

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**

**ESCOLA DE ENGENHARIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO DE AMPACIDADE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEAS**

**DEREK SILVA CABRAL**

**Porto Alegre**

**2018**



**DEREK SILVA CABRAL**

**ESTUDO DE AMPACIDADE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEAS**

**Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Elétrica.**

**Orientador (a): Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos**

**Porto Alegre**

**2018**

Silva Cabral, Derek

Estudo de ampacidade de linhas de transmissão subterrâneas / Derek Silva Cabral. -- 2018.

112 f.

Orientador: Flávio Antônio 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, 2018.

1. Ampacidade. 2. Linhas de transmissão subterrâneas. 3. IEEE Std. 835. 4. IEC 60287. I. Antônio Becon Lemos, Flávio, orient. II. Título.

**DEREK SILVA CABRAL**

**ESTUDO DE AMPACIDADE DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SUBTERRÂNEAS**

**Esta monografia foi analisada e julgada adequado para a obtenção do título Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Curso de Graduação Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.**

---

**Flávio Antônio Becon Lemos (Professor Orientador)**

---

**Alberto do Canto (Coordenador do Curso)**

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

**BANCA EXAMINADORA**

**Gustavo Dorneles Ferreira – UFRGS (DELET) \_\_\_\_\_**

**Sérgio Haffner – UFRGS (DELET) \_\_\_\_\_**



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha família e todos aqueles que me deram um suporte desde o meu nascimento até o presente momento.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço o Professor Doutor Flávio Antônio Becon Lemos responsável pela orientação dessa monografia, por todo o apoio, disponibilidade e, conselhos dados.

Agradeço aos meus pais e familiares pelo suporte dado durante toda a minha jornada estudantil e principalmente nesse período de desenvolvimento da monografia.

Agradeço também aos meus amigos e colegas com os quais tive bons momentos de reflexão e descontração nessa jornada.



Obstáculos não podem te parar. Se você topar com uma parede, não vire e desista. Descubra como escalá-la, passe por ela, trabalhe nisso.

Michael Jordan



## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo estudar a ampacidade de diferentes tipos de linhas de transmissão subterrâneas, utilizando a norma IEEE Std 835 - Power Cable Ampacity Tables e a norma europeia IEC 60287 – Calculation of the Current Rating. Para realizar esses estudos foi desenvolvido um software para suportar as simulações e permitir comparar e compreender o comportamento de cada norma para um determinado modelo de linha subterrânea. O software é de simples utilização, sendo desenvolvido através do recurso Interface Gráfica do Usuário (GUI – Graphical User Interface) do software MATLAB ®2013a cuja ferramenta apresentou ótimos resultados em comparativo com os exemplos de linhas subterrâneas analisados e aplicados. Por fim, esse trabalho facilitará a compreensão e a determinação da ampacidade em linhas subterrâneas.

Palavras-chave: Ampacidade, Software, IEEE Std 835, IEC 60287, Linhas de Transmissão Subterrâneas.



## **ABSTRACT**

This undergraduate thesis has the aim of study the ampacity from different types of underground transmission lines using the standard IEEE Std 835 – Power Cable Ampacity Tables and the standard IEC 60287 – Calculation of the Current Rating. This study was developed with a software to give support for the simulations and allow to compare and understand the behavior of each standard for a model of underground line. This software is simple and it is developed by Graphical User Interface (GUI) a resource from software MATLAB ©2013a. This program presented good results in comparative with the examples from underground lines that was analyzed and applied. Finally, this undergraduate thesis will make easy the understanding and the determination of ampacity in underground lines.

**Keywords:** Ampacity, Software, IEEE Std 835, IEC 60287, Underground Transmission Lines.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |     |
|---|-----|
| Figura 1 – Redes subterrâneas no Brasil (2001 - 2012) .....                               | 39  |
| Figura 2 - Percentual de redes de distribuição subterrâneas em algumas cidades .....      | 39  |
| Figura 3 – Camadas que compõe um cabo isolado .....                                       | 42  |
| Figura 4 - Tipos de composições do condutor.....  | 43  |
| Figura 5 – Tipos de formatos do condutor .....  | 43  |
| Figura 6 – Representação do efeito pelicular (skin) .....                                 | 47  |
| Figura 7 – Representação do efeito de proximidade .....                                   | 47  |
| Figura 8 – Capacitância entre condutor e blindagem metálica.....                          | 48  |
| Figura 9 – Corrente de perda dielétrica .....   | 49  |
| Figura 10 – Representação de uma linha trifásica com transposição da blindagem metálica.. | 50  |
| Figura 11 – Representação da lei de Ohm.....  | 51  |
| Figura 12 – Representação da lei Térmica .....  | 52  |
| Figura 13 – Representação do circuito térmico .....                                       | 55  |
| Figura 14 – Representação do circuito térmico .....                                       | 65  |
| Figura 15 – Fluxograma .....  | 79  |
| Figura 16 – Interface do software.....  | 80  |
| Figura 17 – Temperatura do condutor vs ampacidade .....                                   | 85  |
| Figura 18 – Tensão fase-neutro vs ampacidade.....   | 85  |
| Figura 19 – Profundidade da linha vs ampacidade.....                                      | 86  |
| Figura 20 – Especificações técnicas do cabo da linha de 36 kV - I .....                   | 103 |
| Figura 21 – Especificações técnicas do cabo da linha de 36 kV - II.....                   | 105 |



## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 – Evolução dos materiais isolantes .....                                  | 38  |
| Tabela 2 – Faixa de tensão dos isolantes .....                                     | 44  |
| Tabela 3 – Fatores de perdas dielétricas .....                                     | 49  |
| Tabela 4 – Parâmetros da linha.....  | 77  |
| Tabela 5 – Configurações de linha .....  | 78  |
| Tabela 6 – Diferenças entre as normas .....  | 83  |
| Tabela 7 – Dados da linha de transmissão subterrânea .....                         | 84  |
| Tabela 8 – Valores de ampacidade obtidos .....                                     | 87  |
| Tabela 9 – Valores do software e dos exemplos das normas .....                     | 87  |
| Tabela 10 – Parâmetros da linha de 0,6 kV (3 cabos em um duto).....                | 93  |
| Tabela 11 – Parâmetros da linha de 15 kV (diretamente enterrada) .....             | 95  |
| Tabela 12 – Parâmetros da linha de 35 kV (3 cabos um em cada duto).....            | 97  |
| Tabela 13 – Parâmetros da linha de 36 kV (3 cabos em um duto) – IEEE Std 835 ..... | 99  |
| Tabela 14 – Parâmetros da linha de 36 kV (3 cabos em um duto) – IEC 60287.....     | 101 |



## LISTA DE SIGLAS

|      |  |
|------|--|
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| IEC  | <i>International Electrotechnical Commission</i>         |
| GUI  | <i>Graphical User Interface</i>                          |
| XLPE | Polietileno Reticulado                                   |
| EPR  | Borracha Etileno Propileno                               |
| PE   | Polietileno  |
| PP   | Propileno  |
| PVC  | Polivinil  |
| PEMD | Polietileno de Média Densidade                           |
| PEAD | Polietileno de Alta Densidade                            |
| TOF  | <i>Thermal on Feet</i>                                   |
| SIC  | <i>Specific Inductive Capacitance</i>                    |



## LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\theta$        | Temperatura de operação [ $^{\circ}\text{C}$ ];   |
| $\theta_m$      | Temperatura média do espaço entre o cabo e o duto [ $^{\circ}\text{C}$ ];               |
| $\lambda$       | Fator de perda na blindagem;  |
| $\lambda_0$     | Fator que depende do modelo da linha;   |
| $\lambda_1$     | Perdas causadas pela corrente circulante na blindagem;                                  |
| $\lambda_2$     | Perdas causadas pela corrente de Foucault na blindagem;                                 |
| $\rho_c$        | Resistividade térmica do duto [ $^{\circ}\text{C cm/W}$ ];                              |
| $\rho_e$        | Resistividade térmica do solo [ $^{\circ}\text{C cm/W}$ ];                              |
| $\rho_i$        | Resistividade térmica do isolante [ $^{\circ}\text{C cm/W}$ ];                          |
| $\rho_j$        | Resistividade térmica da jaqueta [ $^{\circ}\text{C cm/W}$ ];                           |
| $\rho_s$        | Resistividade da blindagem;   |
| $\rho_{T_1}$    | Resistividade térmica do isolante [ $\text{K m/W}$ ];                                   |
| $\rho_{T_2}$    | Resistividade térmica do material entre a blindagem e a armadura [ $\text{K m/W}$ ];    |
| $\rho_{T_3}$    | Resistividade térmica do revestimento externo [ $\text{K m/W}$ ];                       |
| $\rho_{T_4}$    | Resistividade térmica do duto [ $\text{K m/W}$ ];                                       |
| $\rho_{T_5}$    | Resistividade térmica do duto [ $\text{K m/W}$ ];                                       |
| $\Delta\theta$  | Diferença de temperatura entre o condutor e o ambiente externo [ $\text{K}$ ];          |
| $\Delta_1$      | Fator que depende do modelo da linha;   |
| $\Delta_2$      | Fator que depende do modelo da linha;   |
| $\Delta T_d$    | Varição de temperatura devido à perda no dielétrico [ $^{\circ}\text{C}$ ];             |
| $\alpha$        | Difusividade do meio;   |
| $\alpha_{20}$   | Constante de massa do condutor na temperatura de $20^{\circ}\text{C}$ [ $1/\text{K}$ ]; |
| $\delta$        | Fator de dissipação;  |
| $\omega$        | Frequência angular [ $\text{rad/s}$ ];  |
| $\varepsilon$   | Permissividade relativa do isolante;  |
| $\varepsilon_r$ | Permissividade relativa do isolante;  |
| $A$             | Constante;  |
| $B$             | Constante;  |



|          |  |
|----------|--|
| $C$      | Constante;   |
| $C_{ap}$ | Capacitância do cabo [F/m];  |
| $D_j$    | Diâmetro externo da jaqueta [in];  |
| $D$      | Diâmetro externo do duto [in];   |
| $D'_a$   | Diâmetro externo da armadura [mm];                                       |
| $D'_b$   | Diâmetro externo da blindagem [mm];                                      |
| $d_c$    | Diâmetro do condutor [mm];   |
| $D_e$    | Diâmetro externo do cabo [mm];   |
| $D_{ex}$ | Diâmetro no qual a porção de terra do circuito térmico começa [in];      |
| $d$      | Diâmetro médio da blindagem [mm];  |
| $D_i$    | Diâmetro externo do isolante [mm];                                       |
| $D_0$    | Diâmetro externo do duto [mm];   |
| $D_c$    | Diâmetro do condutor [in];   |
| $D_d$    | Diâmetro interno do duto [mm];   |
| $D_p$    | Diâmetro interno do duto [in];   |
| $D_s$    | Diâmetro externo da blindagem [mm];                                      |
| $D_s'$   | Diâmetro que circunscreve os cabos que se encontram dentro do duto [in]; |
| $D_{sm}$ | Diâmetro da blindagem [in];  |
| $D_x$    | Difusividade térmica [in];   |
| $E$      | Tensão entorno do dielétrico [kV];                                       |
| $F$      | Fator do efeito de aquecimento mútuo entre cabos;                        |
| $f$      | Frequência da fonte [Hz];  |
| $G$      | Fator geométrico;  |
| $I$      | Ampacidade [A];  |
| $k_p$    | Coeficiente do fator de proximidade;                                     |
| $k_s$    | Coeficiente do efeito pelicular (skin);                                  |
| $L$      | Profundidade da linha subterrânea [mm ou in];                            |
| $LF$     | Fator de perda;  |
| $lf$     | Fator de carga;  |
| $n$      | Número de condutores;  |



|                 |  |
|-----------------|--|
| $n'$            | Número de condutores;  |
| $Q_s$           | Taxa de perdas ocasionadas no condutor, na blindagem;                                |
| $Q_e$           | Taxa de perdas ocasionadas no condutor, na blindagem e no duto metálico;             |
| $R$             | Resistência do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\Omega/m$ ];         |
| $R'$            | Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\Omega/m$ ];      |
| $R_0$           | Resistência DC do condutor na temperatura de 20 °C [ $\Omega/m$ ];                   |
| $R_{ac}$        | Resistência em corrente alternada [ $\Omega/m$ ];                                    |
| $\bar{R}_{ca}'$ | Resistência térmica efetiva do circuito térmico [TOF];                               |
| $\bar{R}_d'$    | Resistência térmica do duto [TOF];   |
| $\bar{R}_{da}'$ | Resistência térmica efetiva entre o condutor e o ambiente [TOF];                     |
| $R_{dc}$        | Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\mu\Omega/ft$ ];  |
| $R_{dc_{tab}}$  | Resistência DC do condutor na temperatura da tabela [ $\mu\Omega/ft$ ];              |
| $\bar{R}_e'$    | Resistência térmica do ambiente externo ao duto [TOF];                               |
| $\bar{R}_i'$    | Resistência térmica entre o condutor e a blindagem [TOF];                            |
| $\bar{R}_j'$    | Resistência térmica da jaqueta (cobertura) [TOF];                                    |
| $\bar{R}_{sd}'$ | Resistência térmica entre a superfície do cabo e a superfície interna do duto [TOF]; |
| $\bar{R}_{se}'$ | Resistência térmica entre a blindagem e o duto [TOF];                                |
| $R_s$           | Resistência da blindagem na temperatura de operação [ $\Omega/m$ ];                  |
| $S$             | Distância entre os eixos dos condutores [in ou mm];                                  |
| $s$             | Distância do centro do condutor ao centro do cabo de 3 condutores [in];              |
| $s_d$           | Espessura do duto [in];  |
| $t$             | Espessura da jaqueta [in];   |
| $t_s$           | Espessura da blindagem [mm];   |
| $t_2$           | Espessura do material entre a blindagem e a armadura [mm];                           |
| $t_3$           | Espessura do revestimento externo [mm];  |
| $T_0$           | Constante de acordo com o material condutor;   |
| $T_1$           | Resistência térmica entre o condutor e a blindagem (isolante) [K m/W];               |
| $T_2$           | Resistência térmica entre a blindagem e a armadura [K m/W];                          |
| $T_3$           | Resistência térmica do revestimento externo [K m/W];                                 |
| $T_4$           | Resistência térmica entre a parte externa do cabo e o ambiente [K m/W];              |



|           |  |
|-----------|--|
| $T'_4$    | Resistência térmica entre a superfície do cabo e a superfície interna do duto [K m/W]; |
| $T''_4$   | Resistência térmica do duto [K m/W];   |
| $T_4'''$  | Resistência térmica externa ao duto [K m/W];   |
| $T_c$     | Temperatura do condutor [°C];  |
| $T_a$     | Temperatura do ambiente [°C];  |
| $T_m$     | Temperatura média entre cabo e duto [°C];  |
| $T_{tab}$ | Temperatura da tabela [°C];  |
| $W_a$     | Potência calorífica da armadura [W/m];   |
| $W_c$     | Potência calorífica do condutor [W/m ou W/ft];   |
| $W_d$     | Potência calorífica do dielétrico [W/m ou W/ft];                                       |
| $W_p$     | Potência calorífica do duto [W/ft];  |
| $W_s$     | Potência calorífica da blindagem [W/m ou W/ft];  |
| $u$       | Coefficiente que relaciona profundidade da linha e o diâmetro externo do duto;         |
| $U$       | Constante;   |
| $U_0$     | Tensão fase-neutro [V];  |
| $V$       | Constante;   |
| $X$       | Reatância da blindagem [ $\Omega$ /m];   |
| $X_M$     | Reatância mútua [ $\mu\Omega$ /ft];  |
| $Y_p$     | Fator de perda por efeito de proximidade;  |
| $Y_s$     | Fator de perda por efeito pelicular (skin);  |
| $Y$       | Constante;   |
| $Y_c$     | Fator de perdas originadas no condutor;  |
| $Y_s$     | Fator de perdas originadas no condutor;  |
| $Y_{cs}$  | Fator de perda por efeito pelicular (skin);  |
| $Y_{cp}$  | Fator de perda por efeito de proximidade;  |
| $Y_p$     | Fator de perda originada no duto ou tubo metálico;                                     |
| $Y_{sc}$  | Fator de perdas ocasionadas pelo efeito da corrente circulante;                        |
| $Y_{se}$  | Fator de perdas ocasionadas pela corrente de Foucault.                                 |



## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>35</b> |
| 1.1 O ESTUDO .....   | 35        |
| 1.2 HISTÓRICO .....  | 36        |
| <b>1.2.1 Histórico Internacional .....</b>                                 | <b>36</b> |
| <b>1.2.2 Evolução das Tecnologias de Isolamento .....</b>                  | <b>37</b> |
| <b>1.2.3 Histórico Brasileiro .....</b>                                    | <b>38</b> |
| <b>2 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E TÉRMICAS DOS CABOS ISOLADOS .....</b>     | <b>41</b> |
| 2.1 AMPACIDADE .....   | 41        |
| 2.2 CABOS ISOLADOS .....   | 42        |
| <b>2.2.1 Condutor .....</b>  | <b>42</b> |
| <b>2.2.2 Isolante .....</b>  | <b>44</b> |
| <b>2.2.3 Blindagem Semicondutora Extrudada .....</b>                       | <b>44</b> |
| <b>2.2.4 Blindagem Metálica.....</b>                                       | <b>45</b> |
| <b>2.2.5 Armadura.....</b>   | <b>45</b> |
| <b>2.2.6 Cobertura .....</b>   | <b>46</b> |
| 2.3 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS .....  | 46        |
| <b>2.3.1 Efeito Pelicular .....</b>  | <b>46</b> |
| <b>2.3.2 Efeito de Proximidade.....</b>                                    | <b>47</b> |
| <b>2.3.3 Capacitância .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>2.3.4 Perdas Dielétricas .....</b>                                      | <b>48</b> |
| <b>2.3.5 Perdas na Blindagem Metálica .....</b>                            | <b>50</b> |
| <b>2.3.6 Perdas na Armação .....</b>                                       | <b>51</b> |
| <b>2.3.7 Perdas no Duto .....</b>  | <b>51</b> |
| 2.4 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS .....   | 51        |
| <b>2.4.1 Circuito Térmico .....</b>  | <b>51</b> |
| <b>2.4.2 Resistência Térmica entre Condutor e Blindagem Metálica.....</b>  | <b>53</b> |
| <b>2.4.3 Resistência Térmica entre Blindagem Metálica e Armadura .....</b> | <b>53</b> |
| <b>2.4.4 Resistência Térmica da Cobertura .....</b>                        | <b>54</b> |
| <b>2.4.5 Resistência Térmica entre Cabo e Duto .....</b>                   | <b>54</b> |
| <b>2.4.6 Resistência Térmica do Duto.....</b>                              | <b>54</b> |
| <b>2.4.7 Resistência Térmica do Ambiente Externo.....</b>                  | <b>54</b> |



|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>3</b> | <b>NORMAS PARA DETERMINAÇÃO DA AMPACIDADE</b>         | <b>55</b> |
| 3.1      | NORMA IEC 60287 – CALCULATION OF THE CURRENT RATING   | 55        |
| 3.1.1    | Representação do Circuito Térmico                     | 55        |
| 3.1.2    | Cálculo da Ampacidade                                 | 56        |
| 3.1.3    | Resistência DC do Condutor                            | 57        |
| 3.1.4    | Resistência em Corrente Alternada                     | 57        |
| 3.1.5    | Perda no Dielétrico                                   | 58        |
| 3.1.6    | Perdas na Blindagem                                   | 59        |
| 3.1.7    | Perdas na Armadura                                    | 61        |
| 3.1.8    | Resistência Térmica entre o Condutor e a Blindagem    | 61        |
| 3.1.9    | Resistência Térmica entre a Blindagem e a Armadura    | 62        |
| 3.1.10   | Resistência Térmica do Revestimento Externo (Jaqueta) | 62        |
| 3.1.11   | Resistência Térmica entre o Cabo e o Duto             | 62        |
| 3.1.12   | Resistência Térmica do Duto                           | 63        |
| 3.1.13   | Resistência Térmica Externa                           | 63        |
| 3.2      | NORMA IEEE STD 835 – POWER CABLE AMPACITY TABLES      | 64        |
| 3.2.1    | Representação do Circuito Térmico                     | 65        |
| 3.2.2    | Cálculo da Ampacidade                                 | 66        |
| 3.2.3    | Resistência DC do Condutor                            | 66        |
| 3.2.4    | Perdas no Condutor                                    | 67        |
| 3.2.5    | Perda no Dielétrico                                   | 68        |
| 3.2.6    | Perdas na Blindagem                                   | 69        |
| 3.2.7    | Perdas no Duto ou Tubo Metálico                       | 71        |
| 3.2.8    | Resistência Térmica entre o Condutor e a Blindagem    | 71        |
| 3.2.9    | Resistência Térmica do Revestimento Externo (Jaquetá) | 71        |
| 3.2.10   | Resistência Térmica entre o Cabo e o Duto             | 72        |
| 3.2.11   | Resistência Térmica do Duto                           | 72        |
| 3.2.12   | Resistência Térmica Externa                           | 73        |
| 3.2.13   | Determinação da Resistência Térmica Total             | 74        |
| <b>4</b> | <b>SOFTWARE DESENVOLVIDO</b>                          | <b>77</b> |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS</b>                                     | <b>83</b> |
| 5.1      | COMPARAÇÃO TEÓRICA ENTRE AS NORMAS                    | 83        |
| 5.2      | COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS COM UM MODELO DE LINHA     | 84        |
| 5.3      | COMPARAÇÃO COM SOFTWARE E OS EXEMPLOS DAS NORMAS      | 87        |



|  |            |
|--|------------|
| <b>6 CONCLUSÃO.....</b>  | <b>89</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                  | <b>91</b>  |
| <b>APÊNDICE A – TABELA COM PARÂMETROS DA LINHA DE 0,6 kV .....</b>       | <b>93</b>  |
| <b>APÊNDICE B – TABELA COM PARÂMETROS DA LINHA DE 15 kV .....</b>        | <b>95</b>  |
| <b>APÊNDICE C – TABELA COM PARÂMETROS DA LINHA DE 35 kV .....</b>        | <b>97</b>  |
| <b>APÊNDICE D – TABELA COM PARÂMETROS DA LINHA DE 36 kV (IEEE).....</b>  | <b>99</b>  |
| <b>APÊNDICE E – TABELA COM PARÂMETROS DA LINHA DE 36 kV (IEC).....</b>   | <b>101</b> |
| <b>ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CABO DA LINHA DE 36 kV - I..</b> | <b>103</b> |
| <b>ANEXO B – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CABO DA LINHA DE 36 kV - II.</b> | <b>105</b> |



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 O ESTUDO

Linhas de transmissão são fundamentais para transmitir energia elétrica com confiabilidade de um local a outro. Dentro das linhas de transmissão existem dois tipos, aéreo e subterrâneo. Atualmente no Brasil o número de linhas de transmissão subterrâneas instaladas não chega a 1% (BUNHEROTTO e OLIVEIRA, 2013). O elevado número de linhas aéreas é justificado principalmente pelo custo de instalação que é dez vezes menor que o da linha subterrânea (VELASCO, 2006). Entretanto, a linha subterrânea possui um custo de manutenção duas vezes menor (VELASCO, 2006), e quando o assunto é confiabilidade ela possui uma larga vantagem por sofrer um número menor de interrupções que a linha aérea. Os motivos que levam a linha aérea a ter um número maior de interrupções são inúmeros, sendo os principais: exposição à eventos naturais como raios e ventos fortes, além de quedas de árvores e ações de vandalismo realizadas por pessoas.

Este trabalho tem como objetivo realizar o estudo da ampacidade de linhas de transmissão subterrâneas, através do desenvolvimento de um software que determine o valor da ampacidade de diferentes tipos de linhas subterrâneas. Esse software será desenvolvido com o recurso Interface Gráfica do Usuário (GUI) do MATLAB, onde a critério do usuário poderá ser inserido dimensões de cabos e dutos, valores de temperatura ambiente, temperatura interna do condutor e temperatura interna do duto, além de parâmetros específicos como por exemplo resistividades dos materiais envolvidos. Além dos dados que compõe a linha o usuário terá como optar por diferentes modelos de linha que possuem sua respectiva norma técnica para determinação da ampacidade. Nesse trabalho serão utilizadas duas normas técnicas, a norma IEEE Std 835 – Power Cable Ampacity Tables e a norma IEC 60387 – Calculation of the Current Rating.

A motivação que conduz esse trabalho está fundamentada na dificuldade que existe para se determinar a ampacidade quando o cálculo é de modo manual. Essa dificuldade se torna mais evidente principalmente em momentos em que está se projetando uma linha de transmissão subterrânea, pois ainda não se tem uma real certeza sobre qual cabo utilizar, qual duto selecionar, assim como o custo deles e outros fatores que influenciam nessa decisão. Nesses momentos é fundamental ter uma ferramenta que possibilite substituir um determinado valor da linha, como por exemplo o diâmetro do duto, e rapidamente atualizar o valor da ampacidade sem a necessidade de refazer todo o cálculo manual novamente. Portanto, este software será

desenvolvido com o intuito de facilitar a determinação da ampacidade em linhas subterrâneas de transmissão.

Este documento possui 6 capítulos. Nesse capítulo temos a introdução sobre o estudo e um breve resumo histórico das linhas de transmissão subterrâneas. No capítulo 2 é passada uma descrição detalhada de todas as camadas que compõe um cabo isolado, apresentando os principais materiais utilizados, as configurações e formatos mais usuais, as tensões de operação e principalmente a função no cabo isolado. Logo após, no mesmo capítulo, descreve-se as principais características elétricas e os fenômenos físicos, como efeitos eletromagnéticos, que ocorrem em uma linha enterrada. Continuando no capítulo 2 tem-se uma explicação de fenômenos físicos, no entanto, ao invés de elétricos eles são térmicos e relacionados com a resistividade térmica das camadas que compõe um sistema subterrâneo. O capítulo 3 apresenta os circuitos térmicos e as equações das normas IEC 60287 e IEEE Std 835 detalhando os elementos que compõe as equações e suas respectivas unidades. Capítulo 4 é dedicado para explicar o software a partir de um fluxograma e tabelas com os parâmetros que são requisitados para o cálculo da ampacidade. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos nesse trabalho a partir de tabelas que comparam os valores obtidos entre as normas e os valores obtidos do software com os exemplos apresentados pelas normas. Por fim, no capítulo 6 tem-se a conclusão da dissertação.

## 1.2 HISTÓRICO

### 1.2.1 Histórico Internacional

A primeira linha de transmissão formada por cabos isolados e enterrados que se tem conhecimento, foi empregada em uma linha de telégrafo em 1816. Anos depois em 1879, Thomas Edison desenvolveu um sistema subterrâneo para a iluminação externa da cidade de New York. A partir desse período de 1880 na cidade de New York notou-se a necessidade da expansão de linhas subterrâneas visto que os postes nas ruas estavam com inúmeros cabos de telecomunicação e outras estruturas elétricas. Quatro anos depois, foi criada uma lei decidindo que toda a fiação que antes era externa fosse transferida para baixo do solo, essa lei foi desenvolvida pela Câmara de representantes do Estado de New York (BUNHEROTTO e OLIVEIRA, 2013).

A medida que a isolação dos cabos evoluiu, novas possibilidades de aplicações subterrâneas surgiram. No período entre 1960 e 1970 uma grande expansão foi registrada nos

Estados Unidos, devido a evolução dos cabos e a expansão do sistema em condomínios residenciais. Esses condomínios estavam considerando critérios estéticos em suas comunidades, visto que, sistemas possuem uma larga vantagem em relação aos sistemas aéreos quando considerado o efeito de harmonia do ambiente construído (BUNHEROTTO e OLIVEIRA, 2013).

Nos países europeus na década de 1970, a Holanda optou por sistemas subterrâneos, pois perceberam a vantagem que cabos subterrâneos possuem com respeito à segurança, confiabilidade, e espaço físico ocupado nas cidades. Nos anos 2000 a Holanda foi considerada o país que mais expandiu suas linhas subterrâneas (BUNHEROTTO e OLIVEIRA, 2013).

### **1.2.2 Evolução das Tecnologias de Isolamento**

Os primeiros cabos isolados possuíam uma isolação formada por borracha não vulcanizada e coberta com chumbo. Em 1860 surgiram os cabos isolados com borracha vulcanizada empregados inicialmente em sistemas de iluminação, sendo posteriormente empregados em redes de distribuição de energia no ano de 1880. Durante o surgimento dos cabos isolados com borracha, os cabos isolados com papel estavam sendo testados. Em 1890 iniciou-se as aplicações com cabos isolados com papel impregnado em óleo uma vez que o óleo auxilia na retirada da umidade e do ar. Em 1897 foi fabricado pela National Conduit and Cable Co. o primeiro cabo isolado com papel que suportava uma tensão de 13 kV (BUNHEROTTO e OLIVEIRA, 2013).

Com a crescente necessidade de cabos isolados para suportarem tensões cada vez mais elevadas, o material isolante seguiu evoluindo. Em 1925 foi registrado o início de aplicações com óleo fluído para tensões acima de 69 kV, esse modelo de isolante permanece sendo aplicado para altas tensões, chegando a 345 kV em óleos de alta pressão. Em 1932 iniciou-se a aplicação de cabos isolados com gás nitrogênio na cidade de Londres. Após o início da década de 40 os isolante Polietileno (PE), Polietileno Reticulado (XLPE) e Borracha Etileno Propileno (EPR) começaram a ser utilizados em cabos subterrâneos e atualmente são os modelos de isolante mais comuns para aplicações de média tensão. A Tabela 1 mostra a evolução dos isolantes em cabos subterrâneos (BUNHEROTTO e OLIVEIRA, 2013).

