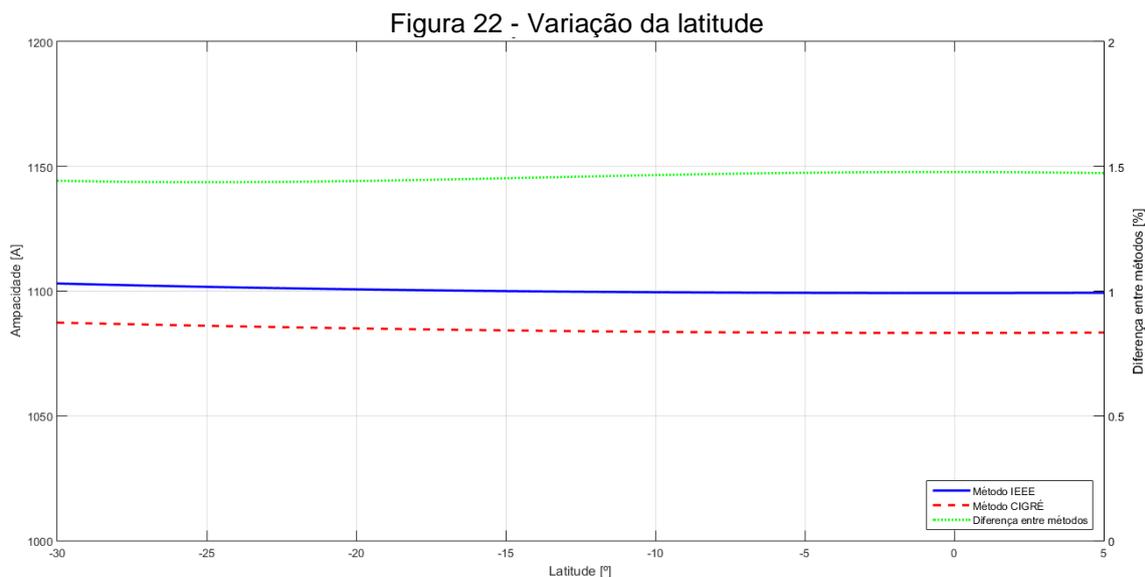


Fonte: Autor

#### 4.10 VARIAÇÃO DA LATITUDE - $\varphi$

A variação da latitude,  $\varphi$ , é percebida apenas no cálculo do ganho de calor por aquecimento solar,  $P_s$ , nos dois métodos. A faixa analisada compreende as latitudes extremas do Brasil, do Chuí/RS, com latitude de  $-33^\circ$ , a Uiramutã/RR, com latitude de  $+5^\circ$ .

A Figura 22 apresenta as curvas da amplitude em função da variação da latitude,  $\varphi$ , nos dois métodos analisados, juntamente com a curva da diferença percentual entre os métodos. Nota-se que há pouca variação na amplitude dos valores calculados, apresentando menos de 1% entre o valor máximo e o valor mínimo. Na comparação entre os métodos, a diferença percentual média é de 1,45%.

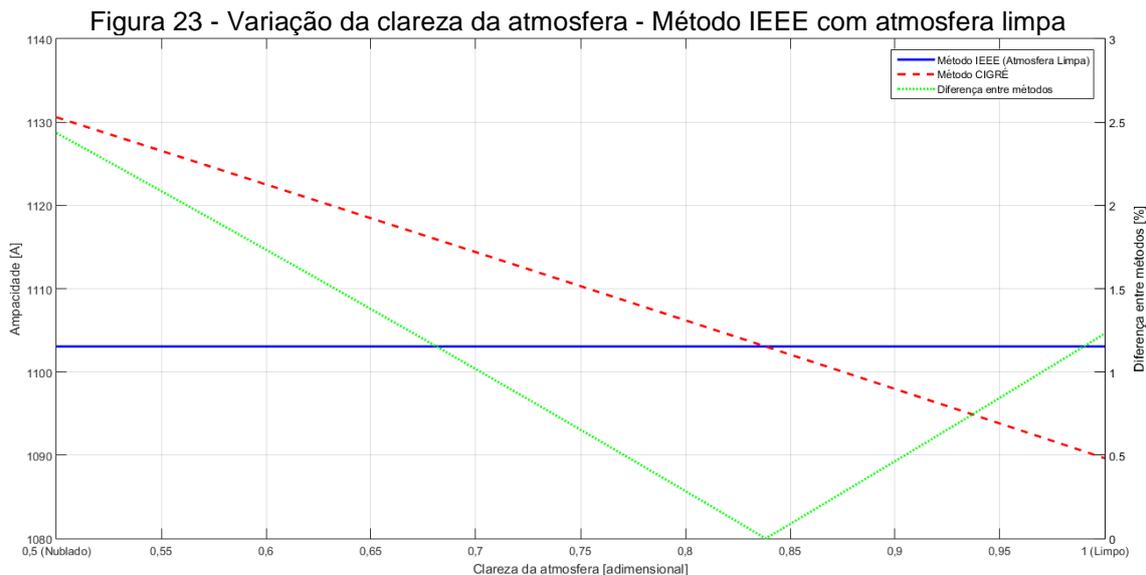


Fonte: Autor

#### 4.11 VARIAÇÃO DA CLAREZA DA ATMOSFERA - $N_s$ ou $AT$

A clareza da atmosfera,  $N_s$  no método CIGRÉ ou  $AT$  no método IEEE, é tratada de forma distinta pelos dois métodos. Enquanto no método CIGRÉ o valor da clareza atmosfera varia de  $N_s = 1$ , para uma atmosfera limpa, a  $N_s = 0,5$  para uma atmosfera industrial, a  $N_s = 0$  para nuvens espessas, no método IEEE são apresentadas apenas duas situações:  $AT = 0$  para atmosfera limpa e  $AT = 1$  para atmosfera industrial/nublada, já que os coeficientes do polinômio da Equação (45) são dados apenas para essas duas situações, conforme já apresentado na Tabela 5. Esses parâmetros são utilizados no cálculo do ganho de calor por aquecimento solar,  $P_s$ , em ambos os métodos.

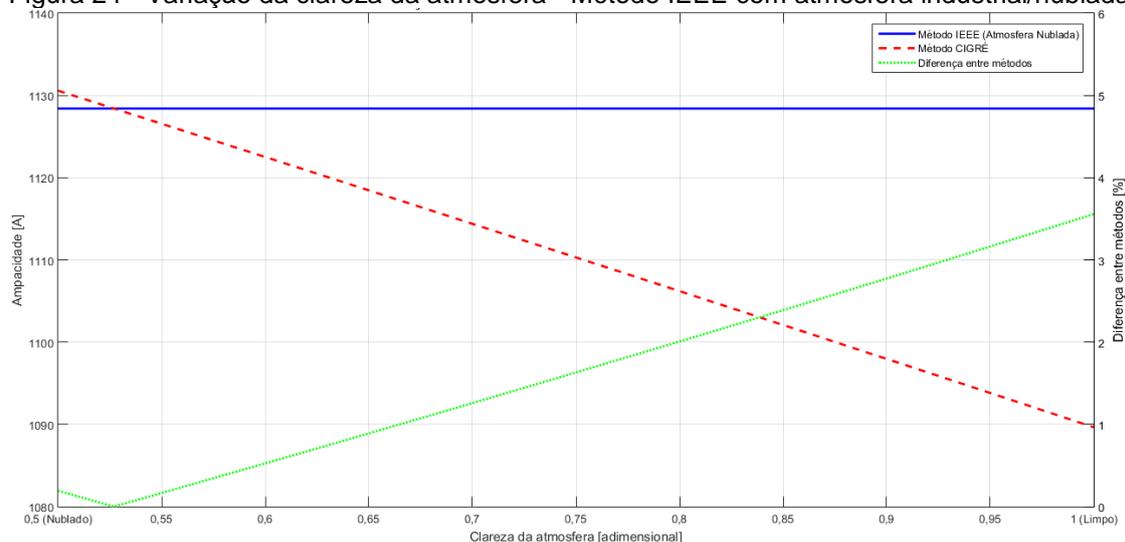
Como o método IEEE não permite variações a passos, a Figura 23 apresenta as curvas do cálculo de ampacidade, pelo método CIGRÉ, em função de  $N_s$ , e pelo método IEEE, com atmosfera limpa,  $AT = 0$ . Apresenta ainda a curva com a diferença percentual entre os métodos. Enquanto a ampacidade varia de 1131A a 1090A, no método CIGRÉ, na faixa analisada, pelo método IEEE o valor permanece constante em 1103A. Porém, esse valor refere-se a uma situação com atmosfera limpa ( $AT = 0$ ), que ocorrerá no método CIGRÉ com  $N_s = 1$ . Nota-se ainda que a curva do método CIGRÉ cruza a curva do método IEEE quando  $N_s = 0,873$ . Comparando-se os métodos nesse ponto, tem-se uma diferença percentual de 1,23%.



Fonte: Autor

A Figura 24 apresenta a mesma curva referente ao método CIGRÉ já mostrada na Figura 23, porém, no método IEEE, para a situação com  $AT = 1$ , isto é, apresentando uma atmosfera industrial/nublada. A amplitude, pelo método IEEE, mantém-se constante em 1128A. O ponto de observação nesta figura deve-se centrar em  $N_s = 0,5$ , onde a amplitude, pelo método CIGRÉ, é de 1131A. Pelo gráfico ainda se percebe que as curvas se cruzam quando  $N_s = 0,53$ . Na comparação entre os métodos tem-se ainda uma diferença percentual entre os métodos de apenas 0,2% quando  $N_s = 0,5$ , com a amplitude pelo método CIGRÉ levemente superior à do método IEEE.

Figura 24 - Variação da clareza da atmosfera - Método IEEE com atmosfera industrial/nublada

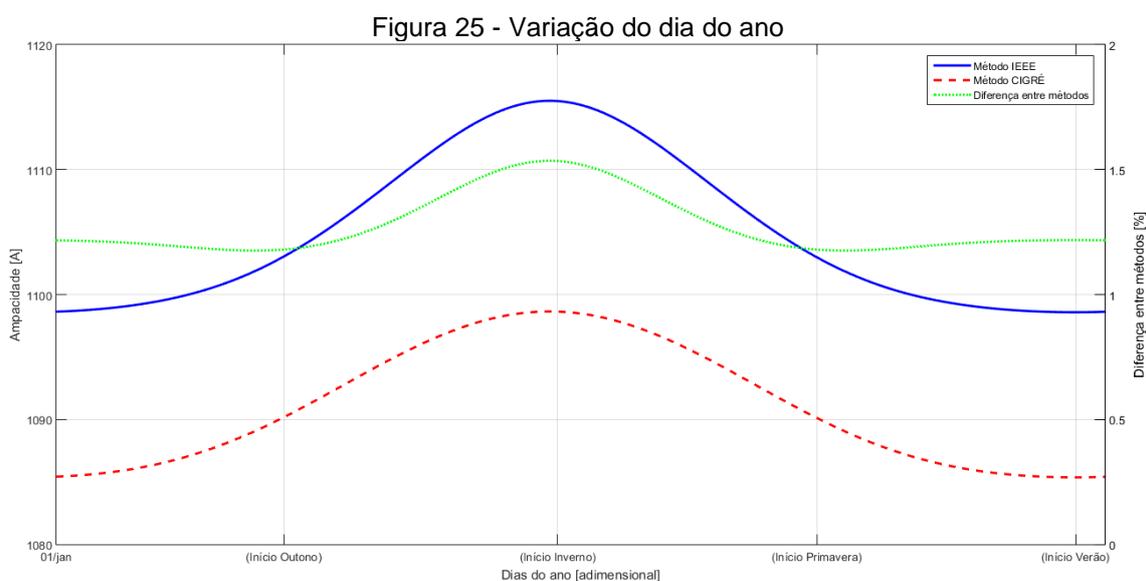


Fonte: Autor

#### 4.12 VARIAÇÃO DO DIA DO ANO - $N$

Os dois métodos utilizam o parâmetro do dia do ano,  $N$ , transformados em um número sequencial, onde  $N = 1$  corresponde a 1º de janeiro, e  $N = 365$  corresponde a 31 de dezembro. Tanto CIGRÉ quanto IEEE utilizam essa variável no cálculo do ganho de calor por aquecimento solar,  $P_s$ .

A Figura 25 traz as curvas das ampacidades calculadas pelos dois métodos em função da variação de  $N$ , e apresenta ainda a curva com a diferença percentual entre os métodos. Alguns valores de  $N$  são de importante análise com, por exemplo, os referentes aos dias de solstícios de inverno e verão, e os dias de equinócios de outono e primavera. No hemisfério sul temos os seguintes valores: 21/03 ( $N = 80$ ) para equinócio de outono, 21/06 ( $N = 175$ ) para solstício de inverno, 22/09 ( $N = 265$ ) para equinócio de primavera, e 21/12 ( $N = 355$ ) para solstício de verão. No método IEEE, a amplitude da ampacidade varia em apenas 16,9A, e no método CIGRÉ em apenas 13,3A. Os picos de amplitude da ampacidade, em ambos os métodos, se dão próximos a  $N = 175$ , isto é, próximo ao início do inverno. A diferença percentual entre os métodos tem seu pico máximo também nessa mesma região, mas apresenta uma pequena diferença de 1,53% apenas.

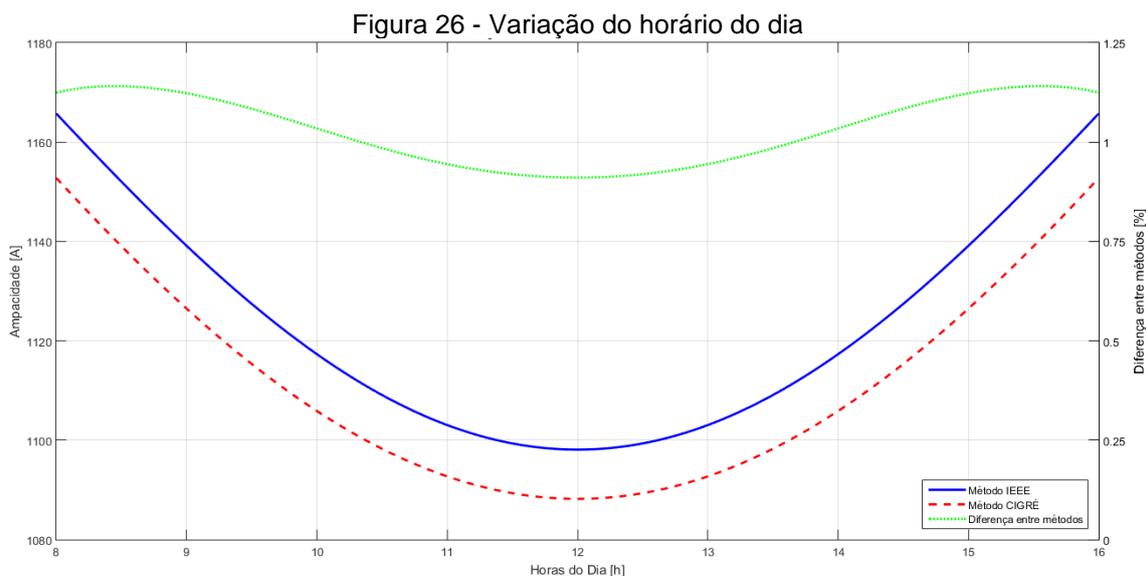


Fonte: Autor

#### 4.13 VARIAÇÃO DO HORÁRIO DO DIA - $H$

O parâmetro horário do dia,  $H$ , é utilizado para o cálculo da hora ângulo do sol,  $Z$ , que já foi apresentada na Equação (28). A hora ângulo do sol é o número de horas a partir do meio-dia vezes  $15^\circ$ , por exemplo, 11AM é  $-15^\circ$  e 2PM (14h) é  $+30^\circ$ . A variável  $H$  é utilizada, em ambos os métodos, no cálculo do ganho de calor por aquecimento solar,  $P_s$ .

A Figura 26 traz as curvas do cálculo da ampacidade em função da variação de  $H$  pelos dois métodos, além da curva com a diferença percentual entre os métodos. A simulação foi feita utilizando uma faixa de  $8 \leq H \leq 16$ , por ser o horário de maior incidência solar. Nos dois métodos nota-se a diminuição na ampacidade em direção a  $H = 12$ , isto é, quanto mais próximo do meio-dia, maior é a incidência solar e, conseqüentemente, menor é a ampacidade. Tanto no método CIGRÉ quanto no método IEEE a variação entre os valores máximos e mínimos de ampacidade não chegam a 6%. Na comparação entre os dois métodos, a diferença percentual máxima é de 1,14%, para  $H = 8,5$  e  $H = 15,5$ , e uma diferença percentual mínima de 0,91%, para  $H = 12$ . Observa-se também que os valores de ampacidade calculados pelo método IEEE são superiores aos calculados pelo método CIGRÉ em toda a faixa analisada.

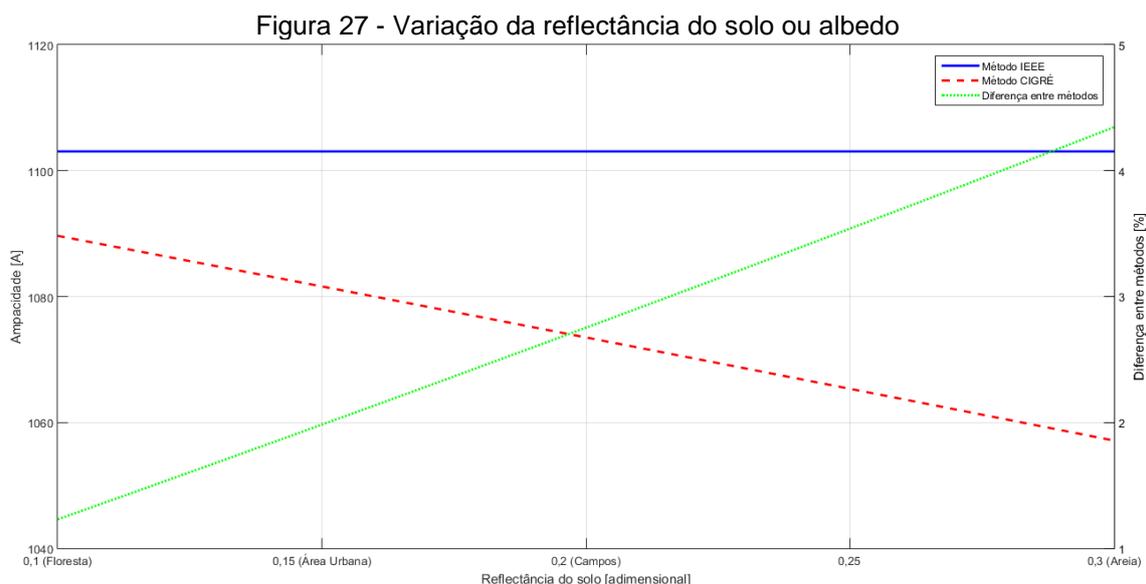


Fonte: Autor

#### 4.14 VARIAÇÃO DA REFLECTÂNCIA DO SOLO OU ALBEDO - $F$

A reflectância do solo ou albedo,  $F$ , é um parâmetro utilizado apenas no método CIGRÉ, no cálculo do ganho de calor por aquecimento solar,  $P_s$ . Refere-se à reflectância do solo, de acordo com a sua característica. De acordo com Cigré (2014), o albedo é aproximadamente 0,1 para florestas, 0,15 para áreas urbanas, 0,2 para campos e plantações, 0,3 para areia, 0,4 a 0,6 para gelo e 0,6 a 0,8 para neve. Como no Brasil as situações de gelo ou neve são pouco prováveis ou inexistentes, utilizou-se uma faixa de  $0,1 \leq F \leq 0,3$ .

Na Figura 27 é possível observar as duas curvas de cálculo de ampacidade pelos dois métodos e a curva da diferença percentual entre os métodos. Nota-se que a curva referente ao método IEEE apresenta valores constantes, de 1103A, em toda a faixa, pois esse método não utiliza o parâmetro  $F$ . No método CIGRÉ os resultados apresentam uma variação de 3%, tendo 1090A para  $F = 0,1$  e 1057A para  $F = 0,3$ . A diferença percentual entre os métodos varia de 1,23% no início da faixa, a 4,35% no final da faixa de análise, notando que a curva referente ao método IEEE tem todos seus valores superiores aos da curva referente ao método CIGRÉ, para  $0,1 \leq F \leq 0,3$ .



Fonte: Autor

#### 4.15 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS ANALISADOS

Conforme a Equação (2), o cálculo de ampacidade é composto de quatro parcelas de calor: perda de calor por convecção ( $P_c$ ), perda de calor por radiação ( $P_r$ ), ganho de calor por aquecimento solar ( $P_s$ ) e ganho de calor por efeito *Joule* ( $P_j$ ). A Figura 28 apresenta um quadro com cada um dos parâmetros analisados neste capítulo, indicando em qual ou quais parcelas do balanço térmico cada parâmetro influencia, e ainda se influencia na forma de perda (–) ou ganho (+) de calor.