Tabela 1 – Evolução dos materiais isolantes

| Ano  | Isolação             | Resultado                 |
|------|----------------------|---------------------------|
| 1860 | Borracha vulcanizada | Iluminação - Baixa tensão |
| 1862 | Juta e betume        | Maior tensão - até 2 kV   |
| 1890 | Papel em óleo        | Maior tensão - até 10 kV  |
| 1925 | Óleo fluído          | Acima de 69 kV            |
| 1932 | Gás                  | Acima de 15 kV            |
| 1947 | Polietileno - PE     | Menor espessura           |
| 1959 | XLPE/EPR             | Melhor isolação           |

Fonte: Bunherotto e Oliveira (2013, p. 36)

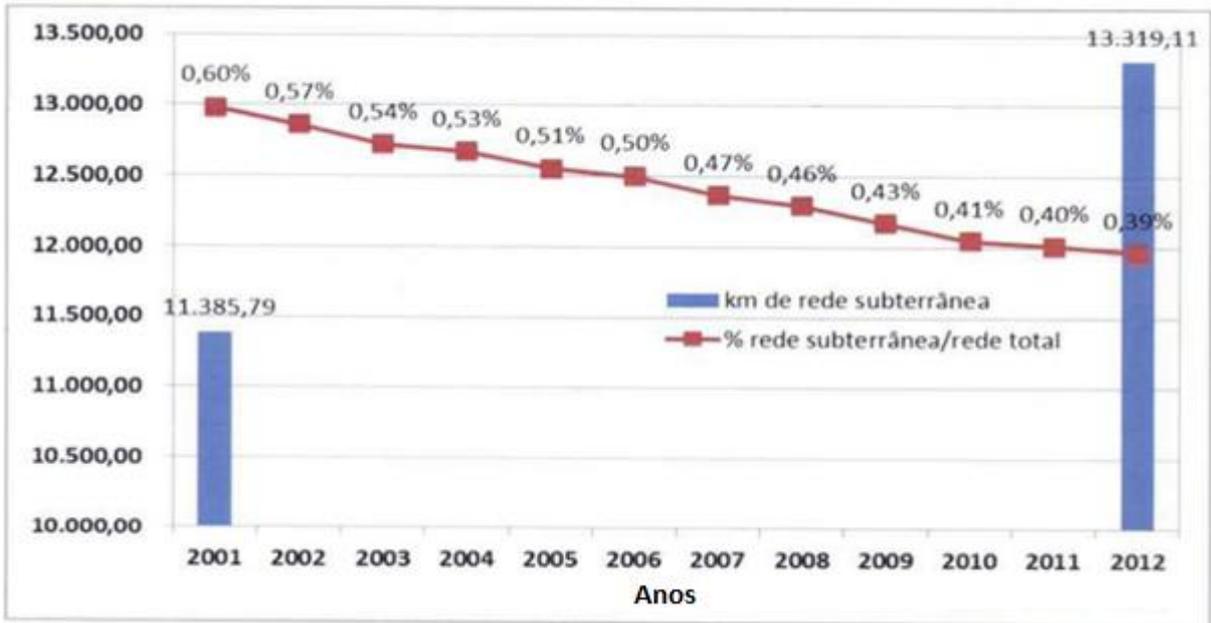
### 1.2.3 Histórico Brasileiro

No Brasil as primeiras cidades que iniciaram instalações de sistemas subterrâneos foram as cidades do Rio de Janeiro e de São Paulo. Em 1902 foi instalado um sistema radial de 2,2 kV na cidade São Paulo. No Rio de Janeiro as primeiras linhas subterrâneas foram desenvolvidas no período entre 1905 e 1909. Atualmente elas são as cidades brasileiras com a maior extensão de redes subterrâneas (BUNHEROTTO e OLIVEIRA, 2013).

Mesmo com uma história de mais de um século, o Brasil não possui menos de 1% de redes subterrâneas instaladas do total de redes instaladas no país. No período entre 2001 e 2012 o crescimento anual de linhas subterrâneas foi 1,31% enquanto que em países europeus o crescimento foi entorno de 2% a 3%. Com relação às cidades, dentre todas as cidades brasileiras, somente 50 cidades possuem uma linha subterrânea, sendo que, São Paulo e Rio de Janeiro, consideradas as cidades com a maior extensão subterrânea, possuem 7% e 11% de sua rede enterrada (BUNHEROTTO e OLIVEIRA, 2013).

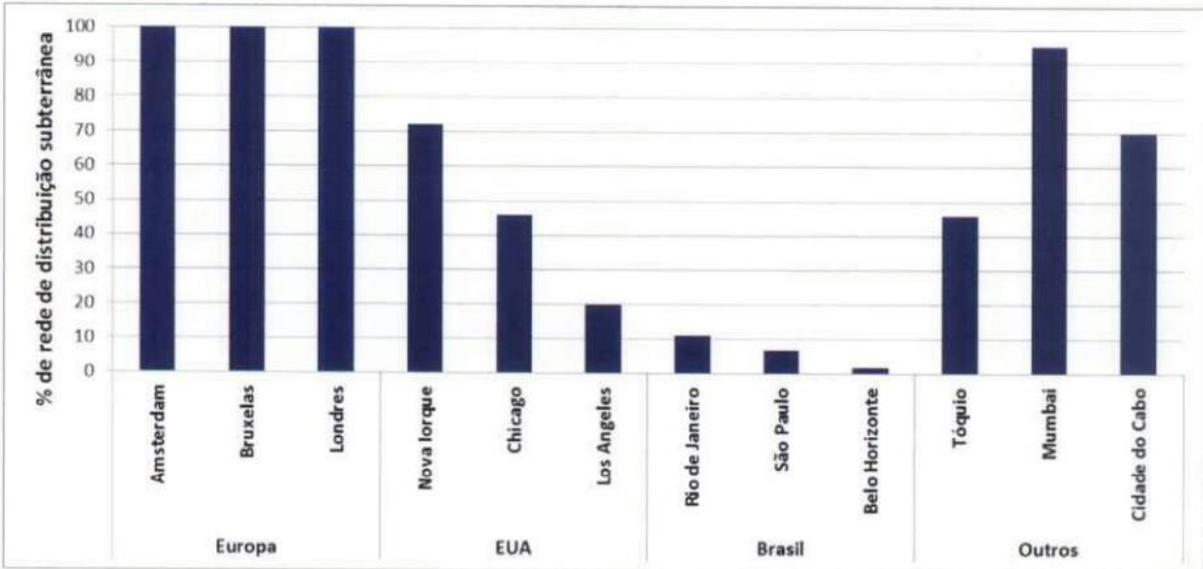
A Figura 1 apresenta comprimento total das redes subterrâneas nos anos de 2001 e 2012, assim como o percentual da rede subterrânea pela rede total no Brasil (ANEEL, 2014). A Figura 2 apresenta o percentual de redes subterrâneas em algumas cidades do mundo (ANEEL, 2014).

Figura 1 – Redes subterrâneas no Brasil (2001 - 2012)



Fonte: ANEEL (2014, p. 4)

Figura 2 - Percentual de redes de distribuição subterrâneas em algumas cidades



Fonte: ANEEL (2014, p. 5)



## 2 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E TÉRMICAS DOS CABOS ISOLADOS

### 2.1 AMPACIDADE

De forma geral, a ampacidade é definida como a capacidade máxima de corrente elétrica que um condutor pode conduzir antes que ele comece a se deteriorar (KELLY e LANDINGER, 1998).

A determinação da ampacidade de cabos subterrâneos envolve a solução de equações de transferência de calor, as quais definem a relação entre a corrente que circula no cabo e a temperatura no interior do cabo e no seu exterior. Esta situação envolve a determinação de como o calor gerado no interior do cabo é transferido para o ambiente externo, levando em conta o tipo de isolamento do cabo, a forma de instalação, as resistências térmicas das demais camadas que compõe o cabo e o tipo de solo (ANDERS, 2005).

A ampacidade de um cabo subterrâneo depende principalmente da eficiência do processo de dissipação de calor e os limites de temperatura impostos a isolamento do cabo. A transferência de calor do interior do cabo para o meio externo se efetua de várias maneiras, as quais serão descritas no decorrer deste trabalho (ANDERS, 2005).

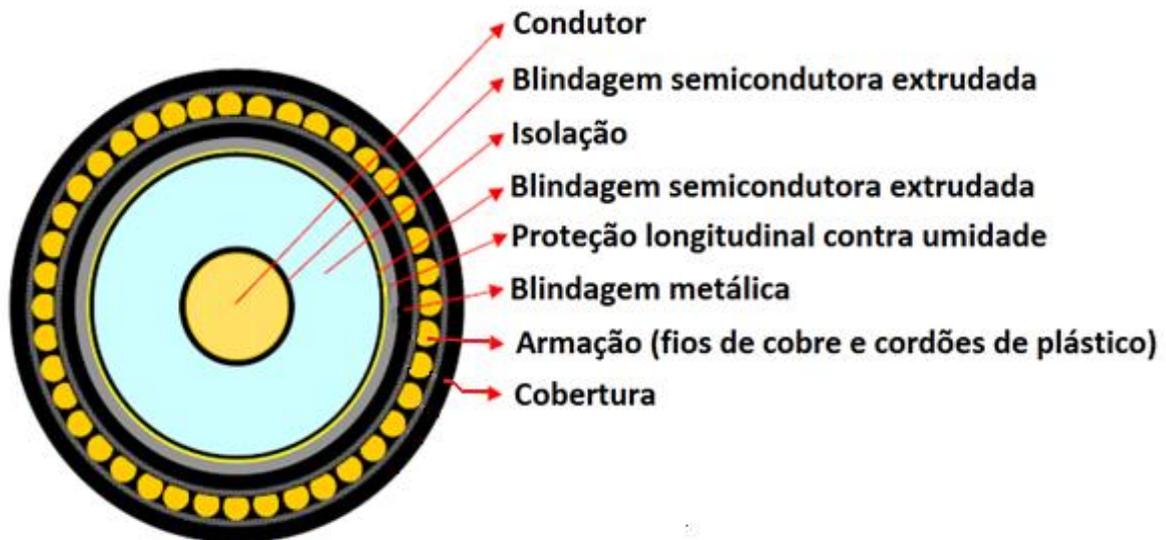
A ampacidade do condutor depende:

- resistência elétrica do condutor;
- frequência da corrente elétrica alternada;
- geometria do condutor que influi na sua dissipação de calor;
- temperatura ambiente;
- profundidade da linha com relação a superfície do solo;
- presença de outras linhas subterrâneas enterradas próximo ao cabo;
- resistência térmica das camadas que compõe o cabo isolado (Seção 2.4.1);
- resistência térmica do duto (Seção 2.4.6);
- resistência térmica do solo (Seção 2.4.7);
- perdas no material isolante (Seção 2.3.4);
- perdas ocasionadas por efeito pelicular (Seção 2.3.1);
- perdas ocasionadas por efeito de proximidade (Seção 2.3.2);
- perdas ocasionadas por corrente circulante (Seção 2.3.5);
- perdas ocasionadas por corrente de Foucault (Seção 2.3.5).

## 2.2 CABOS ISOLADOS

Em linhas subterrâneas os cabos utilizados são isolados com diferentes camadas em torno do condutor, como mostra a Figura 3 (LEE, 2009).

Figura 3 – Camadas que compõe um cabo isolado



Fonte: Lee et al. (2009, p. 4)

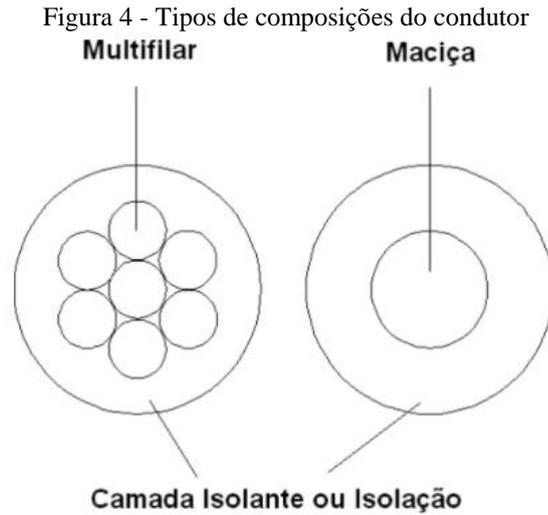
O núcleo do cabo é composto por um condutor, esse condutor é envolvido por uma blindagem, uma camada isolante, uma blindagem metálica, uma armação e por fim uma cobertura. O condutor utilizado em cabos subterrâneos pode ser de cobre ou alumínio.

### 2.2.1 Condutor

O condutor é o responsável por conduzir a corrente elétrica ao longo do cabo isolado. O condutor pode ser formado por diferentes metais, composição e formato (SILVA, 2008).

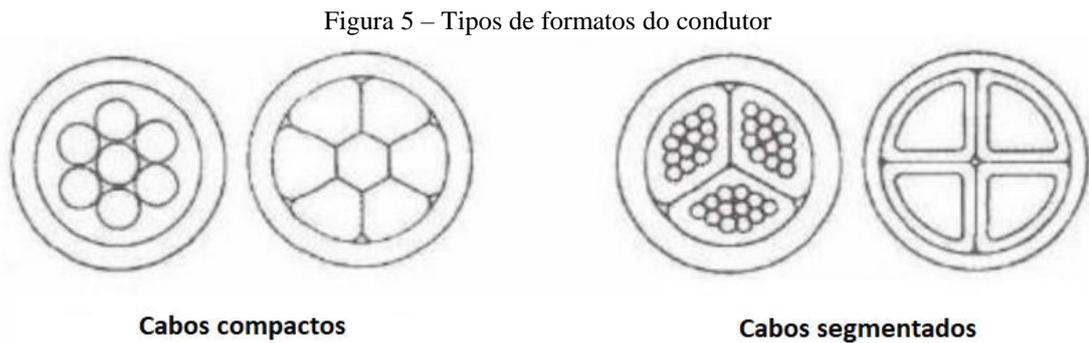
O condutor tipicamente utilizado em cabos isolados pode ser de alumínio ou de cobre (OLIVEIRA, 2010). O alumínio possui uma resistividade superior ao cobre, onde ele vale  $2,92 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  enquanto que o cobre possui uma resistividade de  $1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  (PIMENTEL, 2010). Devido à alta resistividade o cabo composto por um condutor de alumínio necessita ter uma secção nominal maior, visto que sua capacidade de transportar corrente é menor que a do cobre. Por outro lado, o alumínio apresenta um peso menor que o cobre, tornando o cabo mais leve (SILVA, 2008).