Figura 28 - Quadro de participação dos parâmetros nas parcelas do balanço térmico

| Parâmetro                                    | Símbolo         | Parcela / Influência |           |           |           |
|--|-----------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|
|  |                 | $P_c$ (–)            | $P_r$ (–) | $P_s$ (+) | $P_j$ (+) |
| Temperatura máxima na superfície do condutor | $T_s$           | <b>X</b>             | <b>X</b>  |           | <b>X</b>  |
| Emissividade do condutor                     | $\varepsilon_s$ |                      | <b>X</b>  |           |           |
| Absortividade do condutor                    | $\alpha_s$      |                      |           | <b>X</b>  |           |
| Temperatura ambiente                         | $T_a$           | <b>X</b>             | <b>X</b>  |           |           |
| Velocidade do vento                          | $V$             | <b>X</b>             |           |           |           |
| Ângulo de ataque do vento                    | $\delta$        | <b>X</b>             |           |           |           |
| Inclinação do condutor com o horizonte *     | $\beta$         | <b>X</b>             |           |           |           |
| Altitude                                     | $y$             | <b>X</b>             |           | <b>X</b>  |           |
| Azimute do condutor                          | $\gamma_c$      |                      |           | <b>X</b>  |           |
| Latitude                                     | $\varphi$       |                      |           | <b>X</b>  |           |
| Clareza da atmosfera                         | $N_s$ ou $AT$   |                      |           | <b>X</b>  |           |
| Dia do ano                                   | $N$             |                      |           | <b>X</b>  |           |
| Hora do dia                                  | $H$             |                      |           | <b>X</b>  |           |
| Reflectância do solo ou Albedo *             | $F$             |                      |           | <b>X</b>  |           |

\* parâmetros utilizados apenas no método CIGRÉ.

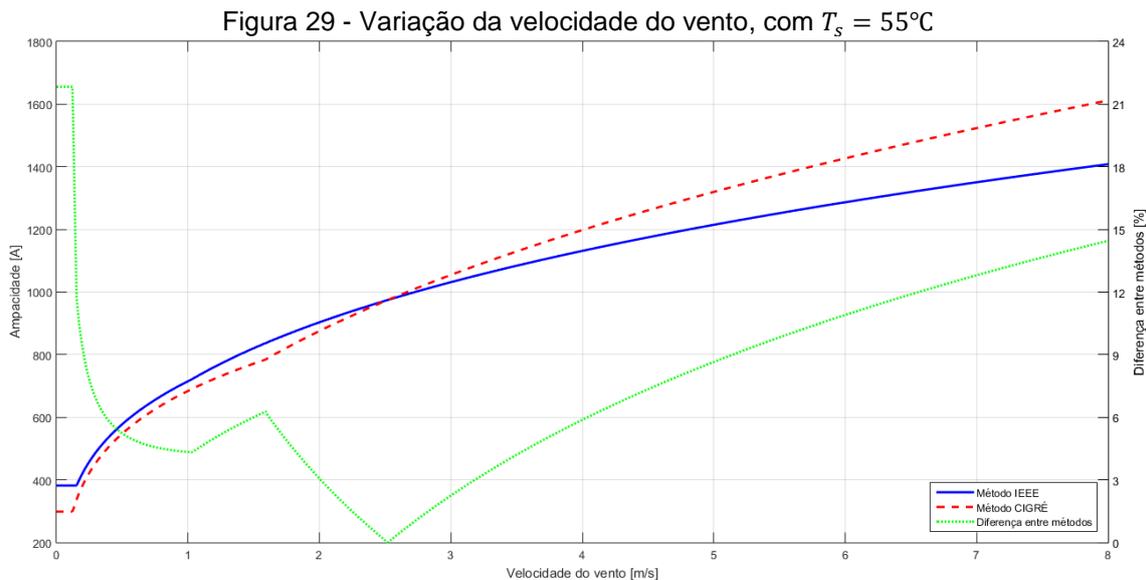
Fonte: Autor

De uma forma indireta, todos os parâmetros acabam por influenciar nas perdas por efeito *Joule*,  $P_j$ , haja vista que essa perda é calculada com base na capacidade máxima de corrente que, por sua vez, é calculada com base em  $P_c$ ,  $P_r$  e  $P_s$ . Assim, qualquer alteração em algum parâmetro que altere um desses três componentes, influencia em  $P_j$ .

## 5. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE PARÂMETROS

Pela análise do capítulo anterior, nota-se que, dadas as condições apresentadas na Tabela 13, com as variações, um a um, dos parâmetros de acordo com a Tabela 14, a variação da velocidade do vento ( $V$ ) mostra diferenças muito significativas entre os métodos, da ordem de 13%, quando  $V = 8 \text{ m/s}$ . Além desse, os parâmetros de temperatura na superfície do condutor,  $T_s$ , ângulo de ataque do vento,  $\delta$ , e reflectância do solo,  $F$ , também apresentaram diferenças percentuais máximas de 4%, 3,16% e 4,35%, respectivamente. Porém, a combinação da alteração de mais de um parâmetro pode causar diferenças no comportamento das curvas de ampacidade.

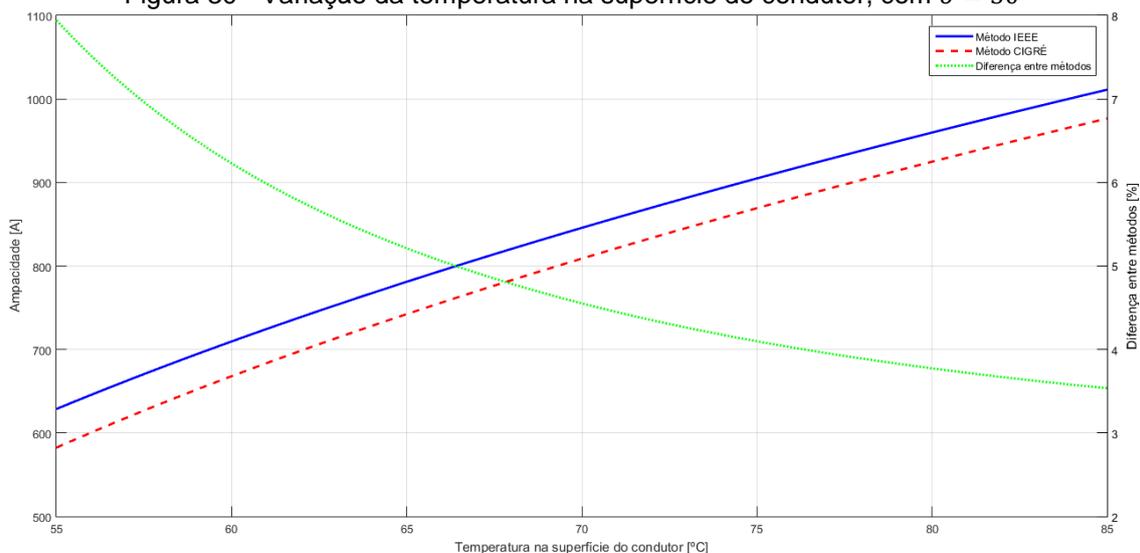
A Figura 29 mostra as curvas do cálculo de ampacidade pelos dois métodos em função da velocidade do vento,  $V$ , porém diminuindo-se o parâmetro da temperatura na superfície do condutor,  $T_s$ , de  $85^\circ\text{C}$  para  $55^\circ\text{C}$ . O comportamento das curvas é semelhante ao já apresentado na Figura 15, porém a diferença percentual entre os métodos sofre alterações um pouco mais significativas. Para o início da faixa de valores de  $V$ , até aproximadamente  $V = 0,2 \text{ m/s}$ , os valores de ampacidade se diferenciam muito, sendo os valores calculados pelo método IEEE 21,8% acima dos valores calculados pelo método CIGRÉ. Assim como na situação anterior, as curvas de ampacidade se cruzam em  $V = 2,5 \text{ m/s}$ . A partir desse ponto, os valores obtidos pelo método CIGRÉ passam a ser superiores ao do método IEEE. No final da faixa analisada, com  $V = 8 \text{ m/s}$ , a diferença percentual entre os métodos fica em 14,46%, diferença superior ao encontrado na simulação com  $V = 1 \text{ m/s}$ .



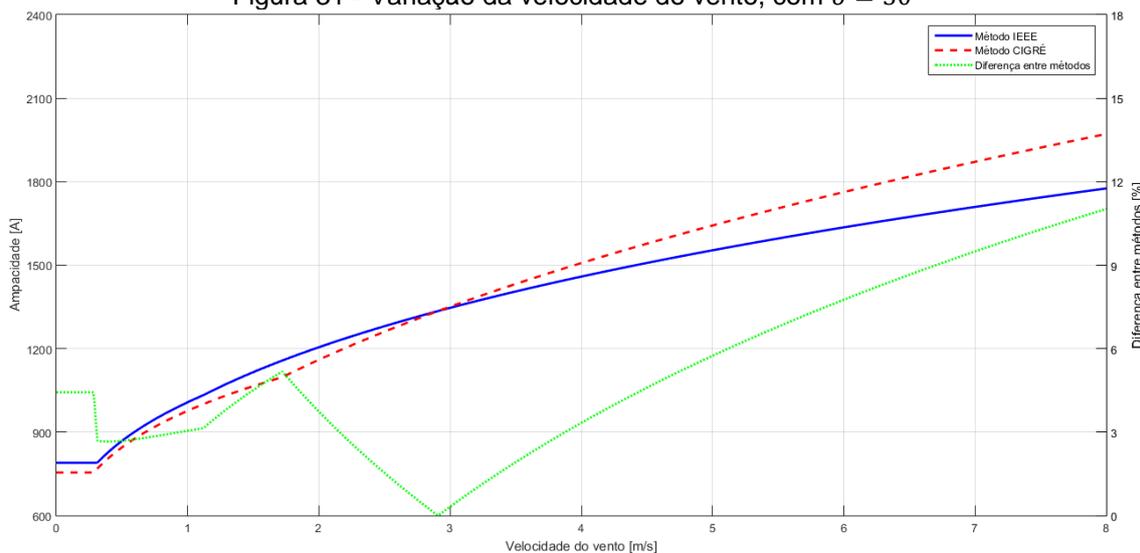
Fonte: Autor

Outra alteração de parâmetros que causa aumento das diferenças entre os métodos, refere-se ao ângulo de ataque do vento,  $\delta$ . Mantendo-se os parâmetros padrão conforme a Tabela 13, alterando-se apenas o ângulo  $\delta$  de  $60^\circ$  para  $30^\circ$ , e variando-se a temperatura na superfície do condutor,  $T_s$ , conforme a Tabela 14, obtém-se o resultado apresentado na Figura 30. Na simulação apresentada na Figura 11, a diferença entre os métodos varia de 4% a 1,6%, do início ao final da faixa analisada. Para esta outra situação, com  $\delta = 30^\circ$ , as diferenças percentuais entre os métodos são de 7,9% para o início da faixa, e de 3,5% para  $T_s = 85^\circ\text{C}$ . Em uma simulação alterando-se o ângulo de ataque do vento para  $\delta = 0^\circ$ , na qual supõe-se um vento que flua paralelamente ao condutor, a diferença entre os métodos chega a 9,9% quando  $T_s = 55^\circ\text{C}$ .

Mantendo-se  $\delta = 30^\circ$  e variando-se a velocidade do vento,  $V$ , com  $T_s = 85^\circ\text{C}$ , tem-se o resultado apresentado na Figura 31. Nota-se que a diminuição do ângulo de ataque do vento, de  $60^\circ$  para  $30^\circ$ , causou uma diminuição na diferença percentual entre os métodos, passando para 11% para a situação com  $V = 8 \text{ m/s}$ .

Figura 30 - Variação da temperatura na superfície do condutor, com  $\delta = 30^\circ$ 

Fonte: Autor

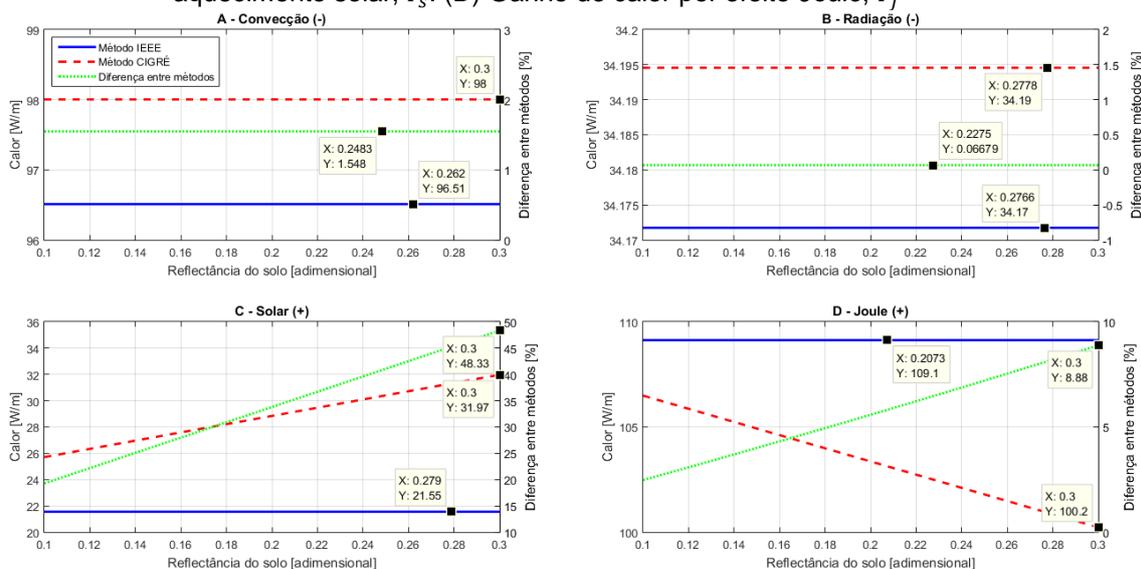
Figura 31 - Variação da velocidade do vento, com  $\delta = 30^\circ$ 

Fonte: Autor

As variáveis que, conforme o quadro da Figura 28, influenciam nos cálculos do ganho de calor por aquecimento solar,  $P_s$ , aumentam ainda mais as diferenças percentuais entre os métodos quando observada apenas a parcela referente a  $P_s$ . No caso da variação da reflectância do solo,  $F$ , que é um parâmetro utilizado apenas pelo método CIGRÉ, a diferença percentual na parcela  $P_s$  chega a 48,3% para  $F = 0,3$ . Porém, essa diferença não impacta de forma significativa as diferenças percentuais no cálculo da ampacidade, que é de 4,35% para o mesmo valor de  $F$ , pois  $P_s$ , neste caso, representa apenas 12% das parcelas de calor, conforme verifica-se na Figura 32, que mostra as curvas

referentes às quatro parcelas de calor em função da variação de  $F$ , para ambos os métodos, e também a diferença percentual entre cada método. Foram colados ponteiros nos gráficos de forma a indicar os valores nos pontos marcados, onde “X” refere-se ao valor de  $F$ , e “Y” ao valor de calor, em  $W/m$ , ou à diferença entre os métodos, em %, dependendo da curva.

Figura 32 - Parcelas de calor em função da reflectância do solo,  $F$ . (A) Perda de calor por convecção,  $P_c$ . (B) Perda de calor por radiação,  $P_r$ . (C) Ganho de calor por aquecimento solar,  $P_s$ . (D) Ganho de calor por efeito *Joule*,  $P_j$



Fonte: Autor

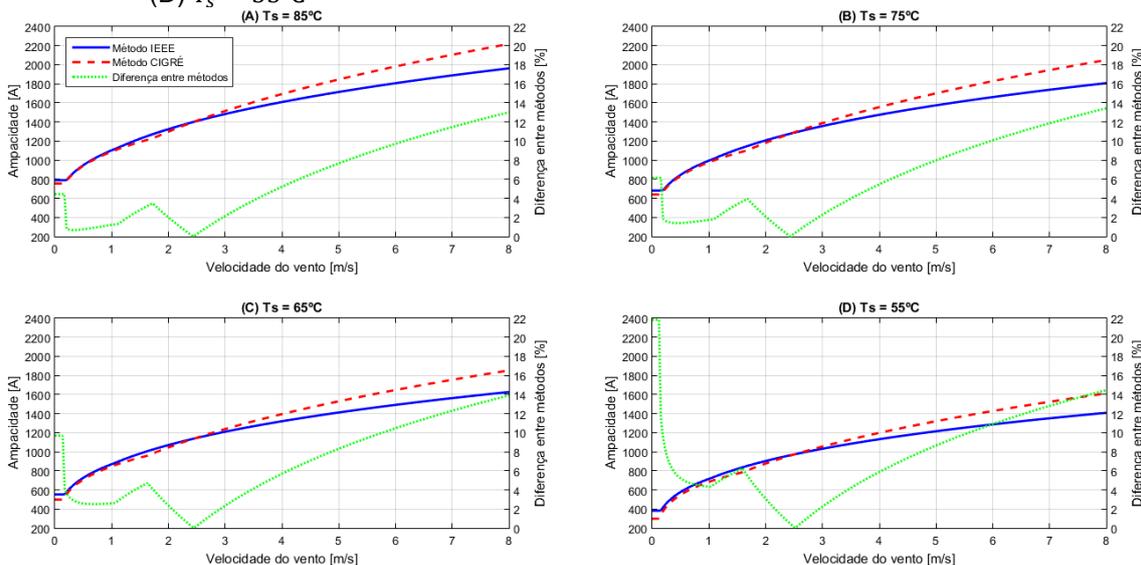
## 6. ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE CONDUTORES

No capítulo anterior foram analisados os impactos da variação de mais de um parâmetro para o cálculo da ampacidade. Três simulações se mostraram interessante do ponto de vista da diferença nos valores calculados pelos dois métodos: a variação da velocidade do vento,  $V$ , com valores da temperatura na superfície do condutor,  $T_s$ , variados; a variação da temperatura na superfície do condutor,  $T_s$ , com ângulos de ataque do vento,  $\delta$ , variados; e a variação da velocidade do vento,  $V$ , ângulos de ataque do vento,  $\delta$ , variados. Estas três situações serão analisadas para outros cinco tipos de condutores diferentes, sendo eles: CA Anemone, T-CAA T-Drake, T-CAA AeroZ™ Drake, ACCC® Drake e ACCR Drake.

Neste ponto cabe uma observação em relação aos condutores chamados HTLS. Esse tipo de condutor possui um núcleo de material compósito e um perfil de vento (Z e trapezoidal) que afetam a forma de transferência de calor no condutor. Entretanto, não se encontra na literatura um maior detalhamento em relação à utilização de uma modelagem específica do cálculo de ampacidade para esse tipo de condutor. Desta forma, neste trabalho foram utilizados os mesmos princípios e forma de abordagem dos condutores tipo CAA, a exemplo do que foi empregado na tese de mestrado de Banerjee (2014).

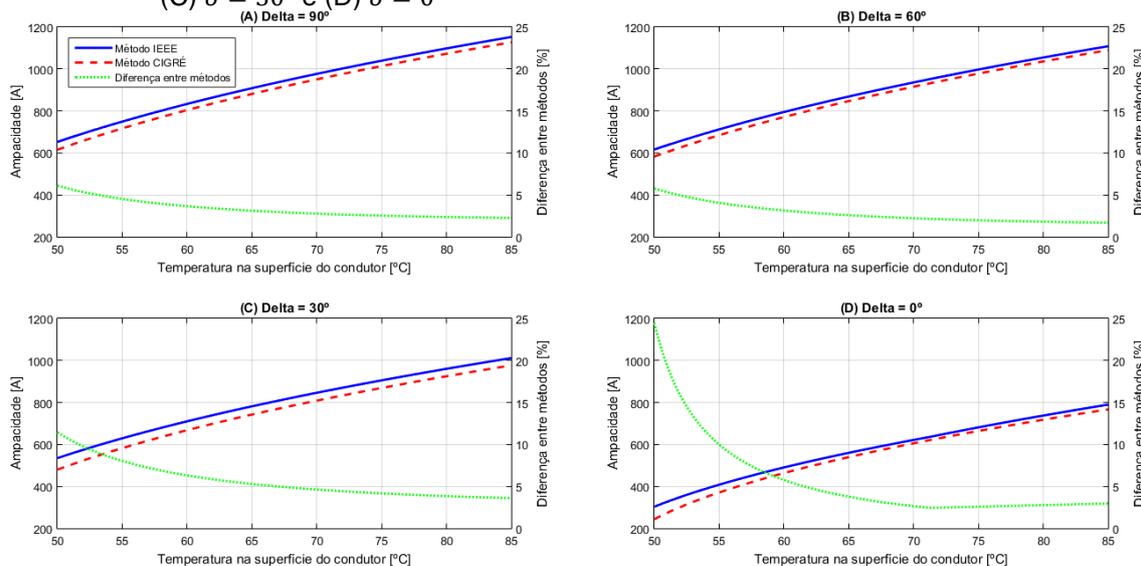
Para uma melhor análise e comparação, primeiro serão apresentados os gráficos referentes ao condutor CAA Drake, condutor padrão, que foi objeto de estudo até este momento. A Figura 33 apresenta um conjunto de gráficos na qual há as curvas de ampacidade em cada um dos métodos em função da variação da velocidade do vento,  $V$ , em quatro situações de valores de temperatura na superfície do condutor, sendo  $T_s = 85^\circ\text{C}$ ,  $T_s = 75^\circ\text{C}$ ,  $T_s = 65^\circ\text{C}$  e  $T_s = 55^\circ\text{C}$ . Nota-se que, com a diminuição de  $T_s$ , a diferença percentual entre os métodos aumenta, de 13% com  $V = 8 \text{ m/s}$  e  $T_s = 85^\circ\text{C}$  (gráfico (A)), para 14,46% com  $V = 8 \text{ m/s}$  e  $T_s = 55^\circ\text{C}$  (gráfico (D)). Também o pico de diferença que há em  $V = 1,72 \text{ m/s}$  e  $T_s = 85^\circ\text{C}$  aumenta de 3,48% para 6,28% com  $T_s = 55^\circ\text{C}$ . Percebe-se também que esse pico, com a diminuição de  $T_s$ , tende a acontecer com velocidades mais baixas. Para o gráfico (D) esse pico ocorre em  $V = 1,59 \text{ m/s}$ .