A composição do condutor pode ser maciça ou multifilar, como mostrado na Figura 4. Quando o condutor é composto por um metal maciço ele normalmente é aplicado em situações onde não é necessária uma secção muito elevada e nem uma grande flexibilidade. Ao contrário do maciço, o condutor com composição multifilar é mais indicado em situações que se deseje mais flexibilidade e secções elevadas (SILVA, 2008).



Fonte: Silva (2008, p. 6)

O formato do condutor pode ser compacto ou segmentado, como apresentado na Figura 5.



Fonte: Silva (2008, p. 7)

O condutor compacto é um condutor que possui somente uma fase, enquanto que, o condutor segmentado possui uma repartição interna onde se divide em três ou quatro setores. Essa repartição interna é isolada reduzindo assim o efeito pelicular, o efeito de proximidade e consequentemente a resistência ôhmica em corrente alternada (SILVA, 2008).

### 2.2.2 Isolante

O isolante é formado por dielétricos sólidos que estão diretamente ligados com a capacidade máxima de transportar energia elétrica ao longo do condutor. O motivo dessa ligação está relacionado com o aumento da temperatura desenvolvido pela corrente elétrica que se exceder o valor máximo pode danificar o dielétrico que se encontra na camada isolante. Outra relação direta que o material isolante possui é com a tensão de serviço: a sua espessura aumenta à medida que a tensão se eleva. O isolante é responsável por suportar a tensão de rede, sobretensões atmosféricas e sobretensões de manobra (SILVA, 2008).

Cabos isolados possuem três principais tipos de isolantes que são: borracha e composto de borracha, cambraia envernizada e papel impregnado de óleo. As faixas de tensão indicadas para cada tipo de isolante se encontram na Tabela 2. Isolantes de borracha são os mais indicados para aplicações submarinas devido a sua resistência a alta umidade. Os isolantes compostos de borracha são: Polietileno (PE), Propileno (PP) e o Cloreto de Polivinil (PVC). Papéis impregnados são utilizados para elevadas tensões pois possuem uma perda de dielétrico baixa e um baixo custo (GONEN, 2014).

Tabela 2 – Faixa de tensão dos isolantes

| Isolante                                       | Faixa de Tensão |
|--|-----------------|
| Borracha                                       | 600 V - 35 kV   |
| Composto de borracha                           | 600 V - 138 kV  |
| Cambraia envernizada                           | 600 V - 28 kV   |
| Papel impregnado de óleo                       | acima de 69 kV  |
| Papel impregnado de óleo (cabos pressurizados) | acima de 345 kV |

Fonte: Gonen (2014, p. 310)

### 2.2.3 Blindagem Semicondutora Extrudada

A blindagem semicondutora fica localizada em dois locais: entre o condutor e o isolante, e entre o isolante e a blindagem metálica. A blindagem semicondutora é extrudada em conjunto com o isolante de forma que eles fiquem perfeitamente ligados. Suas funções são: confinar e uniformizar o campo elétrico no interior do cabo, aumentar a limitação de interferências eletromagnéticas e eletrostáticas, transicionar de uma forma perfeita entre o condutor e o isolante (SILVA, 2008). Os materiais semicondutores utilizados para a blindagem são o

composto de Borracha Etileno Propileno (EPR) e Polietileno Reticulado (XLPE), ambos semicondutores de bases poliméricas que realizam uma ótima junção entre o condutor e o isolante. O EPR possui uma larga vantagem em relação ao XLPE, pois na utilização do XLPE é necessária a utilização de uma proteção longitudinal contra umidade entre ele e a blindagem metálica. Por outro lado, o XLPE apresenta baixo custo e uma perda de dielétrico inferior ao EPR (OLIVEIRA, 2010).

#### **2.2.4 Blindagem Metálica**

A blindagem metálica no entorno do semicondutor ou da proteção longitudinal contra umidade (no caso do semicondutor XLPE) pode ser realizada de diversas formas:

- fios de cobre aplicados helicoidalmente no formato de uma coroa concêntrica;
- capas extrudadas de chumbo ou alumínio;
- fita de cobre ou alumínio corrugado;
- fita de alumínio ou cobre associada a uma fita de aço, sendo ambos enrolados;
- fita de pouca espessura posicionada longitudinalmente com o lado externo mais aderente.

A blindagem metálica é responsável basicamente por realizar o aterramento do cabo, onde ele dá vazão a correntes de curto-circuito e correntes capacitivas, além de proteger de influências eletromagnéticas externas quando o cabo se encontra próximos de linhas de telecomunicação (OLIVEIRA, 2010). Por se tratar de uma capa metálica essa blindagem também protege o cabo de ações físicas como perfurações e impactos causados por pessoas (SILVA, 2008).

#### **2.2.5 Armadura**

A armadura é aplicada principalmente em situações onde se deseja enterrar um cabo diretamente sem a presença de um duto e para proteger o cabo de esforços transversais e longitudinais (SILVA, 2008).

Há quatro tipos principais de armaduras que são:

- fios de aço aplicados helicoidalmente;
- fita dupla de aço aplicada helicoidalmente;
- fios de aço trançados;

- dupla fita de alumínio (cabos monoplares de alta tensão).

### **2.2.6 Cobertura**

A cobertura é a última camada do cabo, sendo responsável por resistir a ações mecânicas existentes nos momentos de instalação do cabo e de agentes externos durante a operação e vida útil (OLIVEIRA, 2010). Ela também deve resistir a agentes químicos, ao calor, ao frio, e à propagação de chamas. Normalmente são utilizados na cobertura o Polietileno de Média Densidade (PEMD), o Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e o Cloreto de Polivinila (PVC) (OLIVEIRA, 2010). O PVC possui a característica de não propagar chamas sendo essa uma grande vantagem visto que cabos isolados estão sempre sujeitos a incêndio se o cabo não possuir um revestimento externo adequado (OLIVEIRA, 2010).

## **2.3 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS**

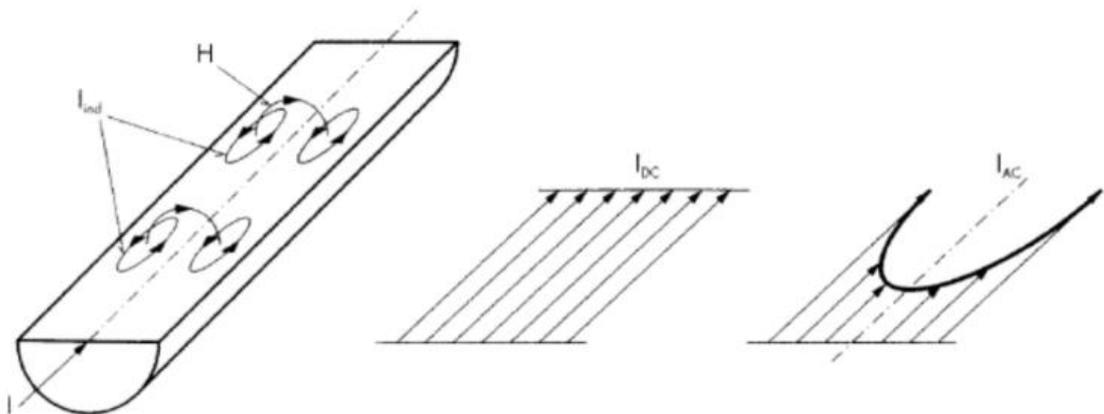
### **2.3.1 Efeito Pelicular**

Esse efeito ocorre devido a um campo magnético existente dentro do condutor (Figura 6). O campo magnético causa uma modificação no fluxo de corrente elétrica do condutor tornando-o não uniforme e fazendo com que a corrente circule mais próxima da superfície do condutor (SILVA, 2008). Quanto maior for a frequência e a seção do condutor, maior será o efeito pelicular (GONEN, 2014).

Esse fenômeno ocorre quando o condutor está transportando uma corrente alternada e não em corrente contínua reduzindo a intensidade da corrente alternada no centro da seção. Quanto maior o efeito pelicular, maior será a resistência em corrente alternada do condutor (GONEN, 2014).

Para reduzir a influência desse fenômeno sobre a resistência em corrente alternada do condutor utiliza-se condutores multifilares. O motivo dessa segmentação consiste no fato de que seções inferiores a  $185 \text{ mm}^2$  não exercem um efeito pelicular significativo (SILVA, 2008). Se não for possível reduzir a seção uma alternativa possível é remover uma parte central do condutor na qual se sabe que haverá uma corrente insignificante reduzindo desta forma o custo do condutor (GONEN, 2014). Os cálculos necessários para a determinação do efeito pelicular se encontram na Seção 3.1.4 e na Seção 3.2.4.

Figura 6 – Representação do efeito pelicular (skin)

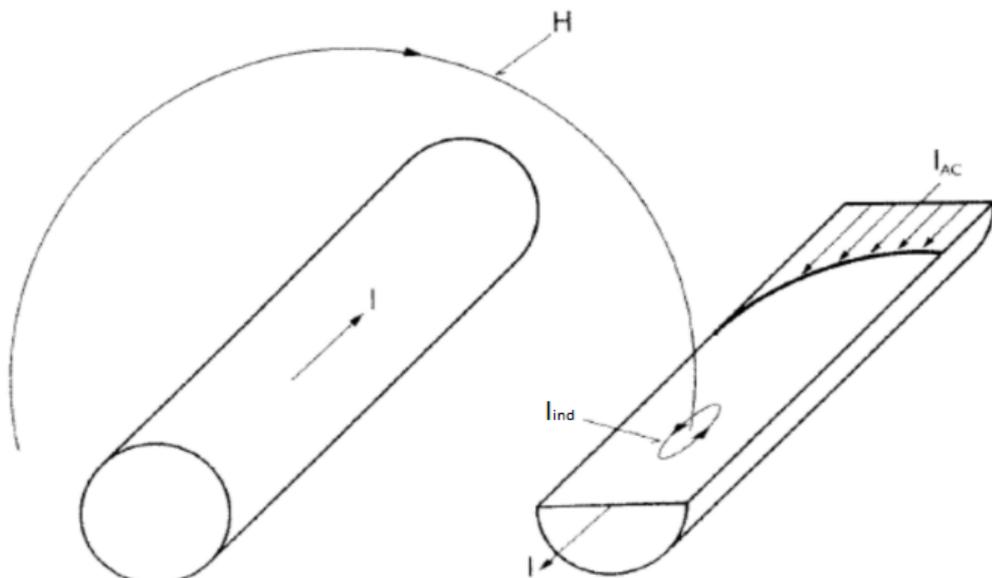


Fonte: Silva (2008, p. 15)

### 2.3.2 Efeito de Proximidade

O efeito de proximidade é a alteração no interior do condutor causado por campos magnéticos, mas nesse caso, por campos magnéticos gerados por cabos próximos, como ilustra a Figura 7. Um aumento na resistência alternada é ocasionado quando um campo magnético externo interfere no condutor e causa uma não uniformidade nas linhas de corrente internas do condutor (LINDSTROM, 2011). Os cálculos necessários para a determinação do efeito de proximidade se encontram na Seção 3.1.4 e Seção 3.2.4.

Figura 7 – Representação do efeito de proximidade

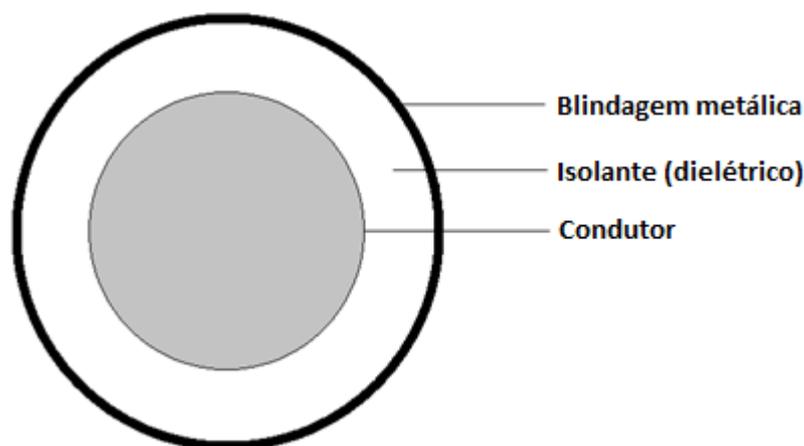


Fonte: Silva (2008, p. 16)

### 2.3.3 Capacitância

A capacitância é resultante da diferença de potencial que gera um campo elétrico entre o condutor e a blindagem metálica aterrada (SILVA, 2008). A Figura 8 mostra o condutor e a blindagem metálica separados por um dielétrico (SILVA, 2008). Essa capacitância está diretamente ligada às perdas dielétricas que serão apresentadas a seguir. Para se determinar a capacitância na norma IEC 60287 utiliza-se a equação (15) que se encontra na Seção 3.1.5, a norma IEEE Std 835 determina a capacitância em conjunto com a determinação da perda do dielétrico na Seção 3.2.5.

Figura 8 – Capacitância entre condutor e blindagem metálica



Fonte: Autoria própria (2017)

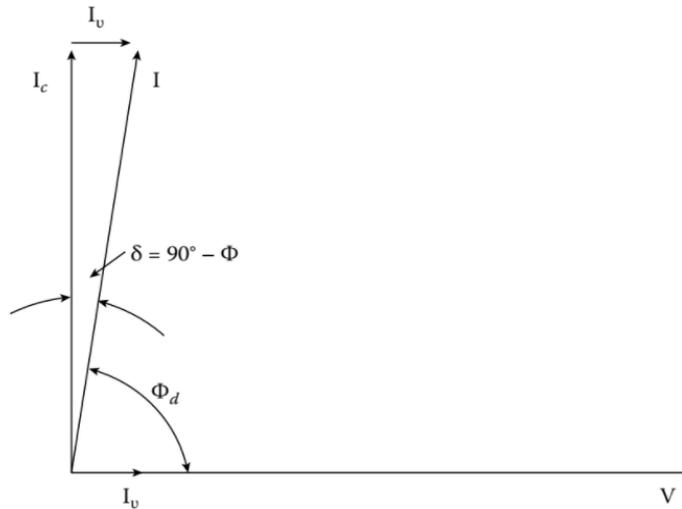
### 2.3.4 Perdas Dielétricas

Nas perdas dielétricas a corrente induzida no dielétrico provoca um aumento na temperatura do material que influi diretamente na ampacidade, pois reduz a quantidade de calor que pode ser gerada no condutor. A causa do surgimento dessa corrente está ligada a tensão fase-neutro entre o condutor e a blindagem metálica aterrada, pois para múltiplos cabos instalados em um duto, a perda no dielétrico se torna significativa a partir de tensões de 15 kV a 35 kV. Entretanto, em linhas de um único condutor um tensão de 35 kV tem um efeito insignificante (IEEE Std 835, 1994).