Figura 33 - Variação da velocidade do vento, com (A)  $T_s = 85^\circ\text{C}$ , (B)  $T_s = 75^\circ\text{C}$ , (C)  $T_s = 65^\circ\text{C}$  e (D)  $T_s = 55^\circ\text{C}$



Fonte: Autor

Figura 34 - Variação da temperatura na superfície do condutor, com (A)  $\delta = 90^\circ$ , (B)  $\delta = 60^\circ$ , (C)  $\delta = 30^\circ$  e (D)  $\delta = 0^\circ$



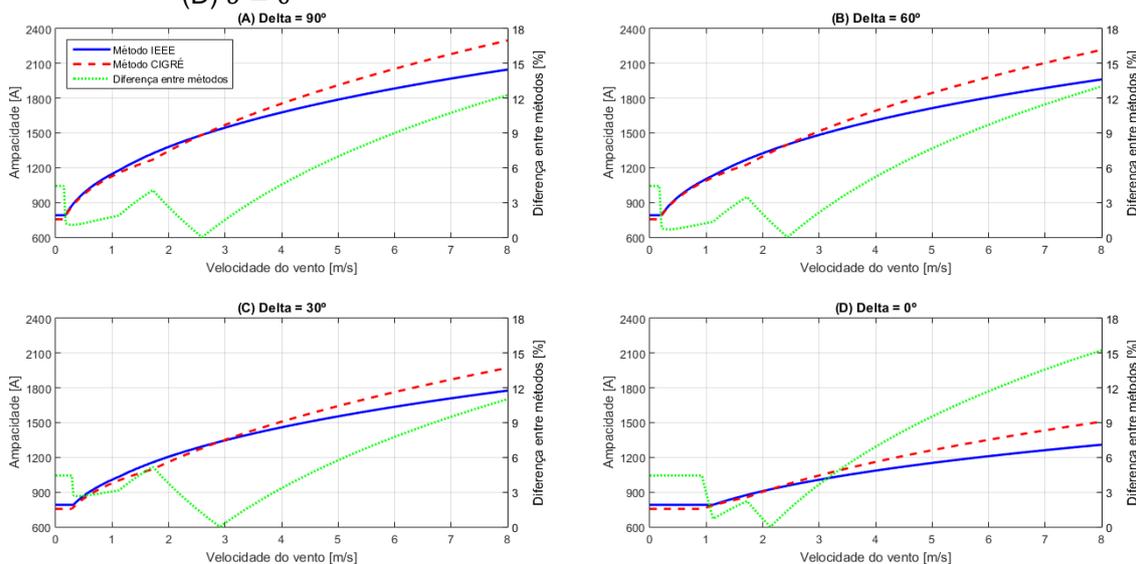
Fonte: Autor

Na Figura 34 é possível verificar a ampacidade em função da variação de  $T_s$ , com quatro valores de ângulo de ataque do vento:  $\delta = 90^\circ$ ,  $\delta = 60^\circ$ ,  $\delta = 30^\circ$  e  $\delta = 0^\circ$ . É verificado uma pequena diminuição na diferença percentual para  $T_s = 85^\circ\text{C}$  no gráfico (B), com  $\delta = 60^\circ$ , em relação ao gráfico (A), com  $\delta = 90^\circ$ . Porém, para  $\delta = 30^\circ$  (gráfico (C)) essa diferença volta a subir e cai levemente para  $\delta = 0^\circ$ . Analisando-se o início da faixa da temperatura na superfície do condutor, com  $T_s = 55^\circ$ , observa-se um aumento na diferença percentual entre os métodos com

a diminuição do ângulo de ataque do vento, sendo de 6,1% no gráfico (A) e 24,5% no gráfico (D).

A Figura 35 apresenta a ampacidade em função da variação da velocidade do vento,  $V$ , porém em quatro situações de ângulo de ataque do vento,  $\delta$ . Assim como ocorre com a diminuição de  $T_s$  na Figura 33, a diminuição de  $\delta$  também provoca o aumento da diferença percentual entre os métodos para  $V = 8 \text{ m/s}$ , de 12,3% no gráfico (A), para 15,2% no gráfico (D). O pico de diferença que ocorre para  $V = 1,72 \text{ m/s}$  tem seu valor máximo para  $\delta = 30^\circ$ , com 5,2%, e valor mínimo para  $\delta = 0^\circ$ , com 2,2%. Para o início da faixa de  $V$ , tanto os valores das ampacidades, quanto as diferenças percentuais entre os métodos são os mesmos para os quatro gráficos, já que, para baixos valores de  $V$ , a convecção natural é que domina, e o parâmetro  $\delta$  não influencia nessa parcela. A diferença percebida é que, com a diminuição do ângulo de ataque do vento, os valores da ampacidade começam a evoluir apenas para velocidades de ventos mais elevadas. No gráfico (A), a evolução começa a partir de  $V = 0,15 \text{ m/s}$ , ao passo que no gráfico (D) as curvas começam a evoluir apenas em  $V = 0,93 \text{ m/s}$ .

Figura 35 - Variação da velocidade do vento, com (A)  $\delta = 90^\circ$ , (B)  $\delta = 60^\circ$ , (C)  $\delta = 30^\circ$  e (D)  $\delta = 0^\circ$



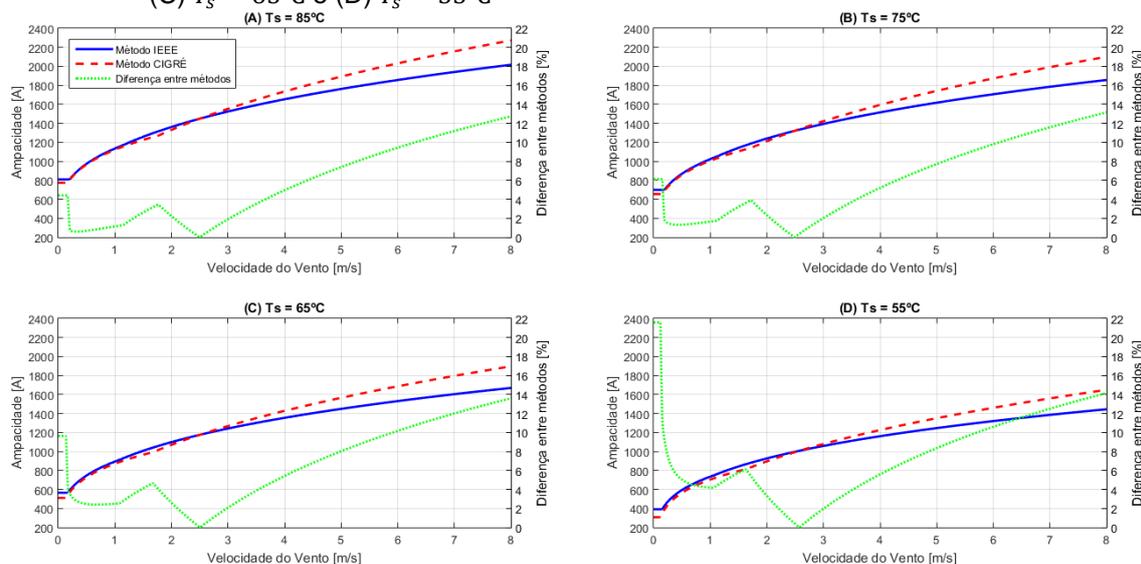
Fonte: Autor

## 6.1 CA ANEMONE

Este condutor pertence à família dos CA - Condutor de Alumínio Nu ou AAC – *All Aluminum Conductor* e possui a diâmetro externo semelhante ao do CAA Drake (28,1 mm), de 27,37 mm, apresentando também uma ampacidade por catálogo<sup>1</sup> semelhante ao CAA Drake (910A), de 920A.

A variação da velocidade do vento,  $V$ , para quatro valores de  $T_s$ , pode ser visualizado na Figura 36. Similar ao que ocorre com o condutor CAA Drake, a diferença percentual entre os métodos aumenta com a diminuição de  $T_s$ , para  $V = 8 \text{ m/s}$ , sendo de 12,74% no gráfico (A), para  $T_s = 85^\circ\text{C}$ , e 14,14% para  $T_s = 55^\circ\text{C}$ , no gráfico (D). Também de forma análoga ao CAA Drake, a diferença no pico que há em  $V = 1,77 \text{ m/s}$  no gráfico (A), que é de 3,46%, sobre para 6,15% no gráfico (D), porém deslocando o ponto para  $V = 1,63 \text{ m/s}$ .

Figura 36 - Variação da velocidade do vento - CA Anemone, com (A)  $T_s = 85^\circ\text{C}$ , (B)  $T_s = 75^\circ\text{C}$ , (C)  $T_s = 65^\circ\text{C}$  e (D)  $T_s = 55^\circ\text{C}$



Fonte: Autor

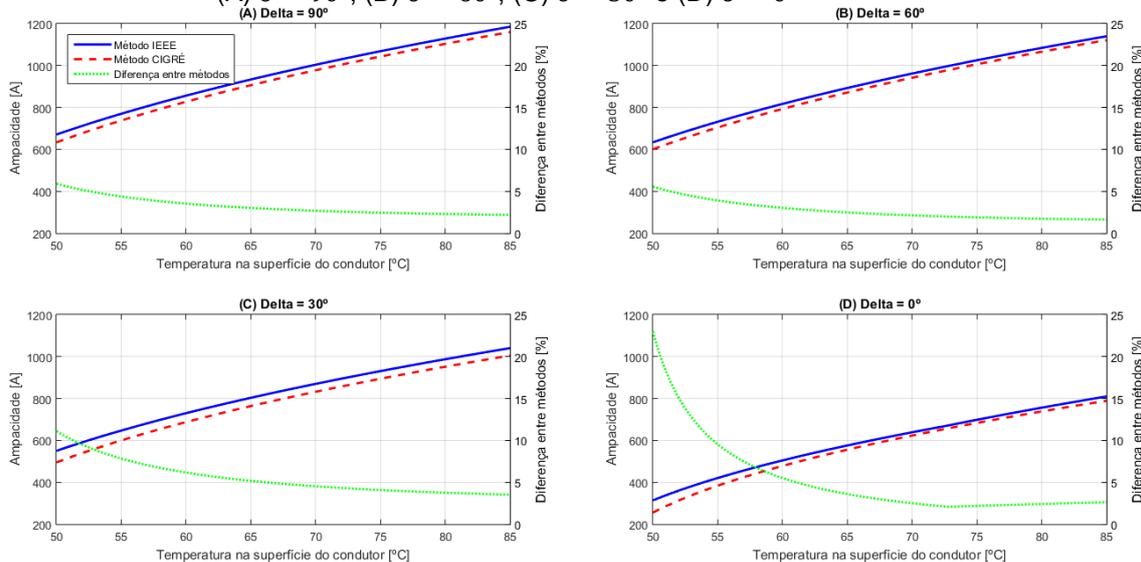
A Figura 37 mostra a variação da temperatura na superfície do condutor,  $T_s$ , com quatro variações de ângulo de ataque do vento,  $\delta$ . O comportamento das curvas de diferenças percentuais são semelhantes ao que ocorre com o condutor CAA Drake. Para diferenças em  $T_s = 85^\circ\text{C}$ , os quatro gráficos apresentam o mesmo comportamento que o CAA Drake, com uma leve diminuição da diferença

<sup>1</sup> Catálogo de Cabos Aéreos Nus – Cabos de Alumínio, da Nexans Brasil.

entre  $\delta = 90^\circ$  e  $\delta = 60^\circ$ , aumentando novamente para  $\delta = 30^\circ$ , e uma leve baixa para  $\delta = 0^\circ$ . Para o início da faixa de  $T_s$  o comportamento se repete ao do CAA Drake, aumentando a diferença percentual entre os métodos à medida que o ângulo de ataque do vento diminui, com 5,9% para  $\delta = 90^\circ$  e 23% para  $\delta = 0^\circ$ , valores um pouco abaixo dos encontrados para o condutor padrão.

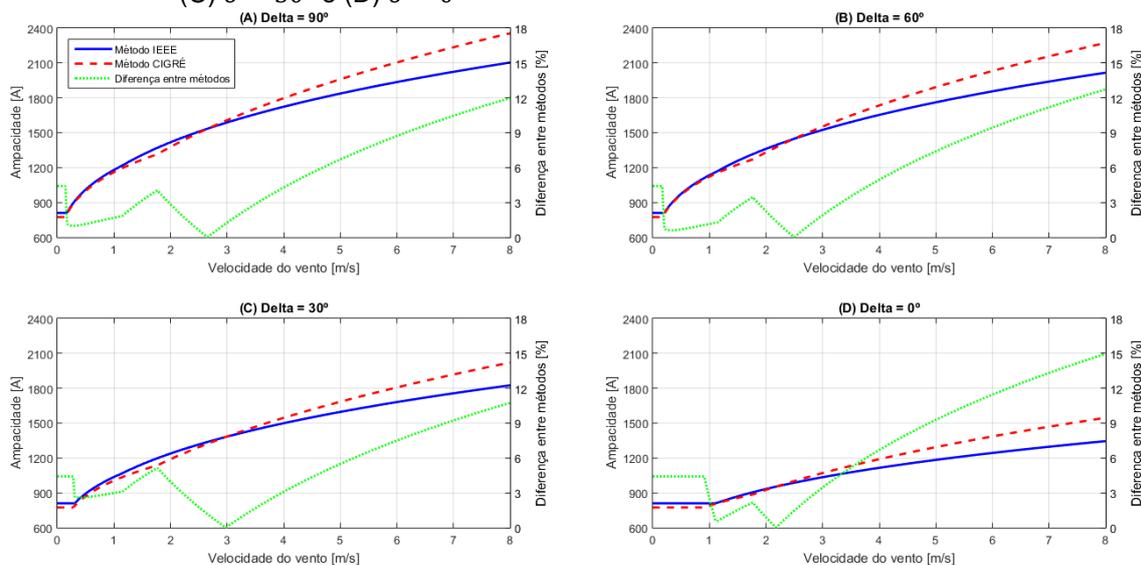
Na análise da variação da velocidade do vento,  $V$ , com quatro valores de  $\delta$  distintos, nota-se que a diminuição do ângulo de ataque do vento aumenta a diferença percentual para  $V = 8 \text{ m/s}$ , com exceção de  $\delta = 30^\circ$ , que apresenta a menor diferença entre os quatro valores de  $\delta$  verificados, com 10,75%. Para  $\delta = 90^\circ$  a diferença é de 12%, e para  $\delta = 0^\circ$  a diferença sobe para 15%, conforme a Figura 38. Nota-se ainda o fenômeno de mesmos valores de ampacidade e diferença percentual no início da faixa de  $V$ , aumentando o valor de  $V$  com a diminuição de  $\delta$ , para que as curvas de ampacidade comecem a evoluir.

Figura 37 - Variação da temperatura na superfície do condutor – CA Anemone, com (A)  $\delta = 90^\circ$ , (B)  $\delta = 60^\circ$ , (C)  $\delta = 30^\circ$  e (D)  $\delta = 0^\circ$



Fonte: Autor

Figura 38 - Variação da velocidade do vento – CA Anemone, com (A)  $\delta = 90^\circ$ , (B)  $\delta = 60^\circ$ , (C)  $\delta = 30^\circ$  e (D)  $\delta = 0^\circ$



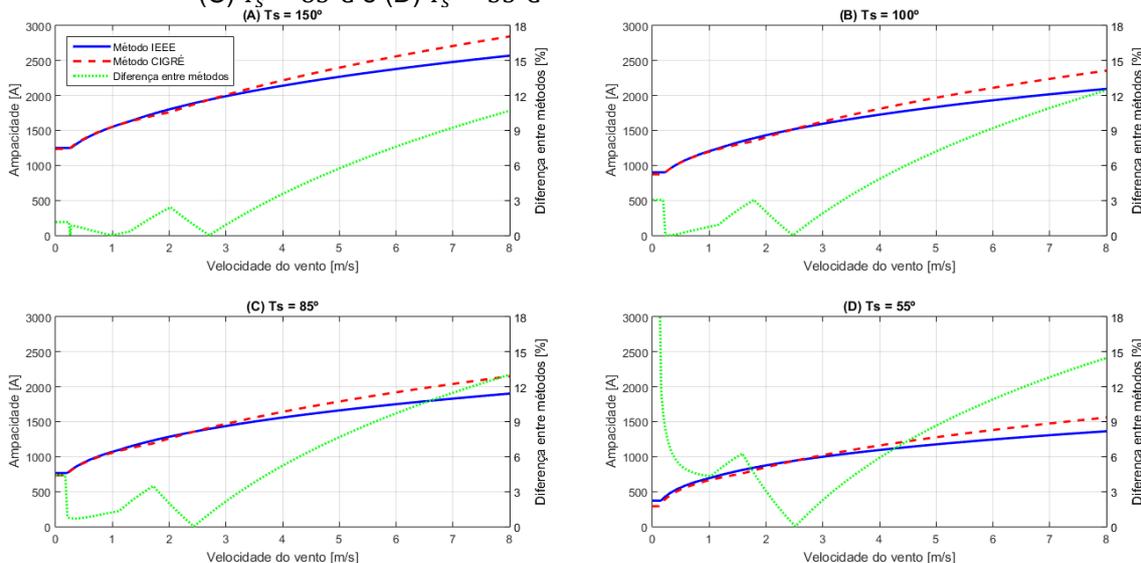
Fonte: Autor

## 6.2 T-CAA T-DRAKE

Esse condutor possui a mesma característica de formação que o CAA Drake e mesmo diâmetro externo nominal. Sua principal diferença está na utilização de uma liga de alumínio termorresistente que possibilita a sua operação em regime permanente a  $150^\circ\text{C}$ , o que pode aumentar em até 50% a sua ampacidade. As simulações efetuadas nesta seção foram realizadas utilizando  $T_s = 150^\circ\text{C}$ , quando não indicado um valor de  $T_s$  diferente.

Por apresentar características construtivas praticamente idênticas ao condutor padrão, nota-se na Figura 39 o mesmo comportamento já observado no condutor CAA, inclusive para as mesmas diferenças percentuais entre os métodos, considerando os mesmos valores de  $T_s$ , isto é, nos casos em que  $T_s = 85^\circ\text{C}$  e  $T_s = 55^\circ\text{C}$  e  $V = 8 \text{ m/s}$ , com 13% e 14,46%, mesmo com pequenas diferenças nos valores de ampacidade. Percebe-se que, assim como já verificado nos outros condutores, a diminuição da temperatura na superfície do condutor, com  $V = 8 \text{ m/s}$ , aumenta a diferença percentual entre os métodos. O pico de diferença percentual que, no gráfico (A), é de 2,42% e ocorre em  $V = 2,03 \text{ m/s}$ . Com o aumento de  $T_s$  esse pico aumenta e desloca-se em direção a  $V = 0 \text{ m/s}$ . Para  $T_s = 55^\circ\text{C}$  a diferença é de 6,27% e ocorre em  $V = 1,57 \text{ m/s}$ .