Considerando que o material dielétrico não é ideal, sabe-se que há uma corrente que circula no dielétrico e essa corrente por si ocasiona uma perda. Se o dielétrico fosse ideal a corrente induzida pela capacitância possuiria  $90^\circ$  com relação a tensão entre condutor e a blindagem e dessa forma a perda seria nula. Entretanto na situação real a corrente de perda

produz com a tensão um ângulo menor do que  $90^\circ$  (GONEN, 2014), como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Corrente de perda dielétrica



Fonte: Gonen (2014, p. 333)

O cosseno do ângulo  $\Phi_d$  representa o fator de perda do dielétrico e a qualidade do dielétrico, onde quanto mais próximo de zero, mais próximo o dielétrico estará da situação ideal (GONEN, 2014). O fator de perda pode ser determinado pela equação (1). A expressão que define essa perda está na Seção 3.1.5 ou na Seção 3.2.5.

$$\delta \approx \tan \delta = \sin \delta = \cos \Phi_d \quad (1)$$

A Tabela 3 apresenta os fatores de perdas dielétricas, as tensões para diferentes tipos de dielétricos e o fator SIC do isolante.

Tabela 3 – Fatores de perdas dielétricas

| Dielétrico | tang $\delta$ | V (kV) |
|------------|---------------|--------|
| XLPE       | 0,005         | 63,5   |
| XLPE       | 0,001         | 127    |
| PE         | 0,001         | 127    |
| PVC        | 0,1           | 6      |
| EPR        | 0,005         | 63,5   |

Fonte: Silva (2008, p. 19)

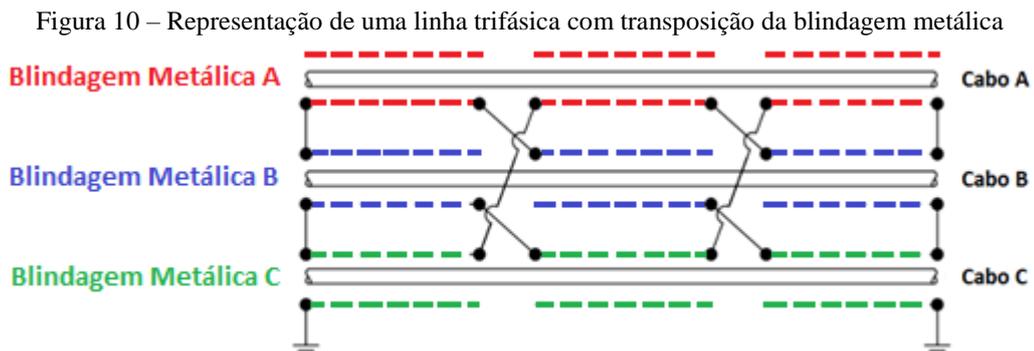
### 2.3.5 Perdas na Blindagem Metálica

Uma corrente elétrica variante no tempo possui um campo magnético também variante no tempo. Esse campo se expande e contrai, e sua intensidade na mesma frequência que a da corrente alternada. Quando se instala um cabo nas proximidades do campo magnético, uma tensão será induzida nesse cabo. Se a blindagem metálica do cabo estiver formando um circuito, a tensão induzida irá gerar uma corrente induzida na blindagem metálica. As correntes induzidas na blindagem são denominadas correntes de circulação e de Foucault, e elas podem ser formadas tanto por campos magnéticos provindos de outros cabos quanto do próprio cabo.

Essas correntes são consideradas como perdas pois são dissipadas na forma de calor. Esse calor dissipado gera um aumento de temperatura no cabo e dessa forma acaba prejudicando o valor de ampacidade do cabo por reduzir a quantidade de calor que o condutor pode gerar. Para se determinar os valores dessas correntes utiliza-se as equações (17) e (20) da Seção 3.1.6 para a norma IEC 60287. Para norma IEEE Std 835 utiliza-se as equações (44), (46) e (47) da Seção 3.2.6.

Se um cabo monopolar possui a sua blindagem metálica ligada ao terra nas duas extremidades, a corrente de Foucault é desprezada enquanto que a corrente de circulação não. Entretanto, quando a blindagem metálica de um cabo monopolar possui somente uma extremidade ligada ao terra, a corrente de circulação induzida nela é desprezada. No entanto, ocorre uma elevação da tensão induzida no cabo e um aumento na corrente de Foucault.

Para que se possa reduzir a presença da corrente de circulação e de Foucault simultaneamente deve-se fazer uma transposição da blindagem metálica da linha trifásica. Nessa configuração a blindagem metálica de cada cabo deve ser transposta no mínimo três vezes, sendo elas segmentadas a cada momento de transposição gerando assim tensões defasadas em  $120^\circ$  em cada trecho, como mostrado na Figura 10.



Fonte: Gonen (2014, p. 344)

### 2.3.6 Perdas na Armação

Quando existe uma armação metálica o campo magnético que induz uma corrente na blindagem também irá induzir uma corrente na armação. Se ambos estiverem aterrados em ambas as extremidades, deve-se considerar que a blindagem metálica e a armação estão em paralelo para se determinar as perdas (SILVA, 2008). A Seção 3.1.7 explica como se determina essa perda.

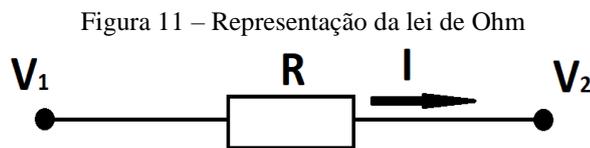
### 2.3.7 Perdas no Duto

Os dutos onde os cabos isolados são inseridos podem ser plásticos, metálicos ou de concreto. Os dutos metálicos por estarem expostos aos campos magnéticos dos cabos isolados induzem uma corrente elétrica em sua superfície ocasionando uma perda por efeito Joule. Na Seção 3.2.7 se encontra detalhes sobre sua determinação.

## 2.4 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

### 2.4.1 Circuito Térmico

Segundo a Lei de Ohm, a diferença de potencial elétrico nas extremidades de uma resistência elétrica é proporcional à corrente elétrica que flui nesta resistência elétrica (Figura 11).



Fonte: Autoria própria (2017)

Para se determinar a diferença de potencial elétrico, utiliza-se a equação (2).

$$\Delta V = V_1 - V_2 = R \cdot I \quad (2)$$

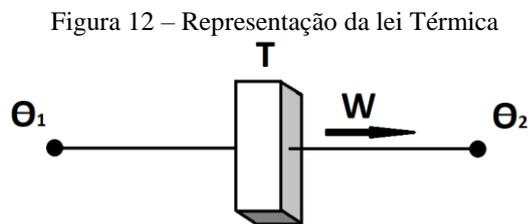
Onde:

$\Delta V$  Diferença de potencial elétrico [V];

$V_1$  Tensão elétrica no terminal 1 [V];

- $V_2$  Tensão elétrica no terminal 2 [V];  
 $R$  Resistência elétrica [ $\Omega$ ];  
 $I$  Corrente elétrica [A].

Os circuitos térmicos possuem uma grande semelhança com os circuitos elétricos. No circuito térmico considera-se a diferença de potencial elétrico como diferença de temperatura, a resistência elétrica como resistência térmica e a corrente elétrica como potência calorífica (SILVA, 2008), como mostrado na Figura 12.



Fonte: Autoria própria (2017)

Para se determinar a diferença de potencial térmico, utiliza-se a expressão (3). As unidades de temperatura são: Kelvin (IEC 60287) e graus Celsius (IEEE Std 835). Com relação as resistência térmica suas unidades são: Kelvin metro por Watt (IEC 60287) e Thermal Ohm Feet (IEEE Std 835). Por fim, a potência calorífica utiliza Watt por metro (IEC 60287) e Watt for feet (IEEE Std 835)

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 = T \cdot W \quad (3)$$

Onde:

- $\Delta\theta$  Diferença de temperatura [K ou  $^{\circ}\text{C}$ ];  
 $\theta_1$  Temperatura no terminal 1 [K ou  $^{\circ}\text{C}$ ];  
 $\theta_2$  Temperatura no terminal 2 [K ou  $^{\circ}\text{C}$ ];  
 $T$  Resistência térmica [K m/W ou Thermal Ohm Feet (TOF)];  
 $W$  Potência calorífica [W/m ou W/ft].

As resistências térmicas existentes em cabos isolados aplicados em dutos e enterrados podem ser as seguintes:

- resistência térmica entre condutor e a blindagem metálica;
- resistência térmica entre a blindagem metálica e a armadura;
- resistência da cobertura (revestimento externo);
- resistência entre a superfície externa do cabo e a superfície interna do duto;
- resistência térmica do duto (duto não metálico);
- resistência térmica do ambiente externo (solo).

As potências caloríficas são geradas devido às perdas existentes nos diversos setores do sistema subterrâneo que devido ao efeito Joule gerado criam um fluxo de calor que flui pelas camadas do cabo isolado e até mesmo no duto. As principais potências caloríficas são:

- potência calorífica do condutor;
- potência calorífica do dielétrico;
- potência calorífica da blindagem;
- potência calorífica da armadura;
- potência calorífica do duto.

#### **2.4.2 Resistência Térmica entre Condutor e Blindagem Metálica**

A resistência térmica existente entre o condutor e a blindagem metálica é formada pela blindagem semicondutora interna, isolante e a blindagem semicondutora externa (LINDSTROM, 2011). A potência calorífica que flui por essa resistência térmica é composta pela soma da potência calorífica do condutor com a do dielétrico. A potência calorífica do dielétrico é considerada 50% do seu total visto que os outros 50% não cruzam essa resistência térmica e fluem para a blindagem.

#### **2.4.3 Resistência Térmica entre Blindagem Metálica e Armadura**

Se a armadura é formada por um material não metálico deve-se considerar uma resistência térmica existente entre a blindagem e sua superfície externa (LINDSTROM, 2011). Por essa resistência térmica flui as potências caloríficas do condutor, do dielétrico e a potência calorífica da blindagem.

#### **2.4.4 Resistência Térmica da Cobertura**

A cobertura ou revestimento externo é responsável por cobrir o cabo e protegê-lo do meio externo (LINDSTROM, 2011), por essa camada fluem as potências caloríficas do condutor, do dielétrico, da blindagem e da armadura (se for metálica).

#### **2.4.5 Resistência Térmica entre Cabo e Duto**

O espaço existente entre a superfície externa do cabo isolado e a superfície interna do duto é considerada uma resistência térmica (LINDSTROM, 2011) pela qual flui as potências caloríficas do condutor, do dielétrico, da blindagem e da armadura (se for metálica).

#### **2.4.6 Resistência Térmica do Duto**

Se o duto for composto por um material metálico, a resistência térmica gerada por ele é desprezada, visto que, metais possuem uma baixa resistência térmica (LINDSTROM, 2011). Se o duto for não metálico irá fluir por ele as potências caloríficas do condutor, do dielétrico, da blindagem e da armadura (se for metálica).

#### **2.4.7 Resistência Térmica do Ambiente Externo**

Se tratando de sistemas subterrâneos o meio externo é o solo que pode ser úmido, seco, composto por areia, terra, pedras, ou a mistura de todos e mais outros materiais (LINDSTROM, 2011). A potência calorífica que flui por essa resistência é a soma de todas potências caloríficas geradas por todas as perdas existentes sendo elas: perda do condutor, perda do dielétrico, perda da blindagem, perda da armadura e perda do duto (duto metálico).

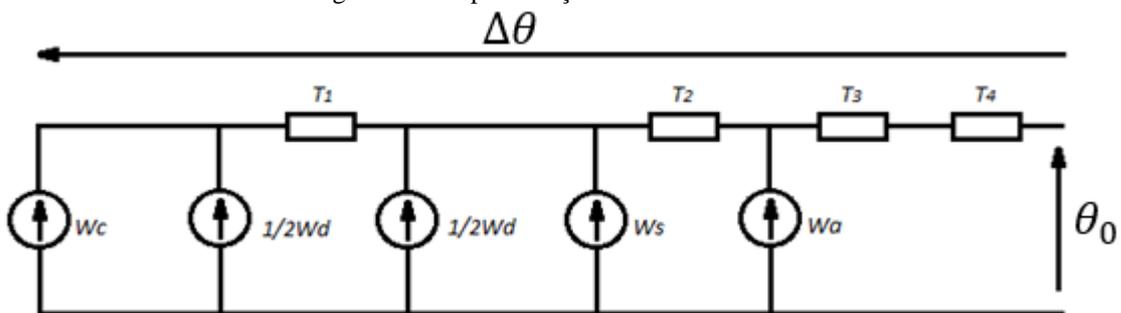
### 3 NORMAS PARA DETERMINAÇÃO DA AMPACIDADE

#### 3.1 NORMA IEC 60287 – CALCULATION OF THE CURRENT RATING

##### 3.1.1 Representação do Circuito Térmico

A norma IEC 60287 representa o comportamento térmico do cabo e seus agregados através de um circuito apresentado pela Figura 13 (GUERRISI, 2013), conforme o modelo mostrado na Seção 2.4.1.

Figura 13 – Representação do circuito térmico



Fonte: Guerrisi (2013, p. 10)

Para determinar a diferença de potencial térmico, utiliza-se a expressão (4).

$$\Delta\theta = \left(W_c + \frac{1}{2}W_d\right)T_1 + (W_c + W_d + W_s)T_2 + (W_c + W_d + W_s + W_a)(T_3 + T_4) \quad (4)$$

Onde:

- $\Delta\theta$  Diferença de temperatura entre o condutor e o ambiente externo [K];
- $W_c$  Potência calorífica do condutor [W/m];
- $W_d$  Potência calorífica do dielétrico [W/m];
- $T_1$  Resistência térmica entre o condutor e a blindagem (isolante) [K m/W];
- $W_s$  Potência calorífica da blindagem [W/m];
- $T_2$  Resistência térmica entre a blindagem e a armadura [K m/W];
- $W_a$  Potência calorífica da armadura [W/m];
- $T_3$  Resistência térmica do revestimento externo [K m/W];

A resistência térmica ( $T_4$ ) que se situa entre a parte externa do cabo e o ambiente é dada por:

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' \quad [\text{K m/W}] \quad (5)$$

Onde:

$T_4'$  Resistência térmica entre a superfície do cabo e a superfície interna do duto [K m/W];

$T_4''$  Resistência térmica do duto [K m/W];

$T_4'''$  Resistência térmica externa ao duto [K m/W].

### 3.1.2 Cálculo da Ampacidade

A equação (6) apresenta a expressão para o cálculo da ampacidade, onde são levados em conta todos os fatores que possuem efeito na determinação da ampacidade de cabos subterrâneos conforme a norma IEC 60287.