Figura 39 - Variação da velocidade do vento – T-Drake, (A)  $T_s = 150^\circ\text{C}$ , (B)  $T_s = 100^\circ\text{C}$ , (C)  $T_s = 85^\circ\text{C}$  e (D)  $T_s = 55^\circ\text{C}$

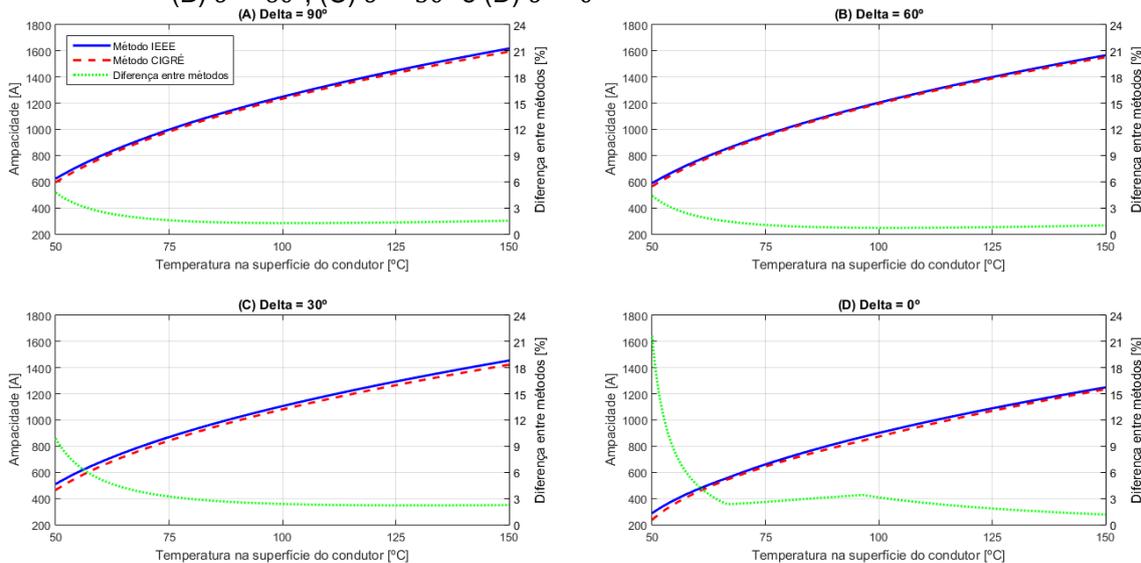


Fonte: Autor

Na análise da variação da temperatura na superfície do condutor, em quatro situações de ângulo de ataque do vento diferentes, o condutor T-Drake apresenta comportamento das curvas da diferença entre os métodos similar às apresentadas pelo CAA Drake, porém seus valores percentuais são inferiores em toda a faixa de  $T_s$  analisada, conforme verifica-se na Figura 40. Inclusive para mesmos valores de  $T_s$  e  $\delta$ , o condutor T-CAA apresenta menor diferença percentual em relação ao CAA como, por exemplo, em  $T_s = 85^\circ\text{C}$  e  $\delta = 60^\circ$  com 0,98% de diferença percentual entre os métodos, contra 1,69% apresentado pelo condutor padrão.

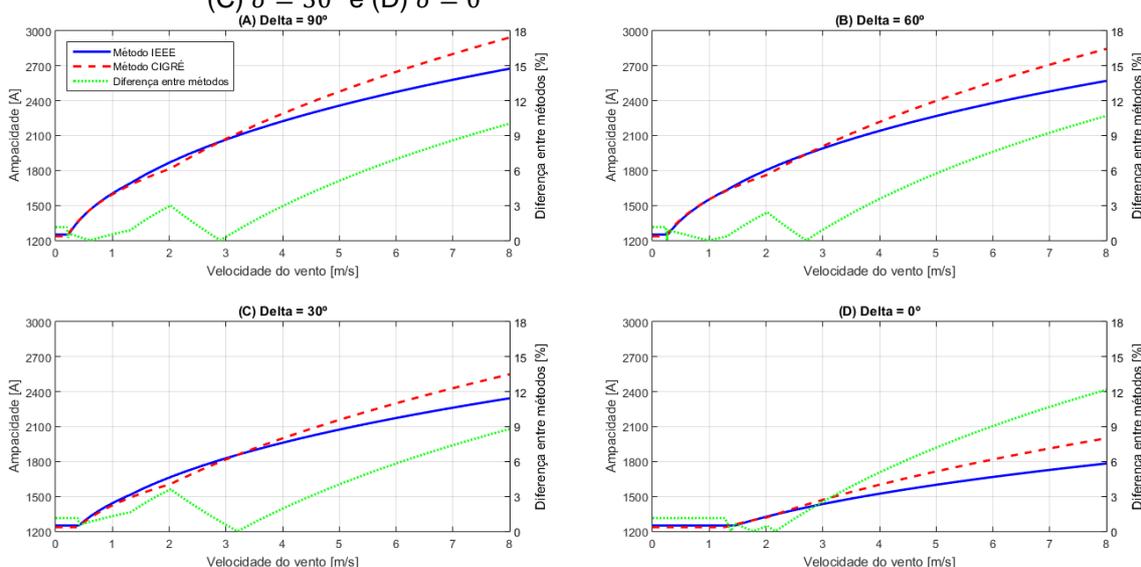
A Figura 41 mostra os valores de ampacidade e a diferença percentual entre os métodos para a variação da velocidade do vento para quatro situações distintas de ângulo de ataque do vento. A curva das diferenças apresenta comportamento semelhante ao do CAA Drake, com diferença nas suas amplitudes, que são menores, e localização dos seus pontos de inflexão, como é o caso do pico que ocorre em  $V = 1,72 \text{ m/s}$  no condutor padrão, e no condutor T-Drake ocorre em  $V = 2,03 \text{ m/s}$ . A máxima diferença percentual é notada em  $V = 8 \text{ m/s}$ , para os quatro valores de  $\delta$  analisados, tendo 12,16% para  $\delta = 0^\circ$  e 8,79% para  $\delta = 30^\circ$ . A velocidade em que as curvas de ampacidade começam a se desenvolver também é afetado pela alteração do ângulo de ataque do vento, sendo de  $V = 0,2 \text{ m/s}$  para  $\delta = 90^\circ$  e de  $V = 1,28 \text{ m/s}$  para  $\delta = 0^\circ$ .

Figura 40 - Variação da temperatura na superfície do condutor – T-Drake, com (A)  $\delta = 90^\circ$ , (B)  $\delta = 60^\circ$ , (C)  $\delta = 30^\circ$  e (D)  $\delta = 0^\circ$



Fonte: Autor

Figura 41 - Variação da velocidade do vento – T-Drake, com (A)  $\delta = 90^\circ$ , (B)  $\delta = 60^\circ$ , (C)  $\delta = 30^\circ$  e (D)  $\delta = 0^\circ$



Fonte: Autor

O condutor T-CA T-Anemone apresentou os mesmos comportamentos das curvas de diferença entre os métodos que o condutor T-Drake, sendo desnecessária a sua análise pormenorizada.

### 6.3 T-CAA AeroZ™ DRAKE

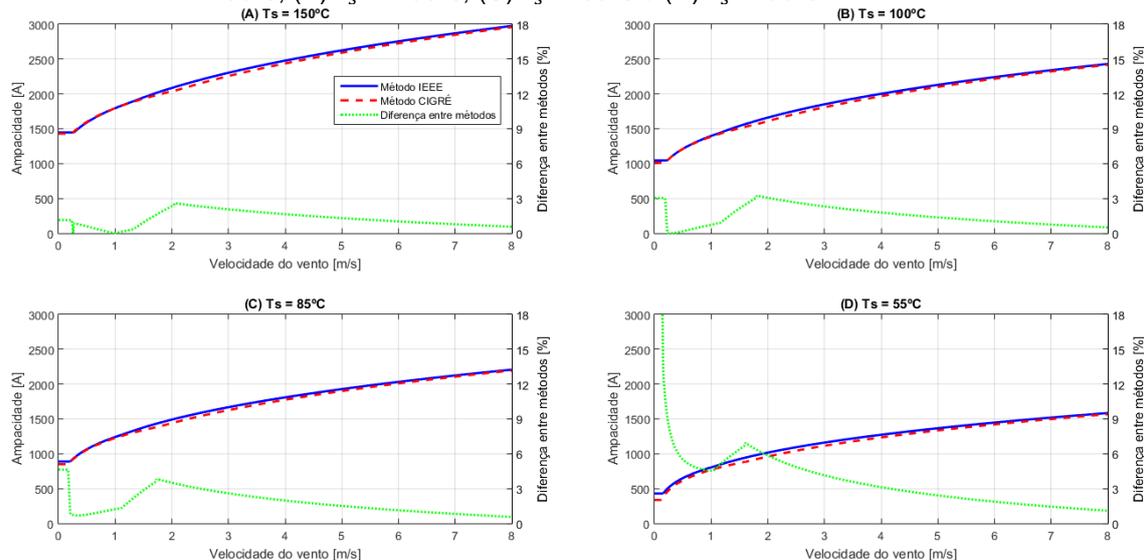
O condutor T-CAA AeroZ™ Drake, da Nexans, possui o mesmo diâmetro externo que o condutor CAA Drake, com alma de aço, porém com os fios

externos em alumínio termorresistente e seção em formato “Z”, podendo operar em regime permanente a 150°C. As simulações efetuadas nesta seção foram realizadas utilizando  $T_s = 150^\circ\text{C}$ , quando não indicado um valor de  $T_s$  diferente.

Na análise da variação de velocidade do vento com quatro valores de  $T_s$  distintos, verificou-se uma mudança significativa no comportamento da curva da diferença percentual entre os métodos, conforme verifica-se na Figura 42. Ao contrário do que acontece com os demais condutores já analisados, após o pico de diferença verificado no entorno de  $V = 2 \text{ m/s}$ , a diferença só diminui, sendo o método CIGRÉ não chega a ser superior ao método IEEE para nenhum valor de  $V$  dentro da faixa analisada, mas chega muito perto, com uma diferença de apenas 0,5% para  $V = 8 \text{ m/s}$  e  $T_s = 100^\circ\text{C}$ . Esse pico tende também a aumentar e se aproximar de  $V = 0 \text{ m/s}$  com a diminuição da temperatura na superfície do condutor, da mesma forma que ocorre com o condutor CAA Drake.

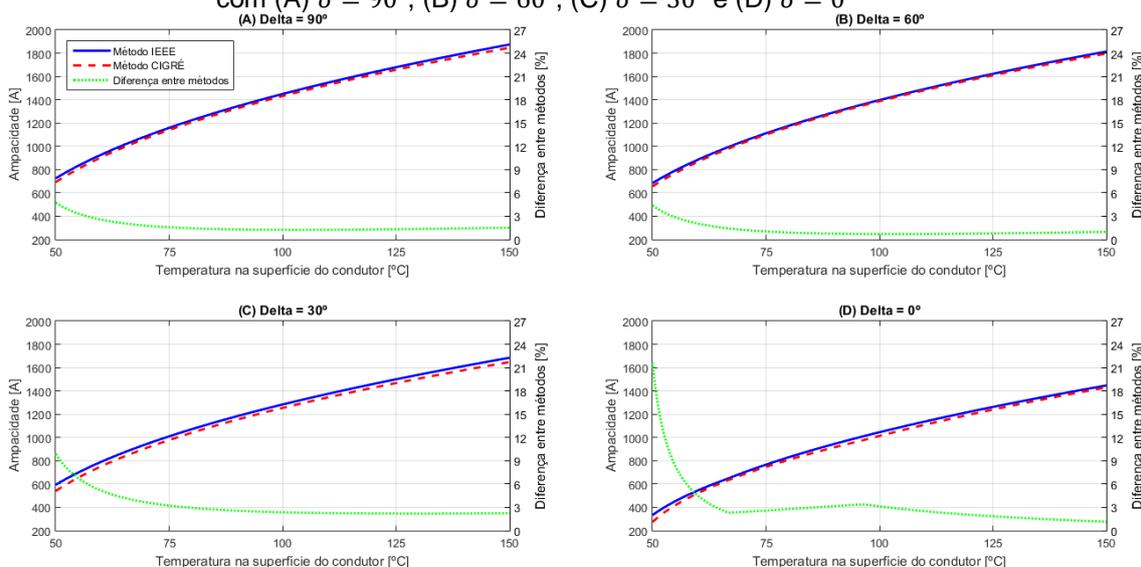
Para a variação da temperatura superficial no condutor e quatro valores distintos de ângulo de ataque do vento, percebe-se uma pequena diminuição da diferença percentual para valores no início da faixa de  $T_s$  em comparação ao condutor padrão, de acordo com a Figura 43. No caso de  $\delta = 60^\circ$  e  $T_s = 50^\circ\text{C}$ , o AeroZ™ Drake apresenta uma diferença entre os métodos de 4,38%, sendo isso 23,96% inferior ao verificado no condutor CAA de mesmo diâmetro. Para valores de  $T_s = 85^\circ\text{C}$  também há uma diminuição da diferença na comparação com o outro condutor. A maior diferença percentual entre os métodos, para  $T_s = 150^\circ\text{C}$ , é verificada para  $\delta = 30^\circ$ , sendo de 2,24%.

Figura 42 - Variação da velocidade do vento – AeroZ™ Drake, com (A)  $T_s = 150^\circ\text{C}$ , (B)  $T_s = 100^\circ\text{C}$ , (C)  $T_s = 85^\circ\text{C}$  e (D)  $T_s = 55^\circ\text{C}$



Fonte: Autor

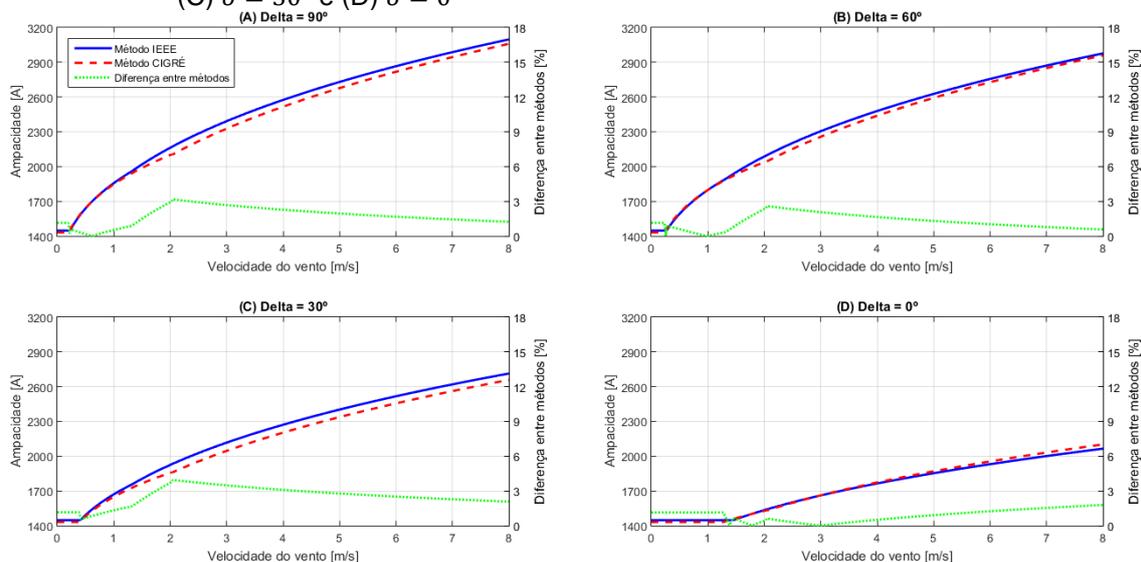
Figura 43 - Variação da temperatura na superfície do condutor – AeroZ™ Drake, com (A)  $\delta = 90^\circ$ , (B)  $\delta = 60^\circ$ , (C)  $\delta = 30^\circ$  e (D)  $\delta = 0^\circ$



Fonte: Autor

A simulação da variação da velocidade do vento em quatro situações de ângulo de ataque do vento é verificada na Figura 44. A diferença percentual entre os métodos para valores de  $V = 0 \text{ m/s}$  são constantes para qualquer um dos valores de  $\delta$  analisados, conforme observou-se com os demais condutores, e essa diferença é consideravelmente inferior, de 1,14%, frente a 4,43% no condutor padrão. O pico de diferença ocorre para  $V = 2,04 \text{ m/s}$ , independentemente do valor de  $\delta$ , com a maior diferença observada no gráfico (C), de 3,94%.

Figura 44 - Variação da velocidade do vento – AeroZ™ Drake, com (A)  $\delta = 90^\circ$ , (B)  $\delta = 60^\circ$ , (C)  $\delta = 30^\circ$  e (D)  $\delta = 0^\circ$



Fonte: Autor

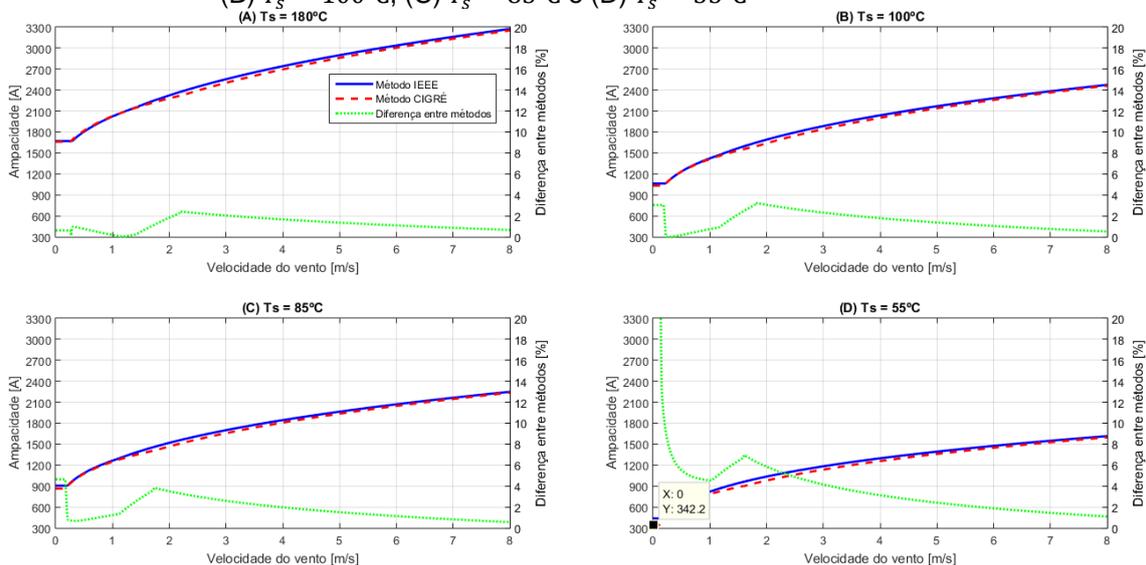
#### 6.4 ACCC® DRAKE

O condutor ACCC® Drake tem mesmo diâmetro externo que o CAA Drake e é composto de fios trapezoidais em alumínio 1350 recozido, têmpera O, com núcleo em compósito de fibra de carbono e fibra de vidro, envolvidos por uma resina epóxi para melhor resistência ao calor. Em regime permanente pode operar em até 180°C e 200°C para regime de emergência. As simulações efetuadas nesta seção foram realizadas utilizando  $T_s = 180^\circ\text{C}$ , quando não indicado um valor de  $T_s$  diferente.

A Figura 45 apresenta os gráficos relativos à variação da velocidade do vento para quatro valores de temperatura na superfície do condutor. Verifica-se comportamento semelhante ao apresentado pelo condutor AeroZ™ Drake, na qual os valores de ampacidade calculados pelo método CIGRÉ não ultrapassam os valores calculados pelo método IEEE. O pico verificado próximo a  $V = 2 \text{ m/s}$  segue a tendência apresentada pelos demais condutores, na qual a diferença percentual entre os métodos aumenta e fica mais próximo de  $V = 0 \text{ m/s}$  com a diminuição de  $T_s$ . Com  $T_s = 180^\circ\text{C}$  o pico da diferença ocorre em  $V = 2,19 \text{ m/s}$ , com 2,42%. Com  $T_s = 55^\circ\text{C}$  esse pico ocorre em  $V = 1,6 \text{ m/s}$ , com 6,96%. No final da faixa de análise da velocidade do vento, em  $V = 8 \text{ m/s}$ , a diferença

percentual é de apenas 0,65% para  $T_s = 180^\circ\text{C}$ . Para  $T_s = 85^\circ\text{C}$  a diferença é de 0,56%, frente a 13% apresentado pelo condutor padrão.