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - Wd[0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R[T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]} \right]^{0.5} \quad [\text{A}] \quad (6)$$

Onde:

$I$  Ampacidade [A];

$n$  Número de condutores;

$R$  Resistência do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\Omega/\text{m}$ ];

$\lambda_1$  Perdas causadas pela corrente circulante na blindagem;

$\lambda_2$  Perdas causadas pela corrente de Foucault na blindagem;

$\Delta\theta$  Diferença de temperatura entre o condutor e o ambiente externo [K];

$W_d$  Potência calorífica do dielétrico [W/m];

$T_1$  Resistência térmica entre o condutor e a blindagem (isolante) [K m/W];

$T_2$  Resistência térmica entre a blindagem e a armadura [K m/W];

$T_3$  Resistência térmica do revestimento externo [K m/W];

$T_4$  Resistência térmica entre a parte externa do cabo e o ambiente [K m/W].

### 3.1.3 Resistência DC do Condutor

A resistência DC do condutor subterrâneo utilizada na determinação da resistência de corrente alternada é calculada pela equação (7).

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \quad [\Omega] \quad (7)$$

Onde:

$R'$  Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\Omega/m$ ];

$\alpha_{20}$  Constante de massa do condutor na temperatura de 20 °C [ $1/K$ ];

$\theta$  Temperatura de operação [ $^{\circ}C$ ];

$R_0$  Resistência DC do condutor na temperatura de 20 °C [ $\Omega/m$ ].

### 3.1.4 Resistência em Corrente Alternada

A determinação da resistência AC leva em consideração o efeito pelicular descrito na Seção 4.1, o efeito de proximidade descrito na Seção 4.2, além da resistência DC conforme a equação (8).

$$R_{ac} = R' \times (1 + y_s + y_p) \quad [\Omega/m] \quad (8)$$

Onde:

$R_{ac}$  Resistência em corrente alternada [ $\Omega/m$ ];

$R'$  Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\Omega/m$ ].

O fator de perda ( $y_s$ ) devido ao efeito pelicular (skin) pode ser obtido pela equação 9:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8 \cdot x_s^4} \quad (9)$$

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} \cdot k_s \quad (10)$$

Onde:

- $R'$  Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\Omega/m$ ];  
 $k_s$  Coeficiente do efeito pelicular (skin) Tabela 3.1 (SILVA, 2008 p. 16);  
 $f$  Frequência da fonte [Hz];

O fator de perda ( $y_p$ ) que é a perda por efeito de proximidade é calculado de acordo com:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8 \cdot x_p^4} \left(\frac{d_c}{S}\right)^2 \left[ 0.312 \cdot \left(\frac{d_c}{S}\right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8 \cdot x_p^4} + 0.27} \right] \quad (11)$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \cdot 10^{-7} \cdot k_p \quad (12)$$

Onde:

- $k_p$  Coeficiente do fator de proximidade Tabela 3.1 (SILVA, 2008 p. 16);  
 $f$  Frequência da fonte [Hz];  
 $R'$  Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\Omega/m$ ];  
 $d_c$  Diâmetro do condutor [mm];  
 $S$  Distância entre os eixos dos condutores [mm].

### 3.1.5 Perda no Dielétrico

A perda no dielétrico é determinada pela equação (13).

$$Wd = \omega C_{ap} U_0^2 \tan(\delta) \quad [W/m] \quad (13)$$

Onde:

- $U_0$  Tensão fase-neutro [V];  
 $\delta$  Fator de dissipação;  
 $\omega$  Frequência angular [rad/s], dado por:

$$\omega = 2\pi f \text{ [rad/s]} \quad (14)$$

Sendo,

$f$  Frequência da fonte [Hz];

A capacitância entre o condutor e a blindagem metálica ( $C_{ap}$ ) é calculada de acordo com a expressão:

$$C_{ap} = \frac{\varepsilon}{18 \cdot \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} \times 10^{-9} \text{ [F/m]} \quad (15)$$

Onde:

$\varepsilon$  Permissividade relativa do isolante;

$D_i$  Diâmetro externo do isolante [mm];

$d_c$  Diâmetro do condutor [mm].

A permissividade relativa do dielétrico (material isolante) também pode ser chamada de SIC (Specific Inductive Capacity). Na norma IEC 60287-2-1 (2006) consta tabela com os valores de SIC para cada material dielétrico.

### 3.1.6 Perdas na Blindagem

O fator de perda na blindagem é determinado pela equação (16), onde-se tem a perda causada pela corrente circulante somada com a perda causada pela corrente de Foucault.

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 \quad (16)$$

Onde:

$\lambda$  Fator de perda na blindagem;

As perdas por corrente circulante ( $\lambda_1$ ) são determinadas por:

$$\lambda_1 = \frac{R_S}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_S}{X}\right)^2} \quad (17)$$

Onde:

$R$  Resistência do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\Omega/m$ ];

$R_S$  Resistência da blindagem na temperatura de operação [ $\Omega/m$ ];

Dessa forma, a reatância da blindagem ( $X$ ) pode ser determinada por:

$$X = 2\omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2S}{d}\right) \quad [\Omega/m] \quad (18)$$

Onde:

$S$  Distância entre eixos de condutores [mm];

$d$  Diâmetro médio da blindagem [mm];

A frequência angular ( $\omega$ ), é determinada através da expressão:

$$\omega = 2\pi f \quad [\text{rad/s}] \quad (19)$$

Onde:

$f$  Frequência da fonte [Hz];

Dessa forma, agora é possível determinar as perdas causadas pela corrente de Foucault ( $\lambda_2$ ), as quais são calculadas com a expressão:

$$\lambda_2 = \frac{R_S}{R_{ac}} \times \left[ g_s \times \lambda_0 \times (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 \times t_s)^4}{12} \times 10^{-12} \right] \quad (20)$$

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s}\right)^{1.74} \times (\beta_1 \times D_s \times 10^{-3} - 1.6) \quad (21)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \times \pi \times \omega}{10^{-7} \times \rho_s}} \quad (22)$$

Onde:

- $R_{ac}$  Resistência em corrente alternada [ $\Omega/m$ ];  
 $t_s$  Espessura da blindagem [mm];  
 $D_s$  Diâmetro externo da blindagem [mm];  
 $\omega$  Frequência angular [rad/s];  
 $\rho_s$  Resistividade da blindagem;  
 $\lambda_0$  Fator que depende do modelo da linha (SILVA, 2008 p. 26);  
 $\Delta_1$  Fator que depende do modelo da linha (SILVA, 2008 p. 26);  
 $\Delta_2$  Fator que depende do modelo da linha (SILVA, 2008 p. 26).

### 3.1.7 Perdas na Armadura

As perdas na armadura podem ser ocasionadas por corrente circulante ou por corrente de Foucault assim como na blindagem. Para determinar as perdas, pode-se utilizar as equações (16) a (22) (IEC 60287-1-1, 2006).

### 3.1.8 Resistência Térmica entre o Condutor e a Blindagem

A resistência térmica entre o condutor e a blindagem descrita na Seção 2.4.2 é determinada por:

$$T_1 = \frac{\rho_{T_1}}{2\pi} G \quad [\text{K m/W}] \quad (23)$$

Onde:

- $T_1$  Resistência térmica entre condutor e blindagem [K m/W];  
 $G$  Fator geométrico (IEC-60287-2-1, 2006);  
 $\rho_{T_1}$  Resistividade térmica do isolante [K m/W].

### 3.1.9 Resistência Térmica entre a Blindagem e a Armadura

A resistência térmica entre a blindagem e a armadura apresenta na Seção 2.4.3 é determinada por:

$$T_2 = \frac{\rho_{T_2}}{2\pi} \cdot \ln \left( 1 + \frac{2t_2}{D'_b} \right) \quad [\text{K m/W}] \quad (24)$$

Onde:

$T_2$  Resistência térmica entre blindagem e armadura [K m/W];

$t_2$  Espessura do material entre a blindagem e a armadura [mm];

$D'_b$  Diâmetro externo da blindagem [mm];

$\rho_{T_2}$  Resistividade térmica do material entre a blindagem e a armadura [K m/W].

### 3.1.10 Resistência Térmica do Revestimento Externo (Jaquetá)

A resistência térmica do revestimento externo descrita na Seção 2.4.4 é determinada por:

$$T_3 = \frac{\rho_{T_3}}{2\pi} \cdot \ln \left( 1 + \frac{2t_3}{D'_a} \right) \quad [\text{K m/W}] \quad (25)$$

Onde:

$T_3$  Resistência térmica do revestimento externo [K m/W];

$t_3$  Espessura do revestimento externo [mm];

$D'_a$  Diâmetro externo da armadura [mm];

$\rho_{T_3}$  Resistividade térmica do revestimento externo [K m/W].

### 3.1.11 Resistência Térmica entre o Cabo e o Duto

A resistência térmica entre o cabo e o duto apresenta na Seção 2.4.5 é determinada por:

$$T_4' = \frac{U}{1 + 0.1(V + Y\theta_m)D_e} \quad [\text{K m/W}] \quad (26)$$

Onde:

- $T_4'$  Resistência térmica entre o cabo e o duto [K m/W];
- $D_e$  Diâmetro externo do cabo [mm];
- $\theta_m$  Temperatura média do espaço entre o cabo e o duto [°C];
- $U$  Constante Tabela 4.6 (SILVA, 2008);
- $Y$  Constante Tabela 4.6 (SILVA, 2008);
- $V$  Constante Tabela 4.6 (SILVA, 2008).

### 3.1.12 Resistência Térmica do Duto

A resistência térmica entre o cabo e o duto descrita na Seção 2.4.6 é determinada pela equação (27).

$$T_4'' = \frac{\rho_{T_4}}{2\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{D_0}{D_d}\right) \quad [\text{K m/W}] \quad (27)$$

Onde:

- $T_4''$  Resistência térmica do duto [Km/W];
- $D_0$  Diâmetro externo do duto [mm];
- $D_d$  Diâmetro interno do duto [mm];
- $\rho_{T_4}$  Resistividade térmica do duto [Km/W].

### 3.1.13 Resistência Térmica Externa

A resistência térmica entre o cabo e o duto apresentada na Seção 2.4.7 é determinada pela equação (28).

$$T_4''' = \frac{\rho_{T_5}}{2\pi} \cdot \ln(2u) \quad [\text{K m/W}] \quad (28)$$

Onde:

$T_4'''$  Resistência térmica externa ao duto [K m/W];

$\rho_{T_5}$  Resistividade térmica do duto [K m/W].

Coefficiente ( $u$ ) que relaciona profundidade da linha e o diâmetro externo do duto é determinado por:

$$u = \frac{2L}{D_0} \quad (29)$$

Onde:

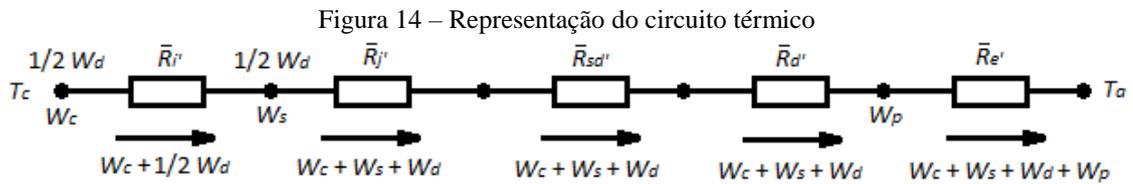
$L$  Profundidade da linha subterrânea [mm];

$D_0$  Diâmetro externo do duto [mm].

Todas as equações apresentadas nessa Seção foram obtidas do artigo The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems (NEHER e MCGRATH, 1957). Artigo no qual criou a base teórica do desenvolvimento da norma IEEE Std 835 (1994).

### 3.2.1 Representação do Circuito Térmico

Assim como a norma IEC 60287 a norma IEEE Std 835 também possui um circuito térmico representado na Figura 14.



Fonte: Autoria própria (2017)

Com a equação (30) pode-se determinar a diferença de temperatura do condutor e o ambiente.

$$T_c - T_a = \left( W_c + \frac{1}{2} W_d \right) \bar{R}_i' + (W_c + W_d + W_s) \bar{R}_{sd}' + (W_c + W_d + W_s + W_p) \bar{R}_e' \quad (30)$$

Onde:

$T_c$  Temperatura do condutor [°C];

$T_a$  Temperatura do ambiente [°C];

$W_c$  Potência calorífica do condutor [W/ft];

$W_d$  Potência calorífica do dielétrico [W/ft];

$W_s$  Potência calorífica da blindagem [W/ft];

$W_p$  Potência calorífica do duto [W/ft];

$\bar{R}_i'$  Resistência térmica entre o condutor e a blindagem [TOF];

$\bar{R}_e'$  Resistência térmica do ambiente externo ao duto [TOF].

A resistência térmica ( $\bar{R}_{se}'$ ) situada entre a blindagem e o duto é dada por:

$$\bar{R}'_{se} = \bar{R}'_j + \bar{R}'_{sd} + \bar{R}'_d \quad [\text{TOF}] \quad (31)$$

Onde:

$\bar{R}'_j$  Resistência térmica da jaqueta (cobertura) [TOF];

$\bar{R}'_{sd}$  Resistência térmica entre a superfície do cabo e a superfície interna do duto [TOF];

$\bar{R}'_d$  Resistência térmica do duto [TOF].

### 3.2.2 Cálculo da Ampacidade

A equação (32) é utilizada para determinar a ampacidade, nela consta os principais elementos que causam influência no valor da corrente I.

$$I = \sqrt{\frac{T_c - (T_a + \Delta T_d)}{R_{dc}(1 + Y_c) \times \bar{R}'_{ca}}} \quad [\text{kA}] \quad (32)$$

Onde:

$I$  Ampacidade [kA];

$T_c$  Temperatura do condutor [°C];

$T_a$  Temperatura do ambiente [°C];

$\Delta T_d$  Variação de temperatura devido à perda no dielétrico [°C];

$R_{dc}$  Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\mu\Omega/\text{ft}$ ];

$Y_c$  Fator de perdas no condutor;

$\bar{R}'_{ca}$  Resistência térmica efetiva do circuito térmico [TOF].

### 3.2.3 Resistência DC do Condutor

A resistência de corrente contínua do condutor é determinada pela equação (33).

$$R_{dc} = \frac{T_0 + T_c}{T_0 + T_{tab}} \times R_{dc_{tab}} \quad [\mu\Omega/\text{ft}] \quad (33)$$

Onde:

$R_{dc}$  Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\mu\Omega/\text{ft}$ ];

- $R_{dc_{tab}}$  Resistência DC do condutor na temperatura da tabela [ $\mu\Omega/\text{ft}$ ];  
 $T_c$  Temperatura do condutor [ $^{\circ}\text{C}$ ];  
 $T_{tab}$  Temperatura da tabela [ $^{\circ}\text{C}$ ];  
 $T_0$  Constante de acordo com o material condutor.

### 3.2.4 Perdas no Condutor

A equação (34) consiste nas perdas no condutor. Ela é a soma das perdas ocasionadas pelo efeito pelicular e pelo efeito de proximidade.

$$Y_c = Y_{cs} + Y_{cp} \quad (34)$$

Onde:

- $Y_c$  Fator de perdas originadas no condutor;  
 $Y_{cp}$  Fator de perda por efeito de proximidade.