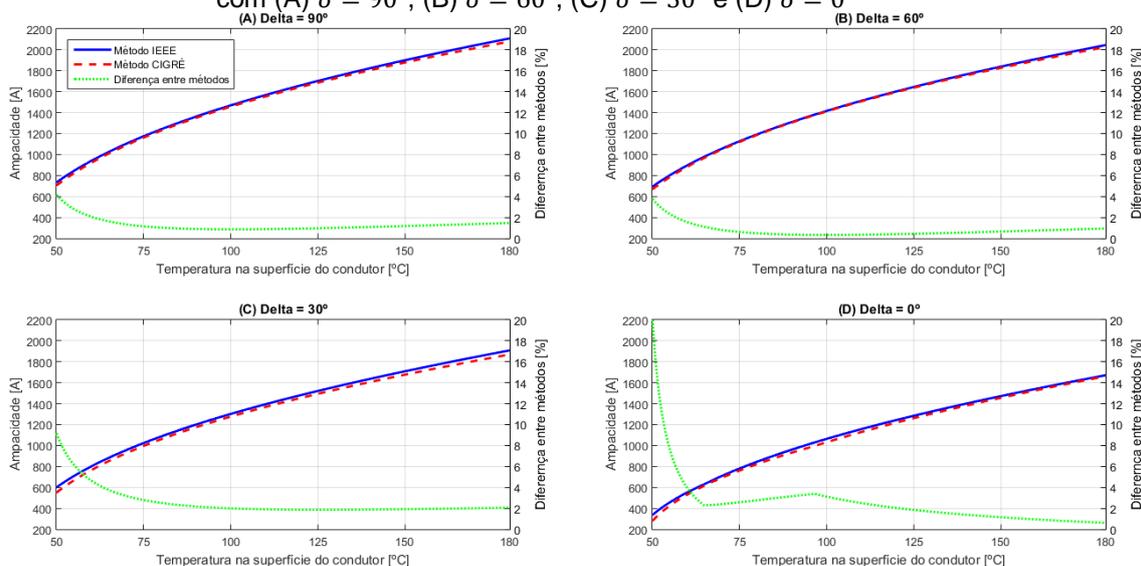
Figura 45 - Variação da velocidade do vento – ACCC® Drake, com (A)  $T_s = 150^\circ\text{C}$ , (B)  $T_s = 100^\circ\text{C}$ , (C)  $T_s = 85^\circ\text{C}$  e (D)  $T_s = 55^\circ\text{C}$



Fonte: Autor

Na análise da Figura 46, que mostra a variação da temperatura no condutor em quatro situações de ângulo de ataque do vento. O comportamento das curvas de diferença percentual entre os métodos também é semelhante ao verificado no condutor AeroZ™ Drake. As diferenças verificadas no início da faixa de análise da temperatura na superfície do condutor, em  $T_s = 50^\circ\text{C}$ , são inferiores às encontradas na simulação com o condutor CAA Drake. Nessa temperatura, a menor diferença percentual é verificada quando  $\delta = 60^\circ$ , com 3,77%, e a maior diferença encontra-se quando  $\delta = 0^\circ$ , de 20,33%. As diferenças para  $T_s = 85^\circ\text{C}$  também são inferiores quando comparadas ao condutor padrão como, por exemplo, para  $\delta = 60^\circ$ , que apresenta apenas 0,4% de diferença, frente a 1,69% verificado no padrão.

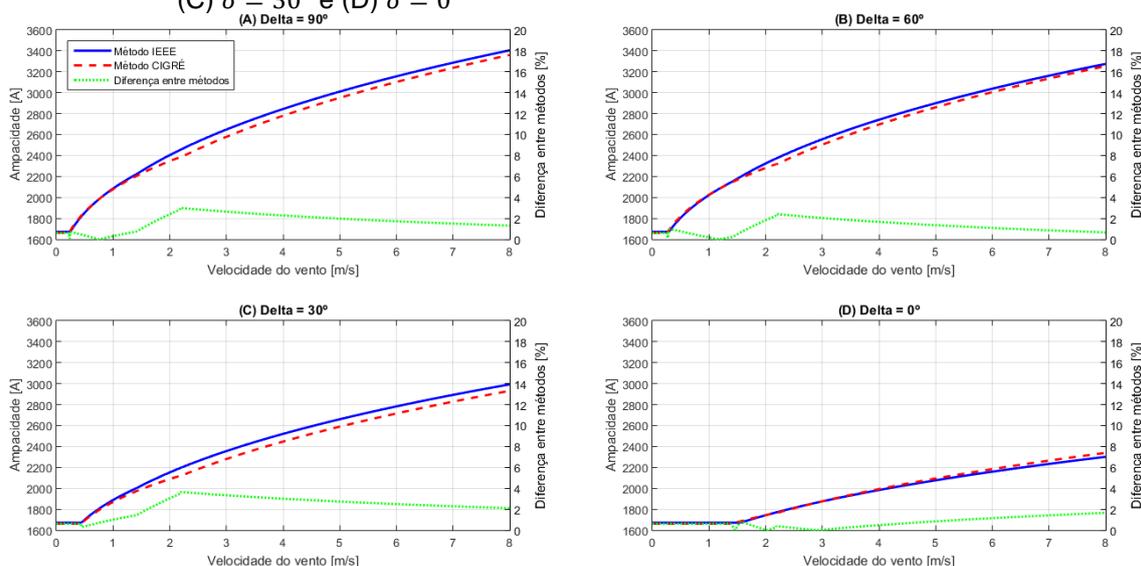
Figura 46 - Variação da temperatura na superfície do condutor – ACCC® Drake, com (A)  $\delta = 90^\circ$ , (B)  $\delta = 60^\circ$ , (C)  $\delta = 30^\circ$  e (D)  $\delta = 0^\circ$



Fonte: Autor

Na simulação da variação da velocidade do vento em quatro situações de ângulo de ataque do vento, verificada na Figura 47, percebe-se novamente comportamento similar ao observado no condutor AeroZ™ Drake. A diferença percentual encontrada para  $V = 0 \text{ m/s}$ , para qualquer um dos valores de  $\delta$  analisados, é a mesma, de 0,61%, muito inferior à diferença de 4,43% encontrada no condutor padrão nas mesmas situações de  $V$  e  $\delta$ . O pico de diferença ocorre para  $V = 2,19 \text{ m/s}$  em todos os gráficos desta figura, aumentando com a diminuição de  $\delta$ , exceto para  $\delta = 0^\circ$ , que tem a menor diferença para esse valor de  $V$ . Outro ponto a observar para este ângulo de ataque é que, a partir de  $V = 2,91 \text{ m/s}$  os valores do método CIGRÉ ultrapassam os valores do método IEEE e a diferença entre os métodos volta a aumentar, chegando a 1,65% para  $V = 8 \text{ m/s}$ .

Figura 47 - Variação da velocidade do vento – ACCC® Drake, com (A)  $\delta = 90^\circ$ , (B)  $\delta = 60^\circ$ , (C)  $\delta = 30^\circ$  e (D)  $\delta = 0^\circ$



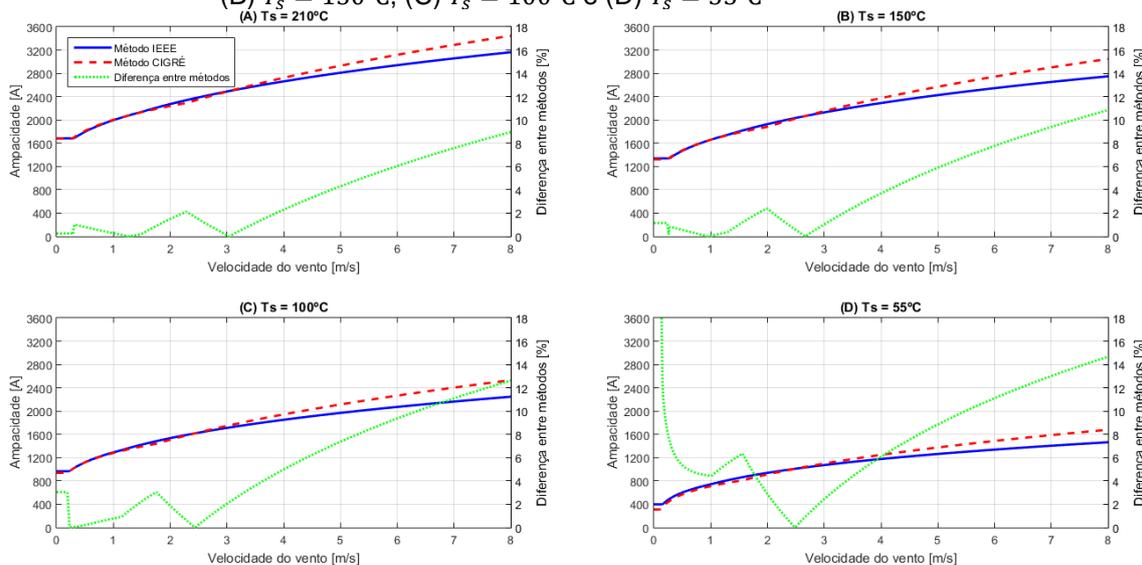
Fonte: Autor

## 6.5 ACCR DRAKE

O condutor ACCR Drake possui diâmetro externo similar ao CAA Drake. Este condutor possui seus fios externos em alumínio-zircônio, que possibilita sua operação em regime permanente a  $210^\circ\text{C}$  e  $240^\circ\text{C}$  em regime de urgência. O ACCR é oferecido com duas opções de seção de fio externo: circular ou trapezoidal. Esta análise foi realizada com o condutor de seção circular. As simulações efetuadas nesta seção foram realizadas utilizando  $T_s = 210^\circ\text{C}$ , quando não indicado um valor de  $T_s$  diferente.

A análise da variação da velocidade do vento em quatro valores de  $T_s$  distintos é observada na Figura 48. O comportamento das curvas de diferença percentual entre os métodos é similar ao do condutor CAA Drake. Para  $T_s = 55^\circ\text{C}$  ambos os condutores apresentam essas curvas com valores muito próximos como, por exemplo, 14,66% de diferença em  $V = 8 \text{ m/s}$  no condutor ACCR Drake, e 14,46% no condutor padrão em mesmas condições. O pico de diferença observado no entorno de  $V = 2 \text{ m/s}$  segue o mesmo padrão dos demais condutores, aumentando a diferença percentual e aproximando-se de  $V = 0 \text{ m/s}$  com a diminuição de  $T_s$ .

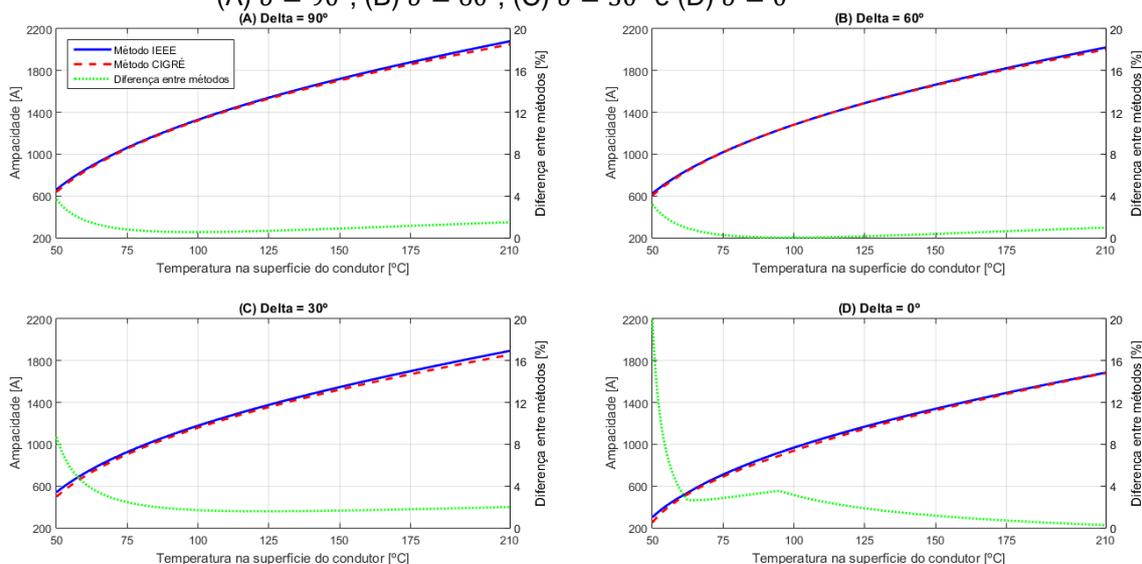
Figura 48 - Variação da velocidade do vento – ACCR Drake, com (A)  $T_s = 210^\circ\text{C}$ , (B)  $T_s = 150^\circ\text{C}$ , (C)  $T_s = 100^\circ\text{C}$  e (D)  $T_s = 55^\circ\text{C}$



Fonte: Autor

A variação da temperatura na superfície do condutor em quatro situações de  $\delta$  é observada na Figura 49. As diferenças percentuais entre os métodos, para  $T_s = 55^\circ\text{C}$  e  $T_s = 85^\circ\text{C}$ , em todos os valores de  $\delta$  analisados, são inferiores aos apresentados pelo condutor CAA Drake. Para  $\delta = 60^\circ$ , no gráfico (B), e  $T_s = 96,77^\circ\text{C}$  ambos os métodos apresentam os mesmos resultados, voltando a se distanciar levemente para 0,96% em  $T_s = 210^\circ\text{C}$ .

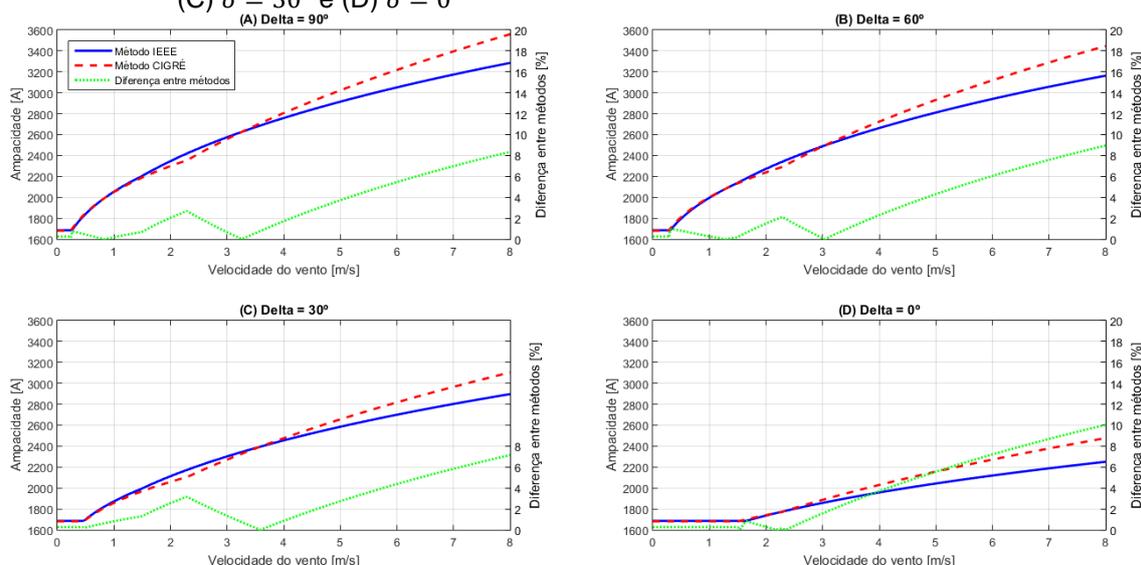
Figura 49 - Variação da temperatura na superfície do condutor – ACCR Drake, com (A)  $\delta = 90^\circ$ , (B)  $\delta = 60^\circ$ , (C)  $\delta = 30^\circ$  e (D)  $\delta = 0^\circ$



Fonte: Autor

A Figura 50 apresenta os gráficos da variação da velocidade do vento em quatro situações de ângulo de ataque do vento. Para  $V = 0 \text{ m/s}$ , independentemente do valor de  $\delta$ , a diferença percentual entre os métodos é de apenas 0,25%. Assim como observou-se nos demais condutores, com a diminuição do ângulo de ataque do vento, o valor da ampacidade calculada, em ambos os métodos, começa a evoluir com velocidades de ventos mais altos. Para  $\delta = 90^\circ$ , os valores começam a evoluir com  $V = 0,23 \text{ m/s}$  e, para  $\delta = 0^\circ$ , com  $V = 1,65 \text{ m/s}$ . Assim como o condutor CAA Drake, para  $V = 8 \text{ m/s}$  a diferença entre os métodos é grande, sendo de 8,35% para  $\delta = 90^\circ$ , e de 10% para  $\delta = 0^\circ$ . Mesmo altas, as diferenças percentuais entre os métodos são inferiores às apresentadas pelo condutor CAA Drake.

Figura 50 - Variação da velocidade do vento – AeroZ™ Drake, com (A)  $\delta = 90^\circ$ , (B)  $\delta = 60^\circ$ , (C)  $\delta = 30^\circ$  e (D)  $\delta = 0^\circ$



Fonte: Autor

## 6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Referente à análise da variação da velocidade do vento,  $V$ , para quatro valores de temperatura na superfície do condutor,  $T_s$ , cabe o destaque aos condutores AeroZ™ Drake e ACCC® Drake, haja vista que esses condutores foram os que apresentaram menor diferença percentual entre os métodos, dentro das faixas analisadas. Para temperatura de regime permanente,  $150^\circ\text{C}$  para o AeroZ™ e  $180^\circ\text{C}$  para o ACCC®, a diferença percentual máxima observada foi de 2,6% no AeroZ™ e de 2,4% no ACCC®. Nessas mesmas

temperaturas, para  $V = 8 \text{ m/s}$ , o primeiro apresentou 0,56% e o segundo 0,65% de diferenças entre os métodos. Cabe destaque para o formato dos fios externos desses condutores, que apresentam perfis “Z” para o AeroZ™, e trapezoidal para o ACCC®.

A variação da temperatura na superfície do condutor,  $T_s$ , para quatro valores distintos de ângulo de ataque do vento,  $\delta$ , mostra que os condutores analisados formados por fios externos com ligas termorresistentes, que podem operar em regime permanente acima dos 100°C, apresentaram menor diferença percentual entre os métodos CIGRÉ e IEEE. Nos condutores ACCC® Drake e ACCR Drake, apresentaram suas diferenças máximas para valores de  $T_s = 50^\circ\text{C}$  e  $\delta = 90^\circ$  e  $\delta = 60^\circ$ , que não ultrapassaram de 4%. Para  $T_s = 50^\circ\text{C}$  e  $\delta = 0^\circ$ , todos os condutores apresentaram diferenças percentuais entre os métodos acima de 20%, indicando que esses valores de  $T_s$  e  $\delta$  causam grandes distorções entre os métodos.

Quanto à variação da velocidade do vento,  $V$ , para quatro valores distintos de ângulo de ataque do vento,  $\delta$ , as análises novamente apontaram para os condutores AeroZ™ Drake e ACCC® Drake como sendo os que apresentaram as menores diferenças percentuais entre os métodos, como valores máximos, ao longo da faixa de  $V$  analisada, independentemente do valor de  $\delta$ , de 4%.

## 7. APLICATIVO PARA CÁLCULO DE AMPACIDADE

O cálculo de ampacidade de condutores para LTA não contém expressões de grandes complexidades, porém envolve um grande número de equações e muitas variáveis. As cargas horárias de disciplinas que têm o cálculo de ampacidade no seu conteúdo, como é o caso de ENG10040 – Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica, disciplina eletiva para o curso de Engenharia Elétrica e obrigatória para o curso de Engenharia de Energia da UFRGS, não dispõem de muito tempo disponível para analisar com maior detalhe as componentes do cálculo de ampacidade e as influências de cada um dos parâmetros no resultado final.

Com base nessa problemática, foi desenvolvido um aplicativo em ambiente *MATLAB* que permite calcular as ampacidades, pelo método CIGRÉ e IEEE, para sete tipos de condutores utilizados em LTA, de mesmo diâmetro externo. Além do condutor, é possível variar outros quatorze parâmetros que são utilizados no cálculo. O aplicativo apresenta os valores das ampacidades em cada um dos métodos, em  $A$  (amperes), além da diferença entre os métodos, numérica e percentual, indicando também a relação entre os valores, com os símbolos matemáticos “>”, “<” ou “=”.

O aplicativo foi concebido utilizando-se da ferramenta GUI (*Graphical User Interface*) disponibilizada no *MATLAB*, que permite a criação de uma interface gráfica, por meio de botões, menus, etc..., promovendo a interação do usuário com o computador (RANGEL; MARTHA, 2017). Os cálculos utilizados para gerar os resultados utilizam os mesmos *scripts* já utilizados nos Capítulos 3 a 6 deste trabalho, já validados.

A ferramenta foi batizada de *CalcAmp*, dando referência à sua função principal, que é o cálculo de ampacidade.

### 7.1 APRESENTANDO O *CalcAmp*

O *CalcAmp* é composto de duas telas de trabalho, sendo a primeira apenas para apresentação, contendo os botões “INICIAR” e “FECHAR”, conforme a Figura 51. A segunda tela é o ambiente de operação, na qual estão todos os parâmetros a serem configurados, além dos botões “CalcAmp”

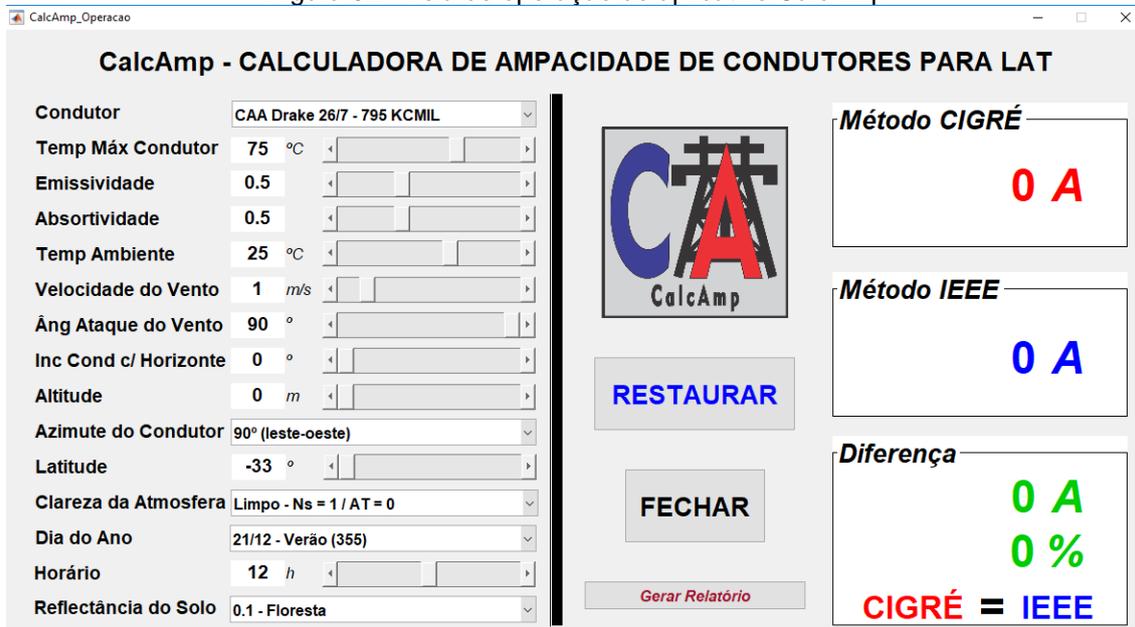
(calcular), “RESTAURAR”, “FECHAR” e “Gerar Relatório”, e os painéis de resultados, de acordo com a Figura 52.