O fator de perda por efeito pelicular ( $Y_{cs}$ ) é determinado pela expressão:

$$Y_{cs} = F_{sp}(x_s) = \frac{11.0}{\left(x_s + \frac{4}{x_s} - \frac{2.56}{x_s^2}\right)^2} \quad (35)$$

$$x_s = \frac{R_{dc}}{k_s} \quad (36)$$

Onde:

- $R_{dc}$  Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\mu\Omega/\text{ft}$ ];  
 $k_s$  Coeficiente do efeito pelicular obtido pela Tabela II (NEHER e MCGRATH, 1957).

O efeito de proximidade é determinado pela expressão (37).

$$Y_{cp} = F(x_p) \left(\frac{DC}{S}\right)^2 \times \left[ \frac{1.18}{F(x_p) + 0.27} + 0.312 \left(\frac{DC}{S}\right)^2 \right] \quad (37)$$

$$F(x_p) = F_{sp}(x_p) = \frac{11.0}{\left(x_p + \frac{4}{x_p} - \frac{2.56}{x_p^2}\right)^2} \quad (38)$$

$$x_p = \frac{R_{dc}}{k_p} \quad (39)$$

Onde:

$k_p$  Coeficiente do fator de proximidade, Tabela II (NEHER e MCGRATH, 1957);

$R_{dc}$  Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\mu\Omega/\text{ft}$ ];

$D_c$  Diâmetro do condutor [in];

$S$  Distância entre os eixos dos condutores [in].

### 3.2.5 Perda no Dielétrico

A variação de temperatura no dielétrico é obtida através da equação (40).

$$\Delta T_d = W_d \cdot \bar{R}_{da}' \quad [^\circ\text{C}] \quad (40)$$

Onde:

$\Delta T_d$  Variação de temperatura devido à perda no dielétrico [ $^\circ\text{C}$ ].

No entanto, a potência calorífica ( $W_d$ ) que compõe a equação (40) é obtida através da expressão:

$$W_d = \frac{0.00276 \cdot E^2 \cdot \epsilon_r \cdot \tan(\delta)}{\log\left(\frac{D_i}{D_c}\right)} \quad [\text{W/ft}] \quad (41)$$

Onde:

$E$  Tensão entorno do dielétrico [kV];

- $\varepsilon_r$  Permissividade relativa do isolante ou SIC, Tabela 1 (IEEE Std 835, 1994);
- $\delta$  Fator de dissipação, Tabela 1 (IEEE Std 835, 1994);
- $D_i$  Diâmetro do isolante [in];
- $D_c$  Diâmetro do condutor [in].

A resistência térmica efetiva entre o condutor e o ambiente ( $\bar{R}_{da}'$ ) é calculado de acordo com:

$$\bar{R}_{da}' = \frac{\bar{R}_i'}{2} + \bar{R}_j' + \bar{R}_{sd}' + \bar{R}_d' + \bar{R}_e' \quad [\text{TOF}] \quad (42)$$

Onde:

- $\bar{R}_i'$  Resistência térmica entre o condutor e a blindagem [TOF];
- $\bar{R}_j'$  Resistência térmica da jaqueta (cobertura) [TOF];
- $\bar{R}_{sd}'$  Resistência térmica entre a superfície do cabo e a superfície interna do duto [TOF];
- $\bar{R}_d'$  Resistência térmica do duto [TOF];
- $\bar{R}_e'$  Resistência térmica do ambiente externo ao duto [TOF].

### 3.2.6 Perdas na Blindagem

As perdas na blindagem, determinada pela equação (43), é composta pelas perdas ocasionadas pelo efeito de corrente circulante e pela corrente de Foucault.

$$Y_s = Y_{sc} + Y_{se} \quad (43)$$

Onde:

- $Y_s$  Fator de perdas originadas na blindagem;
- $Y_{se}$  Fator de perdas ocasionadas pela corrente de Foucault.

O fator de perdas ocasionadas ( $Y_{sc}$ ) pelo efeito da corrente circulante é calculado de acordo com:

$$Y_{sc} = \frac{R_s/R_{dc}}{1 + (R_s/X_M)^2} \quad (44)$$

Onde:

$R_{dc}$  Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\mu\Omega/\text{ft}$ ];

$R_s$  Resistência da blindagem na temperatura de operação [ $\mu\Omega/\text{ft}$ ].

A reatância mútua ( $X_M$ ) é dada por:

$$X_M = 0.882 \cdot f \cdot \log\left(\frac{2S}{D_{sm}}\right) \quad [\mu\Omega/\text{ft}] \quad (45)$$

Onde:

$f$  Frequência [Hz];

$S$  Distância entre eixos dos condutores [in];

$D_{sm}$  Diâmetro da blindagem [in].

O fator de perdas ocasionadas pela corrente de Foucault é calculado pela expressão (46) ou (47). A equação (46) é para determinar a corrente de Foucault de 3 cabos com um condutor cada, na configuração equilátero. A equação (47) determina a corrente de Foucault para um cabo com 3 condutores.

$$Y_{se} = \frac{3 \times R_s/R_{dc}}{\left(\frac{5,2R_s}{f}\right)^2 + \frac{1}{5}\left(\frac{2S}{D_{sm}}\right)} \times \left(\frac{D_{sm}}{2S}\right)^2 \left[1 + \frac{5}{12}\left(\frac{D_{sm}}{2S}\right)^2\right] \quad (46)$$

$$Y_{se} = \frac{3R_s}{R_{dc}} \left[ \frac{\left(\frac{2S}{D_{sm}}\right)^2}{\left(\frac{5,2R_s}{f}\right)^2 + 1} + \frac{\left(\frac{2S}{D_{sm}}\right)^4}{4\left(\frac{5,2R_s}{f}\right)^2 + 1} + \frac{\left(\frac{2S}{D_{sm}}\right)^6}{16\left(\frac{5,2R_s}{f}\right)^2 + 1} \right] \quad (47)$$

Onde:

$f$  Frequência [Hz];

|          |  |
|----------|--|
| $S$      | Distância entre eixos dos condutores [in];   |
| $s$      | Distância do centro do condutor ao centro do cabo para modelo de 3 condutores [in];        |
| $D_{sm}$ | Diâmetro da blindagem [in];  |
| $R_{dc}$ | Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\mu\Omega/\text{ft}$ ]; |
| $R_S$    | Resistência da blindagem na temperatura de operação [ $\mu\Omega/\text{ft}$ ].             |

### 3.2.7 Perdas no Duto ou Tubo Metálico

Para determinar a perda no duto tem-se três situações diferentes: um cabo com três condutores, três cabos com um condutor no formato triangular e um cabo com um condutor. Para a equação (48) foi considerado o caso de um cabo com três condutores internos.

$$Y_p = \frac{1.54s_d - 0.115D_p}{R_{dc}} \quad (48)$$

Onde:

|          |  |
|----------|--|
| $Y_p$    | Fator de perda originada no duto ou tubo metálico;   |
| $R_{dc}$ | Resistência DC do condutor na temperatura de operação escolhida [ $\mu\Omega/\text{ft}$ ]; |
| $D_p$    | Diâmetro interno do duto [in];   |
| $s_d$    | Espessura do duto [in].  |

### 3.2.8 Resistência Térmica entre o Condutor e a Blindagem

A resistência térmica entre o condutor e a blindagem descrita na Seção 2.4.2 é determinada pela equação (49).

$$\bar{R}_i' = 0.012 \cdot \rho_i \cdot \log\left(\frac{D_i}{D_c}\right) \quad [\text{TOF}] \quad (49)$$

Onde:

|              |   |
|--------------|---|
| $\bar{R}_i'$ | Resistência térmica do isolante [TOF];                                |
| $\rho_i$     | Resistividade térmica do isolante [ $^{\circ}\text{C cm}/\text{W}$ ]; |
| $D_i$        | Diâmetro externo do isolante [in];                                    |
| $D_c$        | Diâmetro externo do condutor [in].                                    |

### 3.2.9 Resistência Térmica do Revestimento Externo (Jaquetá)

A resistência térmica do revestimento externo apresentada na Seção 2.4.4 é determinada pela equação (50).

$$\bar{R}_j' = 0.0104 \cdot \rho_j \cdot n \left( \frac{t}{D_j - t} \right) \text{ [TOF]} \quad (50)$$

Onde:

- $\bar{R}_j'$  Resistência térmica da jaqueta [TOF];
- $\rho_j$  Resistividade térmica da jaqueta [ $^{\circ}\text{C cm /W}$ ];
- $n$  Número de condutores;
- $D_j$  Diâmetro externo da jaqueta [in];
- $t$  Espessura da jaqueta [in].

### 3.2.10 Resistência Térmica entre o Cabo e o Duto

A resistência térmica entre o cabo e o duto descrita na Seção 2.4.5 é determinada pela equação (51).

$$\bar{R}_{sd}' = \frac{n'A}{1 + (B + CT_m)D_s'} \text{ [TOF]} \quad (51)$$

Onde:

- $\bar{R}_{sd}'$  Resistência térmica entre o cabo e duto [TOF];
- $n'$  Número de condutores;
- $A$  Constante obtida pela Tabela VII (NEHER e MCGRATH, 1957);
- $B$  Constante obtida pela Tabela VII (NEHER e MCGRATH, 1957);
- $C$  Constante obtida pela Tabela VII (NEHER e MCGRATH, 1957);
- $T_m$  Temperatura média entre cabo e duto [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $D_s'$  Diâmetro que circunscreve os cabos que se encontram dentro do duto [in].

### 3.2.11 Resistência Térmica do Duto

A resistência térmica do duto apresentada na Seção 2.4.6 é determinada pela equação (52).

$$\bar{R}_d' = 0.0104 \cdot \rho_c \cdot n' \left( \frac{t}{D - t} \right) \text{ [TOF]} \quad (52)$$

Onde:

$\bar{R}_d'$  Resistência térmica da parede do duto [TOF];

$\rho_c$  Resistividade térmica do duto [ $^{\circ}\text{C cm/W}$ ];

$n'$  Número de condutores;

$D$  Diâmetro externo do duto [in];

$t$  Espessura do duto [in].

### 3.2.12 Resistência Térmica Externa

A resistência térmica externa descrita na Seção 2.4.7 é determinada pela equação (53). Se houver outros cabos enterrados separadamente o aquecimento mútuo pode ser determinado pela equação (54).

$$\bar{R}_e' = 0.012 \cdot \rho_e' \cdot n' \left[ \log \left( \frac{D_x}{D_{ex}} \right) + LF \cdot \log \left( \frac{4L}{D_x} \right) F \right] \text{ [TOF]} \quad (53)$$

Onde:

$\bar{R}_e'$  Resistência térmica do solo [TOF];

$n'$  Número de condutores;

$L$  Profundidade da linha [in];

$LF$  Fator de perda;

$lf$  Fator de carga;

$D_{ex}$  Diâmetro no qual a porção de terra do circuito térmico começa [in];

$D_x$  Difusividade térmica [in].

O fator do efeito de aquecimento mútuo entre cabos ( $F$ ) é calculado de acordo com:

$$F = \left(\frac{d_{12}'}{d_{12}}\right) \left(\frac{d_{13}'}{d_{13}}\right) \left(\frac{d_{14}'}{d_{14}}\right) \dots \left(\frac{d_{1N}'}{d_{1N}}\right) (N - 1 \text{ terms}) \quad (54)$$

O fator de perda é obtido pela expressão (55), sendo esse fator, dependente do fator de carga.

$$LF = 0.3lf + 0.7(lf)^2 \quad (55)$$

Onde:

$lf$  Fator de carga.

Com a equação (56) determina-se a difusividade térmica.

$$D_x = 1.02\sqrt{\alpha \times 24 \text{ hrs.}} \quad (56)$$

Onde:

$\alpha$  Difusividade do meio, determinado pela expressão:

$$\alpha = \frac{104}{\rho_e^{0.8}} \quad (57)$$

Onde:

$\rho_e$  Resistividade térmica do solo [ $^{\circ}\text{C cm/W}$ ].

### 3.2.13 Determinação da Resistência Térmica Total

A equação (58) que determina a resistência térmica total além de possuir as resistências térmicas, engloba as taxas de perdas  $Q_s$  e  $Q_e$  formadas pelas perdas no condutor, na blindagem e no duto metálico.

$$\bar{R}_{ca}' = \bar{R}_i' + Q_s \bar{R}_{se}' + Q_e \bar{R}_e' \quad [\text{TOF}] \quad (58)$$

Onde:

$\bar{R}_{ca}'$  Resistência térmica efetiva do circuito térmico [TOF];

- $\bar{R}_i'$  Resistência térmica entre o condutor e a blindagem [TOF];  
 $\bar{R}_{se}'$  Resistência térmica entre a blindagem e o duto [TOF];  
 $\bar{R}_e'$  Resistência térmica do ambiente externo ao duto [TOF];  
 $Q_e$  Taxa de perdas ocasionadas no condutor, na blindagem e no duto metálico.

A taxa de perdas ocasionadas no condutor e na blindagem ( $Q_s$ ) é dada por:

$$Q_s = 1 + \frac{Y_s}{1 + Y_c} \quad (59)$$

Onde:

- $Y_s$  Fator de perdas originadas na blindagem;  
 $Y_c$  Fator de perdas originadas no condutor.

A taxa de perdas ocasionadas no condutor, na blindagem e no duto metálico ( $Q_e$ ) é determinada pela equação (60).

$$Q_e = 1 + \frac{Y_s + Y_p}{1 + Y_c} \quad (60)$$

Onde:

- $Y_p$  Fator de perdas originadas no duto ou tubo metálico;  
 $Y_s$  Fator de perdas originadas na blindagem;  
 $Y_c$  Fator de perdas originadas no condutor.



#### 4 SOFTWARE DESENVOLVIDO

A ideia fundamental deste trabalho foi realizar um estudo de comparação entre as metodologias IEEE Std 835 e IEC 60287 para determinar a ampacidade de cabos subterrâneos. Para viabilizar os cálculos e a comparação de diferentes situações de projeto, usando diferentes cabos e diferentes tipos de linhas subterrâneas, para ambas as normas, foi desenvolvido um software de cálculo de ampacidade utilizando MATLAB R2013a.