Figura 51 - Tela de abertura do aplicativo CalcAmp



Fonte: Autor

Figura 52 - Tela de operação do aplicativo CalcAmp



Fonte: Autor

## 7.2 UTILIZANDO o *CalcAmp*

Em virtude do aplicativo ter sido desenvolvido em ambiente *MATLAB*, é necessário ter instalado no computador a ser utilizado uma versão do *software*. O desenvolvimento foi feito na versão R2012b, no sistema operacional *Windows 10*, sem testes em outras versões.

Para o funcionamento total, são necessários os seguintes arquivos dentro da pasta **CalcAmp**:

- `CalcAmp_Inicial.m`
- `CalcAmp_Inicial.fig`
- `CalcAmp_Operacao.m`
- `CalcAmp_Operacao.fig`
- `PD_CIGRE_GUIDE.m`
- `PD_IEEE_GUIDE.m`
- `Relatorio.m`
- `Logo-CA.jpg`
- `Logo-CA.png`
- `Logo-EE.jpg`
- `html\Logo-CA.png` (subpasta `html`)

Os passos a seguir são dados para a situação em que a pasta **CalcAmp** tenha sido colocada na raiz da unidade `C:\`. Caso a pasta não esteja nesse local é necessário complementar os caminhos indicados.

### 7.2.1 Abrindo e utilizando o aplicativo

Com o *software MATLAB* R2012b<sup>2</sup> já iniciado, digitar na Janela de Comando (*Command Window*) o seguinte comando:

```
cd 'C:\CalcAmp' <ENTER>
```

---

<sup>2</sup> O aplicativo *CalcAmp* foi desenvolvido e testado na versão R2012b do *MATLAB*, sem testes de compatibilidade em outras versões do *software*.

Caso a pasta **CalcAmp** não esteja na raiz da unidade **C:\**, é necessário digitar o caminho completo para chegar à pasta, ou localizá-la pela barra de ferramentas *Current Folder* do *MATLAB*. É necessário prestar atenção, pois o software tem comandos sensíveis a caracteres maiúsculos e minúsculos (*case sensitive*). Estando na pasta do aplicativo, digitar na Janela de comando o seguinte:

```
CalcAmp_Inicial <ENTER>
```

A tela inicial do aplicativo se abrirá, conforme ilustrou a Figura 51. Esta tela contém o título do aplicativo (**CalcAmp – CALCULADORA DE AMPACIDADE DE CONDUTORES PARA LAT**), os métodos de cálculo que ele utiliza (**Método CIGRÉ** e **Método IEEE**), os logotipos da Escola de Engenharia da UFRGS e do aplicativo, um texto que explica tratar-se de parte de um projeto de diplomação, os nomes do orientando e do orientador, bem como o ano e semestre de apresentação do projeto. Além disso, possui dois botões: **“INICIAR”** e **“FECHAR”**. O botão **“FECHAR”** encerra o aplicativo e o botão **“INICIAR”** fecha a tela inicial e abre a tela de operação.

Na tela de operação, já apresentada na Figura 52, há um cabeçalho com o título do aplicativo e o restante da tela é dividida em duas áreas. A área à esquerda possui os elementos de escolha dos valores dos parâmetros para o cálculo da ampacidade. A área à direita possui os botões de comandos e as áreas de resultados dos cálculos. Cada área será explorada a seguir.

Na área de escolha dos valores dos parâmetros, além do condutor, há outros quatorze valores a serem ajustados. Os valores possíveis para cada parâmetro são trazidos na Tabela 15, bem como seus valores padrão, que já estão definidos quando da inicialização da tela de operação do aplicativo. Para o parâmetro temperatura máxima no condutor, cada condutor apresenta suas próprias faixas e valores padrão. A Tabela 16 indica, além dos condutores disponíveis para o cálculo de ampacidade, as faixas de valores para as suas temperaturas máximas e os seus valores padrão.

Tabela 15 - Parâmetros, faixas de valores, valor padrão e passo do valor disponíveis no *CalcAmp*

| <b>Parâmetro</b>                     | <b>Faixa de Valores</b> | <b>Valor Padrão</b> | <b>Passo do Valor</b> | <b>Unidade</b>      |
|--------------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| Temperatura Máxima no Condutor       | Ver Tabela 16           | Tab. 16             | 1                     | °C                  |
| Emissividade                         | 0,27 ~ 0,95             | 0,5                 | 0,01                  | <i>adimensional</i> |
| Absortividade                        | 0,28 ~ 0,93             | 0,5                 | 0,01                  | <i>adimensional</i> |
| Temperatura Ambiente                 | 0 ~ 40                  | 25                  | 1                     | °C                  |
| Velocidade do Vento                  | 0,0 ~ 8,0               | 1                   | 0,1                   | <i>m/s</i>          |
| Ângulo de Ataque do Vento            | 0 ~ 90                  | 90                  | 1                     | °                   |
| Inclinação do Condutor com Horizonte | 0 ~ 40                  | 0                   | 1                     | °                   |
| Altitude                             | 0 ~ 2000                | 0                   | 10                    | <i>m</i>            |
| Azimute do Condutor                  | 90; 45; 0               | 90                  | N/A                   | °                   |
| Latitude                             | -33 ~ 5                 | -30                 | 1                     | °                   |
| Clareza da Atmosfera                 | 0,5, 1                  | 1                   | N/A                   | <i>adimensional</i> |
| Dia do Ano                           | 80; 175; 265; 355       | 355                 | N/A                   | <i>adimensional</i> |
| Horário                              | 8 ~ 16                  | 12                  | 1                     | <i>adimensional</i> |
| Reflectância do Solo ou Albedo       | 0,1; 0,15; 0,2; 0,3     | 0,1                 | N/A                   | <i>adimensional</i> |

Fonte: Autor

Tabela 16 - Condutores disponíveis no *CalcAmp*, com suas respectivas faixas de valores e valores padrão

| <b>Condutor</b>    | <b>Faixa de Valores</b> | <b>Valor Padrão</b> | <b>Unidade</b> |
|--------------------|-------------------------|---------------------|----------------|
| CAA Drake          | 55 ~ 100                | 75                  | °C             |
| T-CAA T-Drake      | 55 ~ 180                | 150                 | °C             |
| CA Anemone         | 55 ~ 100                | 75                  | °C             |
| T-CA T-Anemone     | 55 ~ 180                | 150                 | °C             |
| T-CAA AeroZ™ Drake | 55 ~ 200                | 150                 | °C             |
| ACCC® Drake        | 55 ~ 200                | 180                 | °C             |
| ACCR Drake         | 55 ~ 240                | 210                 | °C             |

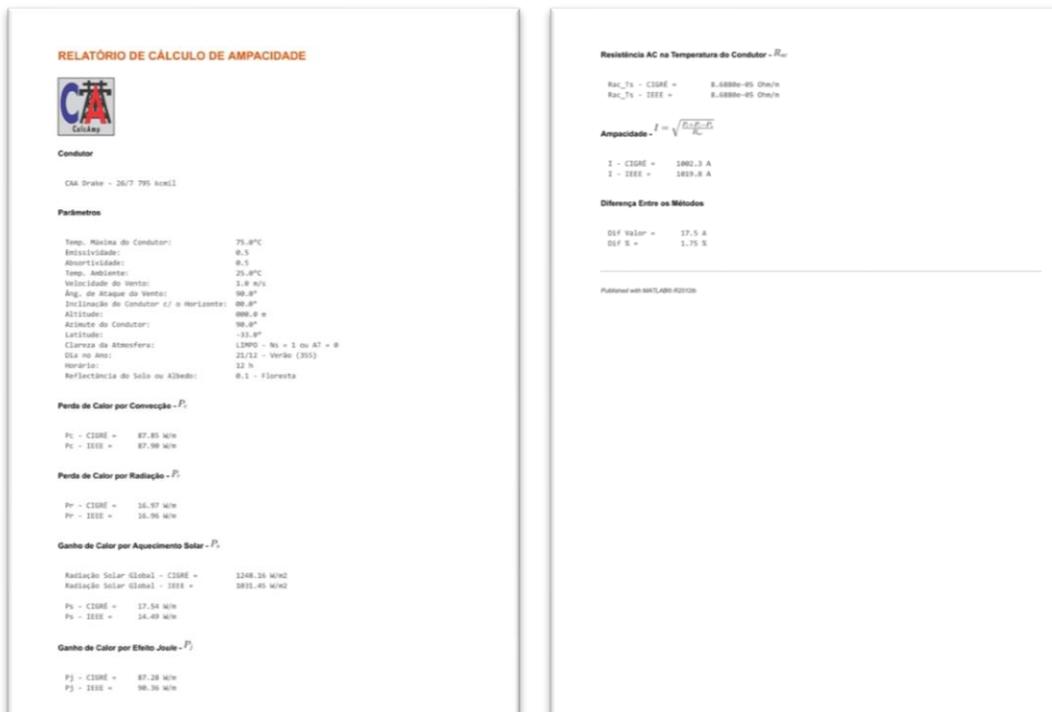
Fonte: Autor

Com o condutor e demais parâmetros definidos, passa-se para a área direita da tela de operação do aplicativo, onde há os botões de ação e os painéis de resultados. Há três painéis de resultados: o painel superior apresenta o cálculo da ampacidade pelo método CIGRÉ, em *A*, na cor vermelha; o painel do meio apresenta o cálculo pelo método IEEE, em *A*, na cor azul; e o painel inferior mostra a diferença numérica entre os dois métodos, em *A*, e a diferença percentual, em '%', na cor verde. Esse painel mostra ainda a relação entre os

valores das ampacidades calculadas pelos dois métodos, por meio dos símbolos matemáticos “>”, “<” ou “=”. O botão “CalcAmp”, com o logotipo do aplicativo, executa os *scripts* de cálculo de ampacidade e imprime nos painéis os resultados obtidos. O botão “RESTAURAR” volta a tela ao seu estado inicial, com os valores padrão definidos e os painéis zerados. O botão “FECHAR” encerra o aplicativo, e o botão “Gerar Relatório” executa as mesmas tarefas que o botão CalcAmp e ainda gera um relatório em formato *html* e o abre no navegador de internet, podendo assim ser salvo ou impresso.

O relatório gerado apresenta o condutor escolhido e o valor definido para os demais quatorze parâmetros. Mostra ainda os valores de cada uma das parcelas de calor que envolvem o balanço térmico para o cálculo da ampacidade, nos dois métodos, os valores das resistências AC na temperatura do condutor,  $R_{acT_s}$ , as ampacidades calculadas, e ainda as diferenças numéricas e percentuais entre os métodos IEEE e CIGRÉ. Um exemplo de relatório gerado pode ser visualizado na Figura 53.

Figura 53 - Exemplo de relatório gerado pelo *CalcAmp*



Fonte: Autor

## 7.2.2 Comparação de valores de catálogo e calculados pelo *CalcAmp*

Os fabricantes de condutores, em seus catálogos, indicam valores de ampacidade dos seus cabos informando alguns parâmetros que foram utilizados, porém nenhum indica todos os quatorze parâmetros necessários para o cálculo completo pelos métodos CIGRÉ e IEEE.

A Tabela 17 apresenta uma comparação dos valores de ampacidade informados nos catálogos dos fabricantes e os valores calculados pelo aplicativo *CalcAmp*. Os parâmetros fornecidos pelos fabricantes nos catálogos foram utilizados no aplicativo e estão informados em nota de rodapé. Quando não informados pelo fabricante, foram utilizados os valores descritos na Tabela 18.

Tabela 17 - Comparação entre valores de ampacidade nos catálogos dos fabricantes e calculados pelo *CalcAmp*

| <b>Condutor</b>            | <b>Fabricante</b> | <b>Ampacidade Catálogo</b>     | <b>Ampacidade Método CIGRÉ</b> | <b>Ampacidade Método IEEE</b>  |
|----------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| CAA Drake <sup>3</sup>     | General Cable     | 820A @ 75°C                    | 809A @ 75°C                    | 822A @ 75°C                    |
| T-CAA T-Drake <sup>4</sup> | Nexans            | 1178A @ 100°C<br>1452A @ 150°C | 1197A @ 100°C<br>1515A @ 150°C | 1208A @ 100°C<br>1521A @ 150°C |
| CA Anemone                 | General Cable     | 850A @ 75°C                    | 833A @ 75°C                    | 846A @ 75°C                    |
| T-CA T-Anemone             | Nexans            | 1241A @ 100°C<br>1527A @ 150°C | 1260A @ 100°C<br>1593A @ 150°C | 1272A @ 100°C<br>1598A @ 150°C |
| T-CAA AeroZ™ Drake         | Nexans            | 1801A @ 150°C                  | 1755A @ 150°C                  | 1762A @ 150°C                  |
| ACCC® Drake <sup>5</sup>   | Condu spar        | 1134A @ 100°C<br>1706A @ 180°C | 1120A @ 100°C<br>1702A @ 180°C | 1128A @ 100°C<br>1696A @ 180°C |
| ACCR Drake <sup>6</sup>    | 3M                | 1691A @ 210°C<br>1821A @ 240°C | 1688A @ 210°C<br>1818A @ 240°C | 1680A @ 210°C<br>1809A @ 240°C |

Fonte: Autor

Analisando a Tabela 17, nota-se que os valores das ampacidades calculados pelo aplicativo tiveram uma variação máxima de 4,75% em relação ao valor de tabela como, por exemplo, no caso do condutor T-Drake à 150°C pelo

<sup>3</sup>  $T_a = 32^\circ\text{C}$ ,  $V = 0,6 \text{ m/s}$ ,  $\delta = 90^\circ$ ,  $\varepsilon_s = 0,5$ ,  $\alpha_s = 0,5$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ,  $y = 0 \text{ m}$ ,  $\gamma_c = 90^\circ$ ,  $N_s = 1$ ,  $H = 12$ ,  $N = 355$  – mesmas condições para o condutor CA Anemone.

<sup>4</sup>  $T_a = 25^\circ\text{C}$ ,  $V = 1 \text{ m/s}$ , com sol – mesmas condições para os condutores T-CA T-Anemone e T-CAA AeroZ™ Drake.

<sup>5</sup>  $T_a = 40^\circ\text{C}$ ,  $V = 0,6 \text{ m/s}$ ,  $\varepsilon_s = 0,5$ ,  $\alpha_s = 0,5$ ,  $y = 0 \text{ m}$ , com sol.

<sup>6</sup>  $T_a = 40^\circ\text{C}$ ,  $V = 0,6 \text{ m/s}$ ,  $\delta = 90^\circ$ ,  $\varepsilon_s = 0,5$ ,  $\alpha_s = 0,5$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ,  $y = 0 \text{ m}$ ,  $N_s = 1$ .

método IEEE. Observa-se ainda que os condutores T-Drake, T-Anemone e AeroZ™ Drake são os que apresentam as maiores diferenças percentuais entre os valores de tabela e calculados no CalcAmp, na sua maioria superiores a 2%. Uma hipótese para o resultado desses valores serem um pouco mais discrepantes do que os tabelados, possa ser a pouca informação a respeito dos valores dos parâmetros utilizados pelo fabricante no momento do seu cálculo. Justamente esses três condutores são aqueles cujo fabricante menos informação apresentou a respeito dos parâmetros utilizados no cálculo da ampacidade. Os demais condutores apresentaram diferenças percentuais inferiores a 2%, chegando a um mínimo de 0,17% para o condutor ACCR Drake à 240°C pelo método CIGRÉ. Das onze comparações efetuadas, sete apresentaram valores com menor diferença percentual pelo método CIGRÉ e quatro obtiveram menor diferença pelo método IEEE.

Apesar dos métodos estudados neste trabalho não estarem totalmente validados para os condutores do tipo HTLS, percebe-se que os valores de ampacidade calculados com o aplicativo trazem valores muito próximos aos divulgados pelos fabricantes de condutores em seus catálogos.

Tabela 18 - Valores de parâmetros utilizados para cálculo de ampacidade no aplicativo *CalcAmp* quando não informado pelo fabricante

| <b>Parâmetro</b>                    | <b>Símbolo</b>  | <b>Valor</b>                        | <b>Unidade</b>      |
|-------------------------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------|
| Emissividade                        | $\varepsilon_s$ | 0,5                                 | <i>adimensional</i> |
| Absortividade                       | $\alpha_s$      | 0,5                                 | <i>adimensional</i> |
| Temperatura ambiente                | $T_a$           | 25                                  | °C                  |
| Ângulo de ataque do vento           | $\delta$        | 90                                  | °                   |
| Inclinação do condutor c/ horizonte | $\beta$         | 0                                   | °                   |
| Altitude                            | $y$             | 0                                   | <i>m</i>            |
| Azimute do condutor                 | $\gamma_c$      | 90 ( <i>leste – oeste</i> )         | °                   |
| Latitude                            | $\varphi$       | -30                                 | °                   |
| Clareza da Atmosfera                | $N_s$ ou $AT$   | <i>Limpo</i> ( $N_s = 1 / AT = 0$ ) | <i>adimensional</i> |
| Dia do Ano                          | $N$             | <i>21 de dezembro</i> (355)         | <i>adimensional</i> |
| Hora                                | $H$             | 12 AM                               | <i>adimensional</i> |
| Reflectância do Solo ou Albedo      | $F$             | <i>Floresta</i> ( $F = 0,1$ )       | <i>adimensional</i> |

Fonte: Autor

## 8. CONCLUSÃO E MELHORIAS FUTURAS

Neste trabalho foram comparados dois métodos utilizados para o cálculo de ampacidade de condutores de LTA: método CIGRÉ e método IEEE. Ambos os métodos utilizam o princípio do balanço térmico para o equacionamento, porém com algumas diferenças em determinadas parcelas do cálculo.

A comparação do cálculo de ampacidade utilizando os métodos CIGRÉ e IEEE mostra que ambos os métodos apresentam valores muito semelhantes na grande maioria dos casos. Diferenças mais significativas são percebidas em situações extremas, como ventos com velocidades elevadas (acima de  $7 \text{ m/s}$ ) ou sem vento. Em grande parte das análises efetuadas o método CIGRÉ se mostrou mais conservativo, apresentando valores inferiores aos obtidos pelo método IEEE, com exceção da situação com ventos fortes, em que o método CIGRÉ evolui o valor da ampacidade de forma mais rápida com o aumento da velocidade do vento, ao passo que o método IEEE evolui de forma mais homogênea em toda a faixa analisada.

Analisando-se as parcelas que compõem o balanço térmico, e comparando os dois métodos, nota-se que a componente de calor que apresenta maior diferença percentual entre os métodos é o ganho de calor por aquecimento solar,  $P_s$ . Na situação de cálculo de condições padrão, com o condutor CAA Drake, a diferença percentual entre as parcelas de  $P_s$  nos dois métodos é de 19,3%. Alterando a reflectância do solo para  $F = 0,3$ , a diferença sobe para 48,32%. Porém, essa diferença na parcela de calor não impacta de forma tão significativa a diferença percentual do valor das ampacidades, haja vista que a  $P_s$  representa menos de 15% das parcelas do balanço térmico. Para  $F = 0,1$  a diferença na ampacidade entre os métodos é de 1,23% e para  $F = 0,3$  é de 4,35%.

A variação do parâmetro de velocidade do vento,  $V$ , é o que apresenta a maior diferença percentual na ampacidade entre os métodos. Na situação padrão, condutor CAA Drake, com  $V = 1 \text{ m/s}$ , os resultados diferenciam-se de 1,23%, e para  $V = 8 \text{ m/s}$  essa diferença chega a 13%. Analisando-se a parcela de calor influenciada por  $V$ , perda de calor por convecção,  $P_c$ , nota-se uma diferença entre os valores dos métodos de 1,54% para  $V = 1 \text{ m/s}$  e de 30%

para  $V = 8 \text{ m/s}$ , sendo que  $P_c$  corresponde a cerca de 35% das parcelas do balanço térmico para a primeira situação, e cerca de 45% na segunda situação, impactando de forma significativa os resultados dos cálculos de ampacidade.

As análises feitas com outros condutores de diâmetro externo similar ao CAA Drake, porém com materiais e/ou métodos construtivos diferentes, mostrou que cabos com perfis “Z” ou trapezoidais e condutores com ligas termorresistentes, operando em temperaturas superiores a  $100^\circ\text{C}$ , apresentam menores diferenças percentuais no cálculo da ampacidade pelos dois métodos. Para a mesma situação em que o condutor CAA Drake apresentou uma diferença de 13% entre os métodos, o ACCC® Drake apresentou apenas 0,65% de diferença.

Como objetivo secundário, foi implementado um aplicativo desenvolvido em ambiente *MATLAB*, com a finalidade de auxiliar no cálculo de ampacidade utilizando ambos os métodos. Esse aplicativo será utilizado como suporte didático nas disciplinas que abordam o cálculo de ampacidade.

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se uma análise mais aprofundada do impacto da velocidade do vento na diferença entre os valores de ampacidade calculados em cada método, bem como o impacto nos valores para o caso de utilização de modelos mais simplificados de cálculos. Também se sugere uma melhoria no aplicativo que propicie ao utilizador a possibilidade de gerar gráficos, a exemplo das figuras exibidas no Capítulo 4, e também um cálculo mais simplificado como, por exemplo, o uso de valores de radiação solar global que pode ser obtido em atlas solarimétricos.

## REFERÊNCIAS

3M. **3M Overhead High Voltage for Power Transmission**. Disponível em: < <http://3m.com/accr> >. Acesso em: 22 nov. 2017

ALUBAR METAIS E CABOS S.A. **Catálogo Técnico: Condutores Elétricos de Alumínio**. Barcarena, 2015. Disponível em: < [https://alubar.net.br/img/site/arquivo/Cat\\_Tec\\_Alubar\\_Aluminio\\_2015.pdf](https://alubar.net.br/img/site/arquivo/Cat_Tec_Alubar_Aluminio_2015.pdf) >. Acesso em: 21 nov. 2017.

ANJOS, Rodnei Dias dos. **Ampacidade de Linhas de Transmissão - Aspectos Operativos**. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5460: Sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro, 1992, 63 p.

BANERJEE, Koustubh. **Making the case for high temperature low sag (htls) overhead transmission line conductors**. Arizona State University, 2014.

ÇENGEL, Yunus A. **Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer**. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 1997. 858 p.

CIGRÉ. **CIGRÉ WG 22.12: TB 207**: TB 207: Thermal Behaviour of Overhead Conductors. Paris, 2002. 40 p.

\_\_\_\_\_. **CIGRÉ WG B2.43: TB 601**: TB 601: Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines. Paris, 2014. 93 p.

CLOET, Eric; LILIEN, Jean-Louis; FERRIÈRES, Patrick. **Experiences of the Belgian and French TSOs using the “Ampacimon” real-time dynamic rating system**. In: Conférence Internationale des grands réseaux électriques à haute tension. 2010.

CONDUSPAR CONDUTORES ELÉTRICOS LTDA. **Cabo de alumínio com núcleo em compósito ACCC®**. Catálogo de produtos. Disponível em: <

<http://www.conduspar.com.br/catalogos/pt-br/Conduspar%20%E2%80%93%20ACCC.pdf> >. Acesso em: 21 out. 2017.

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente**. Escola Federal de Engenharia, Itajubá, v. 1, 1977. 280 p.

IEEE. **NESC-2012**: National Electrical Safety Code. C2-2012 ed. New York, 2012a. 356 p.

\_\_\_\_\_. **IEEE STD 738-2012**: IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. New York, 2012b. 58 p.

MORGAN, V. T. **The thermal rating of overhead-line conductors Part I. The steady-state thermal model**. Electric power systems research, v. 5, n. 2, p. 119-139, 1982.

NASCIMENTO, C. A. M. et al. **Aplicação de tecnologias de monitoramento em tempo real para aumentar a capacidade de transmissão em LTs Aéreas**. Procel/Aneel–CEMIG–Ciclo, v. 98, p. 99, 2001.

NEXANS BRASIL. **Linha Nexans sustentável: Cabos especiais para linhas aéreas**. Catálogo de produtos 2016. Disponível em : < [https://www.nexans.com.br/Brazil/2016/folder\\_aluminio\\_sustentavel.pdf](https://www.nexans.com.br/Brazil/2016/folder_aluminio_sustentavel.pdf) >. Acesso em: 21 out. 2017.

OLIVEIRA, J.P. **Transmissão de Calor – Convecção Forçada**. Apostila da disciplina de Transmissão de Calor, Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade Beira Interior – UBI. Covilhã, 2014. Disponível em: < <http://webx.ubi.pt/~pypo/TransCal1.pdf> >. Acesso em: 15 out. 2017.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **O que é o SIN**. Disponível em: < <http://www.ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

SCHMIDT, Neil P. **Comparison between IEEE and CIGRE ampacity standards.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 4, p. 1555-1559, 1999.

RANGEL, Rafael L.; MARTHA, Luiz F. **O ambiente GUIDE do MATLAB.** Apresentação para a disciplina CIV2801 – Fundamentos da Computação Gráfica Aplicada, PUC-Rio, 2017. Disponível em: < [http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/ftp\\_pub/lfm/CIV2801-AmbienteGUIDE.pdf](http://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/ftp_pub/lfm/CIV2801-AmbienteGUIDE.pdf) >. Acesso em: 05 dez. 2017.

## APÊNDICE A – Rotina em *MATLAB* para cálculo da ampacidade pelo método CIGRÉ

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               CIGRE WG 22.12                               %
%                                                                                   %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%   EQUILÍBRIO TÉRMICO DO CONDUTOR

%   Pj + Ps + Pm + Pi = Pc + Pr + Pw
%   Onde:
%   Pj : Aquecimento Joule
%   Ps : Aquecimento Solar
%   Pm : Aquecimento Magnético
%   Pi : Aquecimento Corona
%   Pc : Resfriamento Convecção
%   Pr : Resfriamento por Radiação
%   Pw : Resfriamento Evaporativo

%   SIMPLIFICAÇÃO DO EQUILÍBRIO TÉRMICO

%   Pj+ Ps = Pc + Pr

clc
rad=pi/180;

Condutor=1;

% 1 - CAA Drake
% 2 - T-CAA T-Drake
% 3 - CA Anemone
% 4 - T-CA T-Anemone
% 5 - T-CAA AeroZ Drake
% 6 - ACCC Drake
% 7 - ACCR Drake

switch Condutor
    case 1
        %Condutor (CAA Drake - 26/7 795 kcmil)
        D=28.1;           %Diâmetro externo do condutor [mm]
        D_1=10.4;        %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
        d=4.44;          %Diâmetro do fio externo [mm]
        R_ac_T1=7.283e-5; %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
        R_ac_T2=8.688e-5; %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
        T1=25;           %Temperatura T1 [°C]
        T2=75;           %Temperatura T2 [°C]

    case 2
        %Condutor (T-CAA T-Drake - 26/7 795 kcmil)
        D=28.13;          %Diâmetro externo do condutor [mm]
        D_1=10.36;        %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
        d=4.44;          %Diâmetro do fio externo [mm]
        R_ac_T1=7.815e-5; %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
        R_ac_T2=11.44e-5; %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
        T1=25;           %Temperatura T1 [°C]
        T2=150;          %Temperatura T2 [°C]

    case 3
        %Condutor (CA Anemone - 37 874.5 kcmil)
        D=27.37;          %Diâmetro externo do condutor [mm]
        D_1=0;            %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
        d=3.91;           %Diâmetro do fio externo [mm]
        R_ac_T1=6.8541e-5; %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
        R_ac_T2=8.1037e-5; %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
        T1=25;           %Temperatura T1 [°C]
        T2=75;           %Temperatura T2 [°C]

    case 4
        %Condutor (T-CA T-Anemone - 37 874.5 kcmil)
        D=27.37;          %Diâmetro externo do condutor [mm]
        D_1=0;            %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
        d=3.91;           %Diâmetro do fio externo [mm]

```

```

R_ac_T1=6.9137e-5;      %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
R_ac_T2=10.1897e-5;    %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
T1=25;                 %Temperatura T1 [°C]
T2=150;                %Temperatura T2 [°C]

    case 5               %Condutor (T-CAA AeroZ Drake - 26/7 1000,6 kcmil)
D=28.1;                %Diâmetro externo do condutor [mm]
D_1=10.36;             %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
d=1;                   %Diâmetro do fio externo [mm]
R_ac_T1=5.751e-5;      %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
R_ac_T2=8.524e-5;      %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
T1=25;                 %Temperatura T1 [°C]
T2=150;                %Temperatura T2 [°C]

    case 6               %Condutor (ACCC Drake - 26/7 1025,6 kcmil)
D=28.1;                %Diâmetro externo do condutor [mm]
D_1=9.53;              %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
d=1;                   %Diâmetro do fio externo [mm]
R_ac_T1=5.54e-5;       %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
R_ac_T2=8.88e-5;       %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
T1=25;                 %Temperatura T1 [°C]
T2=180;                %Temperatura T2 [°C]

    case 7               %Condutor (ACCR 824-T16 - Drake - 26/19 824 kcmil)
D=28.6;                %Diâmetro externo do condutor [mm]
D_1=10.6;              %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
d=4.5;                 %Diâmetro do fio externo [mm]
R_ac_T1=6.798e-5;      %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
R_ac_T2=12.487e-5;     %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
T1=25;                 %Temperatura T1 [°C]
T2=240;                %Temperatura T2 [°C]

end

Lambda=1;              %Efetiva condutividade térmica radial do condutor [W/m.K]
g=9.807;               %Aceleração gravitacional [m/s²]

% T_s: Temperatura superfície do condutor [°C]
T_s=85;
% T_s=linspace(55,85,1000);

% Epsilon_s: Emissividade da superfície do condutor no exemplo A [Adimensional]
Epsilon_s=0.8;
% Epsilon_s=linspace(0.27,0.95,1000);

% Alpha_s: Absortividade solar da superfície do condutor no exemplo A [Adimensional]
Alpha_s=0.8;
% Alpha_s=linspace(0.28,0.93,1000);

% Características Ambientais
% T_a: Temperatura ar ambiente [°C]
T_a=25;
% T_a=linspace(0,40,1000);

% V: Velocidade do vento [m/s]
V=1;
%V=linspace(0,8,1000);

% Delta: Ângulo de ataque do vento [°]
Delta=60;
%Delta=linspace(0,90,1000);

% Beta: Inclinação do condutor para a horizontal [°]
Beta=0;
%Beta=linspace(0,40,1000);

% y: Altitude acima do nível do mar [m]
y=0;
%y=linspace(0,2000,1000);

% Condições Solares
% N: Dia do ano - 1 para 01/01 e 365 para 31/12 [Adimensional]

```

```

N=80;
%N=linspace(1,365,365);

% H: Hora do dia (24h) [Adimensional]
H=11;
%H=linspace(8,16,1000);

% Phi: Latitude [°]
Phi=-30;
%Phi=linspace(-33,5,1000);

% N_s: Claresa da atmosfera - 1 para limpo / 0.5 para nublado/industrial [Adimensional]
N_s=1;
%N_s=linspace(0.5,1,1000);

% Gamma_c: Azimute do condutor - 90° p/ direção Leste-Oeste [°]
Gamma_c=90;
%Gamma_c=linspace(0,90,1000);

% F: Albedo - Reflectância do solo - 0.1=Floresta / 0.15=Áreas Urbanas / 0.2=Campos /
0.3=Areia [Adimensional]
F=0.1;
%F=linspace(0.1,0.3,1000);

% CÁLCULO RESFRIAMENTO POR CONVECÇÃO - Pc

T_f=0.5*(T_s+T_a); %Temperatura de filme [°C]

Lambda_f=2.368e-2+7.23e-5*T_f-2.763e-8*T_f.^2; %Condutividade térmica de filme [W/K*m]

Gamma=(1.293-1.525e-4*y+6.379e-9*y.^2)./(1+0.00367*T_f); %Densidade do ar local [Kg/m³]

Micro_f=(17.239+4.635e-2*T_f-2.03e-5*T_f.^2)*1e-6; %Viscosidade dinâmica de Temp de
filme [Kg/m*s]

Ni_f=Micro_f./Gamma; %Vicosidade cinemática [m²/s]

R_s=d./(2*(D-d)); %Rugosidade superficial do condutor [adimensional]

% Pc_forced
if length(V)==1 && length(T_f)==1 && length(y)==1 %Caso V e T_f e y não sejam vetores
    Re=V*D*1e-3./Ni_f; %Número Reynolds [adimensional]
    %Definição das constantes B e n
    if R_s == 0 % Caso Condutores lisos
        if Re >= 35 & Re < 5000
            B1=0.583;
            n=0.471;
        elseif Re >= 5000 & Re < 50000
            B1=0.148;
            n=0.633;
        elseif Re >= 50000 & Re < 200000
            B1=0.0208;
            n=0.814;
        else
            B1=0;
            n=1;
        end
    elseif R_s > 0 & R_s <= 0.05
        if Re >= 100 & Re < 2650
            B1=0.641;
            n=0.471;
        elseif Re >= 2650 & Re <= 50000
            B1=0.178;
            n=0.633;
        else
            B1=0;
            n=1;
        end
    elseif R_s > 0.05
        if Re >= 100 & Re < 2650
            B1=0.641;
            n=0.471;
        elseif Re >= 2650 & Re <= 50000
            B1=0.048;

```

```

        n=0.8;
    else
        B1=0;
        n=1;
    end
end
end

Nu_90=B1*Re.^n; %Número de Nusselt de 90° [Adimensional]

%Definição das constantes de correção do Número Nusselt em função do ângulo de ataque do
vento
for (k=1:1:length(Delta))
    if Delta(k) > 0 & Delta(k) <= 24
        A1(k)=0.42;
        B2(k)=0.68;
        m1(k)=1.08;
    elseif Delta(k) > 24 & Delta(k) <= 90
        A1(k)=0.42;
        B2(k)=0.58;
        m1(k)=0.90;
    elseif Delta(k) == 0
        A1(k)=0.42;
        B2(k)=0;
        m1(k)=1;
    end
end
end
if V < 0.5
    if R_s ==0
        Nu_Delta_a=Nu_90.*(((sin(Delta.*pi./180)).^2+(0.0169.*((sin(Delta.*pi./180)).^2))))).^0.2
        25;
        else
            Nu_Delta_a=Nu_90.*(0.42+0.58.*(sin(Delta.*pi./180)).^0.9);
        end
        Nu_Delta_b=0.55*Nu_90;
        Nu_Delta=max(Nu_Delta_a,Nu_Delta_b);
    elseif R_s ==0

        Nu_Delta=Nu_90.*(((sin(Delta.*pi./180)).^2+(0.0169.*((sin(Delta.*pi./180)).^2))))).^0.225
        ;
        else
            Nu_Delta=Nu_90.*(A1+B2.*(sin(Delta.*pi./180)).^m1); %Número Nusselt em
            função de Delta [Adimensional]
        end

        Pc_forced=pi*Lambda_f.*(T_s-T_a).*Nu_Delta; %Resfriamento por convecção forçada
        [W/m]

elseif length(V)~=1 && length(T_f)==1 && length(y)==1 %Caso V seja vetor
    for (i=1:1:length(V))
        Re(i)=V(i)*D*1e-3./Ni_f; %Número Reynolds [adimensional]

        %Definição das constantes B e n
        if R_s == 0 % Caso Condutores lisos
            if Re(i) >= 35 & Re(i) < 5000
                B1(i)=0.583;
                n(i)=0.471;
            elseif Re(i) >= 5000 & Re(i) < 50000
                B1(i)=0.148;
                n(i)=0.633;
            elseif Re(i) >= 50000 & Re(i) < 200000
                B1(i)=0.0208;
                n(i)=0.814;
            else
                B1(i)=0;
                n(i)=1;
            end
        elseif R_s > 0 & R_s <= 0.05
            if Re(i) >= 100 & Re(i) < 2650
                B1(i)=0.641;
                n(i)=0.471;
            elseif Re(i) >= 2650 & Re(i) <= 50000
                B1(i)=0.178;
                n(i)=0.633;
            else
                B1(i)=0;
            end
        end
    end
end

```

```

        n(i)=1;
    end
elseif R_s > 0.05
    if Re(i) >= 100 & Re(i) < 2650
        B1(i)=0.641;
        n(i)=0.471;
    elseif Re(i) >= 2650 & Re(i) <= 50000
        B1(i)=0.048;
        n(i)=0.8;
    else
        B1(i)=0;
        n(i)=1;
    end
end
end

Nu_90(i)=B1(i)*Re(i).^n(i);

%Definição das constantes de correção do Número Nusselt em função do ângulo de ataque do
vento
    if Delta >= 0 & Delta <= 24
        A1=0.42;
        B2=0.68;
        m1=1.08;
    elseif Delta > 24 & Delta <= 90
        A1=0.42;
        B2=0.58;
        m1=0.90;
    elseif Delta == 0
        A1=0.42;
        B2=0;
        m1=1;
    end
    if V(i) < 0.5
        if R_s ==0
            Nu_Delta_a(i)=Nu_90(i).*(((sin(Delta.*pi./180)).^2+(0.0169.*((sin(Delta.*pi./180)).^2))))
            ).^0.225;
        else
            Nu_Delta_a(i)=Nu_90(i).*(0.42+0.58.*(sin(Delta.*pi./180)).^0.9);
        end
        Nu_Delta_b(i)=0.55*Nu_90(i);
        Nu_Delta(i)=max(Nu_Delta_a(i),Nu_Delta_b(i));
    elseif R_s ==0
        Nu_Delta(i)=Nu_90(i).*(((sin(Delta.*pi./180)).^2+(0.0169.*((sin(Delta.*pi./180)).^2))))
        ).^0.225;
    else
        Nu_Delta(i)=Nu_90(i).*(A1+B2.*(sin(Delta.*pi./180)).^m1); %Número Nusselt em
        função de Delta [Adimensional]
    end

    Pc_forced(i)=pi*Lambda_f.*(T_s-T_a).*Nu_Delta(i); %Resfriamento por convecção
    forçada [W/m]
end

elseif length(V)==1 && length(T_f)~=1 && length(y)==1 %Caso T_f seja vetor
    for (i=1:length(T_f))
        Re(i)=V*D*1e-3./Ni_f(i); %Número Reynolds [adimensional]

        %Definição das constantes B e n
    if R_s == 0 % Caso Condutores lisos
        if Re(i) >= 35 & Re(i) < 5000
            B1(i)=0.583;
            n(i)=0.471;
        elseif Re(i) >= 5000 & Re(i) < 50000
            B1(i)=0.148;
            n(i)=0.633;
        elseif Re(i) >= 50000 & Re(i) < 200000
            B1(i)=0.0208;
            n(i)=0.814;
        else
            B1(i)=0;
            n(i)=1;
        end
    end
end

```

```

elseif R_s > 0 & R_s <= 0.05
    if Re(i) >= 100 & Re(i) < 2650
        Bl(i)=0.641;
        n(i)=0.471;
    elseif Re(i) >= 2650 & Re(i) <= 50000
        Bl(i)=0.178;
        n(i)=0.633;
    else
        Bl(i)=0;
        n(i)=1;
    end
end
elseif R_s > 0.05
    if Re(i) >= 100 & Re(i) < 2650
        Bl(i)=0.641;
        n(i)=0.471;
    elseif Re(i) >= 2650 & Re(i) <= 50000
        Bl(i)=0.048;
        n(i)=0.8;
    else
        Bl(i)=0;
        n(i)=1;
    end
end
end

Nu_90(i)=Bl(i)*Re(i).^n(i);

%Definição das constantes de correção do Número Nusselt em função do ângulo de ataque do
vento
    if Delta >= 0 & Delta <= 24
        A1=0.42;
        B2=0.68;
        m1=1.08;
    elseif Delta > 24 & Delta <= 90
        A1=0.42;
        B2=0.58;
        m1=0.90;
    elseif Delta == 0
        A1=0.42;
        B2=0;
        m1=1;
    end
    if V < 0.5
        if R_s ==0
            Nu_Delta_a(i)=Nu_90(i).*(((sin(Delta.*pi./180)).^2+(0.0169.*((sin(Delta.*pi./180)).^2)))
).^0.225;
        else
            Nu_Delta_a(i)=Nu_90(i).*(0.42+0.58.*(sin(Delta.*pi./180)).^0.9);
        end
        Nu_Delta_b(i)=0.55*Nu_90(i);
        Nu_Delta(i)=max(Nu_Delta_a(i),Nu_Delta_b(i));
    elseif R_s ==0
        Nu_Delta(i)=Nu_90(i).*(((sin(Delta.*pi./180)).^2+(0.0169.*((sin(Delta.*pi./180)).^2))))
.^0.225;
    else
        Nu_Delta(i)=Nu_90(i).*(A1+B2.*(sin(Delta.*pi./180)).^m1); %Número Nusselt em
função de Delta [Adimensional]
    end

    if length(T_a) ~= 1
        Pc_forced(i)=pi*Lambda_f(i).*(T_s-T_a(i)).*Nu_Delta(i); %Resfriamento por
convecção forçada [W/m]
    else
        Pc_forced(i)=pi*Lambda_f(i).*(T_s(i)-T_a).*Nu_Delta(i); %Resfriamento por
convecção forçada [W/m]
    end
end

elseif length(V)==1 && length(T_f)==1 && length(y)~=1 %Caso y seja vetor
    for (i=1:length(y))
        Re(i)=V*D*1e-3./Ni_f(i); %Número Reynolds [adimensional]

        %Definição das constantes B e n
        if R_s == 0 % Caso Condutores lisos
            if Re(i) >= 35 & Re(i) < 5000

```

```

        B1(i)=0.583;
        n(i)=0.471;
    elseif Re(i) >= 5000 & Re(i) < 50000
        B1(i)=0.148;
        n(i)=0.633;
    elseif Re(i) >= 50000 & Re(i) < 200000
        B1(i)=0.0208;
        n(i)=0.814;
    else
        B1(i)=0;
        n(i)=1;
    end
elseif R_s > 0 & R_s <= 0.05
    if Re(i) >= 100 & Re(i) < 2650
        B1(i)=0.641;
        n(i)=0.471;
    elseif Re(i) >= 2650 & Re(i) <= 50000
        B1(i)=0.178;
        n(i)=0.633;
    else
        B1(i)=0;
        n(i)=1;
    end
elseif R_s > 0.05
    if Re(i) >= 100 & Re(i) < 2650
        B1(i)=0.641;
        n(i)=0.471;
    elseif Re(i) >= 2650 & Re(i) <= 50000
        B1(i)=0.048;
        n(i)=0.8;
    else
        B1(i)=0;
        n(i)=1;
    end
end

Nu_90(i)=B1(i)*Re(i).^n(i);

%Definição das constantes de correção do Número Nusselt em função do ângulo de ataque do
vento
    if Delta >= 0 & Delta <= 24
        A1=0.42;
        B2=0.68;
        m1=1.08;
    elseif Delta > 24 & Delta <= 90
        A1=0.42;
        B2=0.58;
        m1=0.90;
    elseif Delta == 0
        A1=0.42;
        B2=0;
        m1=1;
    end
    if V < 0.5
        if R_s ==0
            Nu_Delta_a(i)=Nu_90(i).*(((sin(Delta.*pi./180)).^2+(0.0169.*((sin(Delta.*pi./180)).^2)))
).^0.225;
        else
            Nu_Delta_a(i)=Nu_90(i).*(0.42+0.58.*(sin(Delta.*pi./180)).^0.9);
        end
        Nu_Delta_b(i)=0.55*Nu_90(i);
        Nu_Delta(i)=max(Nu_Delta_a(i),Nu_Delta_b(i));
    elseif R_s ==0
        Nu_Delta(i)=Nu_90(i).*(((sin(Delta.*pi./180)).^2+(0.0169.*((sin(Delta.*pi./180)).^2))))
).^0.225;
    else
        Nu_Delta(i)=Nu_90(i).*(A1+B2.*(sin(Delta.*pi./180)).^m1); %Número Nusselt em
função de Delta [Adimensional]
    end

    Pc_forced(i)=pi*Lambda_f.*(T_s-T_a).*Nu_Delta(i); %Resfriamento por convecção
forçada [W/m]
end
end

```

```

% Pc_nat

Gr=((D.*1e-3).^3.*(T_s-T_a)*g)/((T_f+273).*Ni_f.^2); %Número Grashof [adimensional]

P_r=1005.*Micro_f./Lambda_f; %Número Prandtl [adimensional]

%Definição das constantes para definição do Número Nusselt para ventilação natural

if length(Gr)==1 && length(P_r)==1
    if (Gr*P_r)>= 1e-1 & (Gr*P_r)< 1e2
        A2=1.02;
        m2=0.148;
    elseif (Gr*P_r)>= 1e2 & (Gr*P_r)< 1e4
        A2=0.850;
        m2=0.188;
    elseif (Gr*P_r)>= 1e4 & (Gr*P_r)< 1e7
        A2=0.480;
        m2=0.250;
    elseif (Gr*P_r)>= 1e7 & (Gr*P_r)< 1e12
        A2=0.125;
        m2=0.333;
    end
    Nu_nat=A2.*(Gr.*P_r).^m2;
elseif length(Gr)~=1 && length(P_r)==1
    for (j=1:1:length(Gr))
        if (Gr(j)*P_r)>= 1e-1 & (Gr(j)*P_r)< 1e2
            A2(j)=1.02;
            m2(j)=0.148;
        elseif (Gr(j)*P_r)>= 1e2 & (Gr(j)*P_r)< 1e4
            A2(j)=0.850;
            m2(j)=0.188;
        elseif (Gr(j)*P_r)>= 1e4 & (Gr(j)*P_r)< 1e7
            A2(j)=0.480;
            m2(j)=0.250;
        elseif (Gr(j)*P_r)>= 1e7 & (Gr(j)*P_r)< 1e12
            A2(j)=0.125;
            m2(j)=0.333;
        end
        Nu_nat(j)=A2(j).*(Gr(j).*P_r).^m2(j);
    end
elseif length(Gr)==1 && length(P_r)~=1
    for (j=1:1:length(P_r))
        if (Gr*P_r(j))>= 1e-1 & (Gr*P_r(j))< 1e2
            A2(j)=1.02;
            m2(j)=0.148;
        elseif (Gr*P_r(j))>= 1e2 & (Gr*P_r(j))< 1e4
            A2(j)=0.850;
            m2(j)=0.188;
        elseif (Gr*P_r(j))>= 1e4 & (Gr*P_r(j))< 1e7
            A2(j)=0.480;
            m2(j)=0.250;
        elseif (Gr*P_r(j))>= 1e7 & (Gr*P_r(j))< 1e12
            A2(j)=0.125;
            m2(j)=0.333;
        end
        Nu_nat(j)=A2(j).*(Gr.*P_r(j)).^m2(j);
    end
elseif length(Gr)~=1 && length(P_r)~=1
    for (j=1:1:length(P_r))
        if (Gr(j)*P_r(j))>= 1e-1 & (Gr(j)*P_r(j))< 1e2
            A2(j)=1.02;
            m2(j)=0.148;
        elseif (Gr(j)*P_r(j))>= 1e2 & (Gr(j)*P_r(j))< 1e4
            A2(j)=0.850;
            m2(j)=0.188;
        elseif (Gr(j)*P_r(j))>= 1e4 & (Gr(j)*P_r(j))< 1e7
            A2(j)=0.480;
            m2(j)=0.250;
        elseif (Gr(j)*P_r(j))>= 1e7 & (Gr(j)*P_r(j))< 1e12
            A2(j)=0.125;
            m2(j)=0.333;
        end
        Nu_nat(j)=A2(j).*(Gr(j).*P_r(j)).^m2(j);
    end
end
end

```

```

    %Número Nusselt para ventilação natural

Nu_Beta=Nu_nat*(1-6.76e-6*(Beta.^2.5)); %Número Nusselt para ventilação natural com
inclinação Beta

Pc_nat=pi*Lambda_f.*(T_s-T_a).*Nu_Beta; %Resfriamento por convecção natural [W/m]

if length(Pc_forced) > length(Pc_nat)
    Pc_nat=Pc_nat * ones(1, length(Pc_forced));
elseif length(Pc_forced) < length(Pc_nat)
    Pc_forced=Pc_forced * ones(1, length(Pc_nat));
end

Pc=max(Pc_forced,Pc_nat); %Valor máximo de Resfriamento por Convecção [W/m]

% CÁLCULO RESFRIAMENTO POR RADIAÇÃO - Pr

Sigma_B=5.6697e-8; %Constante de Stefan-Boltzmann [W/m²*K⁴]

Pr=pi*D*1e-3*Sigma_B*Epsilon_s*((T_s+273).^4-(T_a+273).^4); %Resfriamento por radiação
[W/m]

% CÁLCULO AQUECIMENTO SOLAR - Ps

Delta_s=23.4*sin(2*pi*(284+N)/365); %Inclinação solar [°]

Z=15*(-12+H); %Hora ângulo do sol [°]

H_s=(asin(sin(Phi*rad)*sin(Delta_s*rad)+cos(Phi*rad)*cos(Delta_s*rad)*cos(Z*rad)))/rad;
%Altitude solar [°]

Gamma_s=(asin(cos(Delta_s*rad)*sin(abs(Z)*rad)./cos(H_s*rad)))/rad; %Azimute do sol [°]

Eta=(acos(cos(H_s*rad).*cos((Gamma_s-Gamma_c)*rad)))/rad; %Ângulo de incidência do feixe
solar em relação ao eixo do condutor [°]

I_B_0=N_s*((1280*sin(H_s*rad))/(sin(H_s*rad)+0.314)); %Intensidade de radiação solar
direta a nível do mar [W/m²]

I_B_y=I_B_0.*(1+1.4e-4*y*((1367./I_B_0)-1)); %Intensidade de radiação solar direta
ajustado para a altitude [W/m²]

I_d=(430.5-0.3288*I_B_y)*sin(H_s*rad); %Intensidade de radiação solar difusa [W/m²]

I_T=I_B_y*(sin(Eta*rad)+(pi/2)*F*sin(H_s*rad))+I_d*(1+(pi/2)*F); %Intensidade de
radiação solar global [W/m²]

Ps=Alpha_s*D*1e-3*I_T; %Aquecimento Solar [W/m]

% CÁLCULO AMPACIDADE - I

R_ac_T_s_c=R_ac_T1+(T_s-T1)*((R_ac_T2-R_ac_T1)/(T2-T1)); %Resistência AC do condutor na
temperatura T_s [Ohm/m]

I_cigre=sqrt((Pr+Pc-Ps)./R_ac_T_s_c); %Ampacidade [A]

RTD_cigre=((I_cigre.^2.*R_ac_T_s_c)/(2*pi.*Lambda)).*((1/2)-(D_1.^2./(D.^2-
D_1.^2)).*(log(D./D_1))); %Diferença radial de temperatura [°C]

Pj=I_cigre.^2.*R_ac_T_s_c; %Aquecimento por Efeito Joule [W/m]

```

## APÊNDICE B – Rotina em *MATLAB* para cálculo da ampacidade pelo método IEEE

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%                               IEEE STD 738-2012
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% EQUILÍBRIO TÉRMICO DO CONDUTOR

% Pj + Ps + Pm + Pi = Pc + Pr + Pw
% Onde:
% Pj : Aquecimento Joule
% Ps : Aquecimento Solar
% Pm : Aquecimento Magnético
% Pi : Aquecimento Corona
% Pc : Resfriamento Convecção
% Pr : Resfriamento por Radiação
% Pw : Resfriamento Evaporativo

% SIMPLIFICAÇÃO DO EQUILÍBRIO TÉRMICO

% Pj+ Ps = Pc + Pr

clc
rad=pi/180;

Condutor=1;

% 1 - CAA Drake
% 2 - T-CAA T-Drake
% 3 - CA Anemone
% 4 - T-CA T-Anemone
% 5 - T-CAA AeroZ Drake
% 6 - ACCC Drake
% 7 - ACCR Drake

switch Condutor
    case 1
        %Condutor (CAA Drake - 26/7 795 kcmil)
        D=28.1; %Diâmetro externo do condutor [mm]
        D_1=10.4; %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
        d=4.44; %Diâmetro do fio externo [mm]
        R_ac_T1=7.283e-5; %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
        R_ac_T2=8.688e-5; %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
        T1=25; %Temperatura T1 [°C]
        T2=75; %Temperatura T2 [°C]

    case 2
        %Condutor (T-CAA T-Drake - 26/7 795 kcmil)
        D=28.13; %Diâmetro externo do condutor [mm]
        D_1=10.36; %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
        d=4.44; %Diâmetro do fio externo [mm]
        R_ac_T1=7.815e-5; %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
        R_ac_T2=11.44e-5; %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
        T1=25; %Temperatura T1 [°C]
        T2=150; %Temperatura T2 [°C]

    case 3
        %Condutor (CA Anemone - 37 874.5 kcmil)
        D=27.37; %Diâmetro externo do condutor [mm]
        D_1=0; %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
        d=3.91; %Diâmetro do fio externo [mm]
        R_ac_T1=6.8541e-5; %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
        R_ac_T2=8.1037e-5; %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
        T1=25; %Temperatura T1 [°C]
        T2=75; %Temperatura T2 [°C]

    case 4
        %Condutor (T-CA T-Anemone - 37 874.5 kcmil)
        D=27.37; %Diâmetro externo do condutor [mm]
        D_1=0; %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
        d=3.91; %Diâmetro do fio externo [mm]

```

```

R_ac_T1=6.9137e-5;      %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
R_ac_T2=10.1897e-5;    %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
T1=25;                 %Temperatura T1 [°C]
T2=150;                %Temperatura T2 [°C]

    case 5
D=28.1;                %Condutor (T-CAA AeroZ Drake - 26/7 1000,6 kcmil)
D_1=10.36;            %Diâmetro externo do condutor [mm]
d=1;                   %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
R_ac_T1=5.751e-5;     %Diâmetro do fio externo [mm]
R_ac_T2=8.524e-5;     %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
T1=25;                 %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
T2=150;                %Temperatura T1 [°C]
                        %Temperatura T2 [°C]

    case 6
D=28.1;                %Condutor (ACCC Drake - 26/7 1025,6 kcmil)
D_1=9.53;             %Diâmetro externo do condutor [mm]
d=1;                   %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
R_ac_T1=5.54e-5;     %Diâmetro do fio externo [mm]
R_ac_T2=8.88e-5;     %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
T1=25;                 %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
T2=180;                %Temperatura T1 [°C]
                        %Temperatura T2 [°C]

    case 7
D=28.6;                %Condutor (ACCR 824-T16 - Drake - 26/19 824 kcmil)
D_1=10.6;             %Diâmetro externo do condutor [mm]
d=4.5;                %Diâmetro do núcleo de aço [mm]
R_ac_T1=6.798e-5;     %Diâmetro do fio externo [mm]
R_ac_T2=12.487e-5;   %Resistência AC do condutor na temperatura T1 [Ohm/m]
T1=25;                 %Resistência AC do condutor na temperatura T2 [Ohm/m]
T2=240;                %Temperatura T1 [°C]
                        %Temperatura T2 [°C]

end

Lambda=1;              %Efetiva condutividade térmica radial do condutor [W/m.K]
g=9.807;               %Aceleração gravitacional [m/s²]

% T_s: Temperatura superfície do condutor [°C]
T_s=85;
% T_s=linspace(55,85,1000);

% Epsilon_s: Emissividade da superfície do condutor no exemplo A [Adimensional]
Epsilon_s=0.8;
% Epsilon_s=linspace(0.27,0.95,1000);

% Alpha_s: Absortividade solar da superfície do condutor no exemplo A [Adimensional]
Alpha_s=0.8;
% Alpha_s=linspace(0.28,0.93,1000);

% Características Ambientais
% T_a: Temperatura ar ambiente [°C]
T_a=25;
% T_a=linspace(0,40,1000);

% V: Velocidade do vento [m/s]
V=1;
%V=linspace(0,8,1000);

% Delta: Ângulo de ataque do vento [°]
Delta=60;
%Delta=linspace(0,90,1000);

% y: Altitude acima do nível do mar [m]
y=0;
%y=linspace(0,2000,1000);

% Condições Solares
% N: Dia do ano - 1 para 01/01 e 365 para 31/12 [Adimensional]
N=80;
%N=linspace(1,365,365);

% H: Hora do dia (24h) [Adimensional]

```

```

H=11;
%H=linspace(8,16,1000);

% Phi: Latitude [°]
Phi=-30;
%Phi=linspace(-33,5,1000);

% AT: Claresa da atmosfera - 0 para limpo / 1 para nublado/industrial [Adimensional]
AT=0;
%AT=1;

% Gamma_c: Azimute do condutor - 90° p/ direção Leste-Oeste [°]
Gamma_c=90;
%Gamma_c=linspace(0,90,1000);

% CÁLCULO RESFRIAMENTO POR CONVECÇÃO - q_c

T_f=(T_s+T_a)/2; %Temperatura de filme [°C]

Gamma=(1.293-1.525e-4*y+6.379e-9*y.^2)/(1+0.00367*T_f); %Densidade do ar local [Kg/m³]

Micro_f=(1.458e-6*(T_f+273).^1.5)/(T_f+383.4); %Viscosidade dinâmica de Temp de filme
[Kg/m*s]

Lambda_f=2.424e-2+7.477e-5.*T_f-4.407e-9.*T_s.^2; %Condutividade térmica de filme
[W/°C*m]

q_cn=3.645.*Gamma.^0.5*(D*1e-3).^0.75.*(T_s-T_a).^1.25; %Resfriamento por convecção
natural [W/m]

Re=(D*1e-3*Gamma*V)/Micro_f; %Número Reynolds [Adimensional]

K_angle=1.194-cos(Delta*rad)+0.194*cos((2*Delta)*rad)+0.368*sin((2*Delta)*rad);

q_c1=K_angle*(1.01+1.347*Re.^0.52).*Lambda_f.*(T_s-T_a); %Resfriamento por convecção
forçada 1 [W/m]

q_c2=K_angle*0.754*Re.^0.6.*Lambda_f.*(T_s-T_a); %Resfriamento por convecção forçada 2
[W/m]

q_cf=max(q_c1,q_c2);

q_c=max(q_cf,q_cn); %Resfriamento por convecção forçada [W/m]

% CÁLCULO RESFRIAMENTO POR RADIAÇÃO - q_r

q_r=17.8*D*1e-3*Epsilon_s*((T_s+273)/100).^4-((T_a+273)/100).^4); %Resfriamento por
radiação [W/m]

% CÁLCULO AQUECIMENTO SOLAR - q_s

Delta_s=23.46*sin((284+N)/365*360*rad); %Inclinação solar [°]

Z=(H-12)*15; %Hora ângulo do sol [°]

H_s=(asin(cos(Phi*rad).*cos(Delta_s.*rad).*cos(Z.*rad)+sin(Phi*rad)*sin(Delta_s*rad)))/
rad; %Altitude solar [°]

Chi=sin(Z*rad)/(sin(Phi*rad).*cos(Z*rad)-cos(Phi*rad).*tan(Delta_s.*rad)); %Variável de
azimute solar [°]

if length(Z) ~= length(Chi)
    Z=Z * ones(1,length(Chi));
end

%Definição da Constante de azimute solar - C
for (i=1:1:length(Chi))
    if Chi(i) >= 0

```

```

    if Z(i)<0 & Z(i)>=-180
        C(i)=0;
    elseif Z(i)>=0 & Z(i)<180
        C(i)=180;
    end
elseif Chi(i)<0
    if Z(i)<0 & Z(i)>=-180
        C(i)=180;
    elseif Z(i)>=0 & Z(i)<180
        C(i)=360;
    end
end
end
end

Gamma_s=C+(atan(Chi)/rad); %Azimute do sol [°]

Eta=(acos(cos(H_s.*rad).*cos((Gamma_s-Gamma_c)*rad)))/rad; %Ângulo de incidência do
feixe solar em relação ao eixo do condutor [°]

%Coeficientes do Polinômio de Intensidade de Aquecimento Solar - Qs
if AT==0 %Se atmosfera limpa
    Aa=-42.2391;
    Ba=63.8044;
    Ca=-1.9220;
    Da=3.46921e-2;
    Ea=-3.61118e-4;
    Fa=1.94318e-6;
    Ga=-4.07608e-9;
elseif AT==1 %Se atmosfera nublada/industrial
    Aa=53.1821;
    Ba=14.2110;
    Ca=6.6138e-1;
    Da=-3.1658e-2;
    Ea=5.4654e-4;
    Fa=-4.3446e-6;
    Ga=1.3236e-8;
end

Q_s=Aa+Ba*H_s+Ca*H_s.^2+Da*H_s.^3+Ea*H_s.^4+Fa*H_s.^5+Ga*H_s.^6; %Intensidade de
Aquecimento Solar [W/m²]

K_solar=1+(1.148e-4*y)+(-1.108e-8*y.^2); %Fator de correção de Q_s em função da altitude
[Adimensional]

Q_se=K_solar*Q_s; %Intensidade de Aquecimento Solar corrigido pela altitude [W/m²]

q_s=Alpha_s.*Q_se.*sin(Eta.*rad)*D*1e-3; %Aquecimento Solar [W/m]

% CÁLCULO AMPACIDADE - I

R_ac_T_s_i=R_ac_T1+(T_s-T1)*((R_ac_T2-R_ac_T1)/(T2-T1)); %Resistência AC do condutor na
temperatura T_s [Ohm/m]

I_ieee=sqrt((q_r+q_c-q_s)./R_ac_T_s_i); %Ampacidade [A]

RTD_ieee=((I_ieee.^2.*R_ac_T_s_i)/(2*pi.*Lambda)).*((1/2)-(D_1.^2./(D.^2-
D_1.^2)).*(log(D./D_1))); %Diferença radial de temperatura [°C]

q_j=I_ieee.^2.*R_ac_T_s_i; %Aquecimento por Efeito Joule [W/m]

```