O software consiste de um menu onde o usuário determina qual o modelo de linha subterrânea será utilizado e em seguida preenche as características da linha. Essas características envolvem parâmetros da linha que podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros da linha

|                         | Parâmetro   | IEEE                        | IEC                  |
|-------------------------|---|-----------------------------|----------------------|
| Cabo                    | Diâmetro externo total do cabo isolado              | in                          | mm                   |
|                         | Distância entre cabos                               | in                          | mm                   |
|                         | Fator de carga                                      | %                           | %                    |
| Condutor                | Resistência do condutor                             | $\mu\Omega/\text{ft}$       | $\mu\Omega/\text{m}$ |
|                         | Temperatura do condutor                             | $^{\circ}\text{C}$          | $^{\circ}\text{C}$   |
|                         | Diâmetro externo do condutor                        | in                          | mm                   |
|                         | Comprimento do condutor                             | in                          | m                    |
|                         | Área transversal do condutor                        | $\text{m}^2$                | $\text{m}^2$         |
| Blindagem Semicondutora | Diâmetro externo da blindagem semicondutora externa | in                          | mm                   |
|                         | Diâmetro externo da blindagem semicondutora interna | in                          | mm                   |
| Isolante                | Resistividade do isolante                           | $^{\circ}\text{C cm/W}$     | $\text{K m/W}$       |
|                         | Diâmetro externo do isolante                        | in                          | mm                   |
|                         | Tensão no dielétrico                                | kV                          | kV                   |
|                         | SIC do isolante                                     | -                           | -                    |
|                         | Fator de dissipação                                 | %                           | %                    |
| Blindagem Metálica      | Diâmetro externo da blindagem metálica              | in                          | mm                   |
|                         | Número de fios de cobre da blindagem metálica       | -                           | -                    |
|                         | Diâmetro do fio de cobre da blindagem metálica      | in                          | mm                   |
|                         | Resistividade do fio de cobre da blindagem metálica | $\Omega\text{cm}/\text{ft}$ | $\Omega\text{m}$     |
|                         | Fator lay   | -                           | -                    |
| Jaqueta                 | Resistividade da jaqueta                            | $^{\circ}\text{C cm/W}$     | $\text{K m/W}$       |
|                         | Espessura da jaqueta                                | in                          | mm                   |
|                         | Diâmetro externo da jaqueta                         | in                          | mm                   |
| Duto                    | Resistividade do duto                               | $^{\circ}\text{C cm/W}$     | $\text{K m/W}$       |
|                         | Temperatura dentro do duto                          | $^{\circ}\text{C}$          | $^{\circ}\text{C}$   |
|                         | Diâmetro externo do duto                            | in                          | mm                   |
|                         | Diâmetro interno do duto                            | in                          | mm                   |
|                         | Espessura do duto                                   | in                          | mm                   |
| Solo                    | Resistividade do solo                               | $^{\circ}\text{C cm/W}$     | $\text{K m/W}$       |
|                         | Temperatura do solo                                 | $^{\circ}\text{C}$          | $^{\circ}\text{C}$   |
|                         | Profundidade da linha com relação a superfície      | in                          | mm                   |

Fonte: Autoria própria (2017)

Como mostra a Tabela 5, para esse software tem-se três configurações diferentes de linha com base em exemplos existentes na norma IEEE Std 835 e em uma configuração desenvolvida por Lindstrom (2011) com base na norma IEC 60287. Essa linha baseada na norma IEC 60287 também será aplicada na norma IEEE Std 835 para fins de comparação entre as normas. As Seções 5.2 e 5.3 apresentam os resultados obtidos com essas configurações de linha.

Tabela 5 – Configurações de linha

| Norma | Configuração                                     |
|-------|--|
| IEEE  | 0.6 kV – 3 cabos dentro de um duto               |
| IEEE  | 15 kV – 1 cabo diretamente enterrado             |
| IEEE  | 35 kV – 3 cabos um em cada duto                  |
| IEEE  | 36 kV – 1 cabo de 3 condutores dentro de um duto |
| IEC   | 36 kV – 1 cabo de 3 condutores dentro de um duto |

Fonte: Autoria própria (2017)

Na norma IEEE cada modelo possui suas próprias características o que exige que o software de simulação tenha uma ampla possibilidade de aplicações.

Para a configuração de tensão 0,6 kV os três cabos estão instalados dentro de um duto e estão isolados entre si. Entretanto, por ser uma linha de baixa tensão, os três cabos são formados por um condutor e uma camada isolante, ou seja, eles não possuem blindagem e nem revestimento externo a blindagem. Essa ausência da camada de blindagem, da camada de revestimento e até mesmo da camada de armadura faz com que as perdas na blindagem e na armadura sejam nulas. Além de que em conjunto com a baixa tensão, as perdas no dielétrico são desprezíveis. As perdas no duto são nulas pois o duto é formado pelo material PVC.

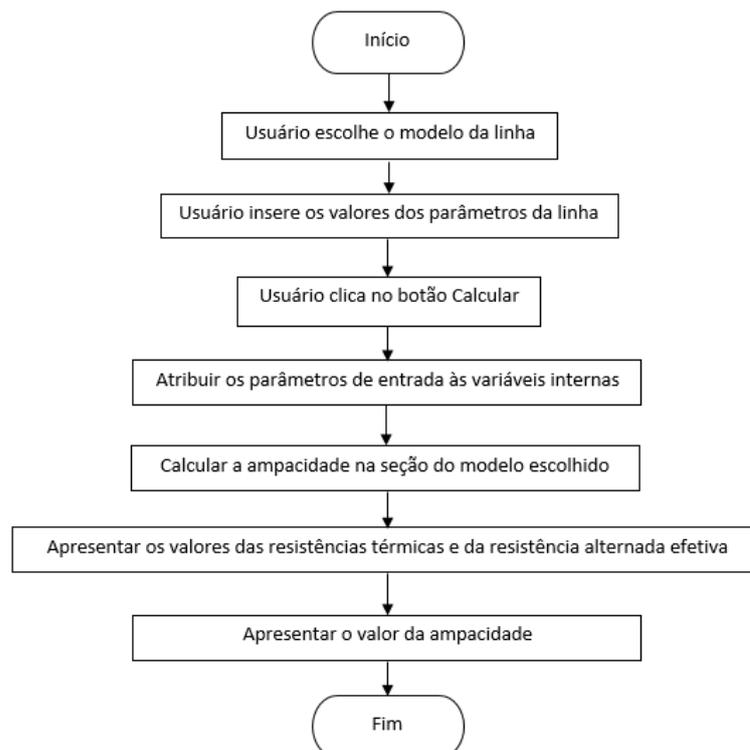
Com relação ao modelo de 15 kV existe uma linha subterrânea composta por um cabo isolado enterrado sem um duto para sua proteção. Por ser uma linha que não possui duto, o cabo enterrado possui uma camada de blindagem. Com relação as perdas, as do condutor são formadas apenas pelo efeito pelicular, visto que sem um agrupamento de cabos o efeito de proximidade é nulo. A perda na blindagem é composta somente pela corrente circulante. A corrente de Foucault é nula pois a blindagem é enterrada em ambas as extremidades. Assim como na configuração de 0,6 kV a perda no dielétrico não foi considerada nesse caso. Segundo a norma IEEE Std 835 (1994) “A perda no dielétrico pode ter um efeito significativo sobre a ampacidade do cabo para situações com mais de um cabo e tensão entre 15 e 35 kV, ou para alguns cabos acima de 35 kV.”

No caso onde a tensão da linha é 35 kV, a configuração se baseia em três cabos enterrados, cada um em seu respectivo duto. Esses cabos são formados por três camadas principais: isolamento, blindagem e jaqueta. Portanto, essa linha possui perdas por efeito skin, efeito de proximidade e corrente circulante. A corrente de Foucault é nula pois a blindagem é aterrada em ambas as extremidades. Por outro lado, nesse caso a perda no dielétrico é considerada. Com relação as perdas no duto elas são nulas pois assim como na linha de 0,6kV essa linha possui dutos de PVC. Além da perda no dielétrico uma característica que difere essa linha das comentadas anteriormente é a presença do aquecimento mútuo entre os três cabos.

A linha de 36kV é uma configuração que pode ser calculado tanto pela norma americana quanto pela IEC 60287. Essa configuração servirá como uma forma de comparar o método de determinação da ampacidade utilizando ambas as normas. Nessa linha tem-se um cabo composto por três condutores que se encontra enterrado dentro de um duto não metálico. Esse cabo possui uma camada isolante protegida por uma blindagem, a qual é revestida com PVC. Assim como o modelo de 35kV da norma IEEE essa linha possui perdas de dielétrico, condutor e blindagem, entretanto, não possui o aquecimento mútuo presente no ambiente externo ao duto.

A maneira como o programa funciona pode ser observado no fluxograma da Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma



Fonte: Autoria própria (2017)

No momento que o usuário inicia o programa, ele deve primeiramente determinar, dentro das opções do software, qual o modelo de linha subterrânea que ele deseja calcular o valor de ampacidade. Após definido o tipo da linha, o usuário deve definir e atribuir no software os parâmetros de sua linha. Concluído essa etapa, basta clicar em “Calcular” que o software irá executar os cálculos de ampacidade com base no modelo de linha escolhido, visto que os modelos podem diferir em algumas partes do cálculo. O resultado expresso pelo software é composto pelo valor da ampacidade do cabo, a resistência em corrente alternada (considerando as perdas no condutor) e os valores das resistências térmicas da linha. O motivo de apresentar esses valores em conjunto com a ampacidade está fundamentado na importância que esses valores tem na determinação da ampacidade. Além de que a resistência efetiva e as resistências térmicas englobam os principais termos para determinar a ampacidade.

Assim que os valores de ampacidade, resistência AC e resistências térmicas são apresentados, os parâmetros anteriores e o modelo da linha não sofrem alterações e o usuário está apto a modificá-los para determinação de um novo valor de ampacidade. A Figura 16 representa a interface do software e mostra a distribuição dos parâmetros.

Figura 16 – Interface do software

The software interface is titled 'programa1' and displays the configuration for an underground transmission line. The main configuration is for 'EEEE 0.6 kV (3 cables in a conduit)'. The parameters are organized as follows:

- Cabo:** Diâmetro Externo Total do Cabo Isolado (0 in), Distância entre Cabos (0 in), Fator de Carga (0 %).
- Jaqueta (Cobertura):** Resistividade da Jaqueta (0 °C cm/W), Diâmetro Externo da Jaqueta (0 in), Espessura da Jaqueta (0 in).
- Solo:** Profundidade (0 in), Resistividade do Solo (0 °C cm/W), Temperatura do Solo (0 °C).
- Condutor:** Resistência DC do Condutor (0 uOhm/ft), Temperatura do Condutor (0 °C), Diâmetro Externo do Condutor (0 in), Comprimento do Condutor (0 m), Área Transversal do Condutor (0 m²).
- Duto:** Temperatura Interna do Duto (0 °C), Resistividade do Duto (0 °C cm/W), Diâmetro Externo do Duto (0 in), Diâmetro Interno do Duto (0 in), Espessura do Duto (0 in).
- Isolante:** Resistividade do Isolante (0 °C cm/W), Diâmetro Externo do Isolante (0 in), Tensão Fase-Neuro (0 kV), SIC do Isolante (0), Fator de Dissipação (0 %).
- Blindagem Semicondutora:** Diâmetro Externo da Blindagem Semicondutora Interna (0 in), Diâmetro Externo da Blindagem Semicondutora Externa (0 in).
- Blindagem Metálica:** Resistividade do Fio de Cobre da Blindagem Metálica (0 Ohm cm/ft), Diâmetro Externo da Blindagem Metálica (0 in), Diâmetro do Fio de Cobre da Blindagem Metálica (0 in), Número de Fios de Cobre da Blindagem Metálica (0), Fator Lay (0).
- Calcular:** A 'Calcular' button is located in the bottom right area. Below it, the results are displayed: Ampacidade (0 kA), Resistência de Corrente Alternada (0 uOhm/ft), Resistência Térmica entre o Condutor e Blindagem (0 TOF), Resistência Térmica da Cobertura (Jaqueta) (0 TOF), Resistência Térmica entre Cabo e Duto (0 TOF), Resistência Térmica do Duto (0 TOF), and Resistência Térmica Externa (0 TOF).

Fonte: Autoria própria (2017)

A janela do software é bem simples mas possui todos os parâmetros necessários para determinação da ampacidade. Inicialmente tem-se o tipo da linha. Em seguida é perguntado ao usuário os parâmetros do cabo, do condutor, blindagem semicondutora e blindagem metálica.

Após esses itens tem-se os parâmetros da jaqueta, do duto, do solo e do isolante. Por fim, no canto inferior direito tem-se o botão responsável por ordenar o início dos cálculos e exposição dos resultados.



## 5 RESULTADOS

### 5.1 COMPARAÇÃO TEÓRICA ENTRE AS NORMAS

A Tabela 6 mostra as principais diferenças existentes na determinação da ampacidade pelas normas IEC 60287 e IEEE Std 835.

Tabela 6 – Diferenças entre as normas

| Item   | IEEE | IEC |
|--|------|-----|
| Considera perda no duto metálico   | Sim  | Não |
| Considera perda na armadura  | Não  | Sim |
| Usuário defini a frequência de operação  | Não  | Sim |
| Resistência térmica total considera perdas do condutor, da blindagem e do duto | Sim  | Não |
| Utiliza fator de carga, difusividade térmica e efeito de aquecimento mútuo     | Sim  | Não |
| Fator geométrico com variedade maior de linhas                                 | Não  | Sim |

Fonte: Autoria própria (2017)

Os circuitos térmicos das Figuras 13 (Seção 3.1.1) e 14 (Seção 3.2.1) mostram uma grande similaridade. Entretanto, com relação as resistências térmicas e as perdas, as normas não são exatamente iguais. A norma IEC 60287 considera as perdas que ocorrem na armadura do cabo, enquanto que a norma IEEE Std 835 não considera. Por outro lado, a norma IEEE Std 835 considera a perda que ocorre no duto, quando esse duto for metálico, sendo que, essa perda não é analisada pela norma IEC 60287. Outra diferença existente entre as normas são os agrupamentos das resistências térmicas e suas unidades. A norma IEC 60287 possui a resistência térmica  $T_4$  que agrupa resistências térmicas da superfície do cabo até o ambiente externo ao duto. A norma IEEE Std 835 com  $\bar{R}_{se}'$  agrupa resistências térmicas da parte externa da blindagem até a parte interna do duto. A unidade para resistência térmica na norma IEC 60287 é K m/W, e para norma IEEE Std 835 é *TOF* (Thermal Ohm Feet).

As Seções 3.1.4 e 3.2.4 que determinam a taxa de perda ocasionadas pelo efeito pelicular e pelo efeito de proximidade no condutor estão fundamentadas no mesmo princípio, mas não são exatamente iguais e se diferenciam principalmente na questão da frequência, pois a norma IEEE Std 835 disponibiliza sua equação para a frequência fixa de 60Hz, enquanto que a IEC 60287 não possui frequência fixa. O mesmo vale para as Seções 3.1.5 e 3.2.5 na determinação da perda do dielétrico.

Para determinação da resistência térmica externa percebe-se que a norma IEEE Std 835 é mais completa que a IEC 60287 por não levar em consideração somente a resistividade do local e a profundidade da linha. O fator de perda considerado pelo IEEE Std 835 possui o fator de carga que é muito importante, visto que essa aplicação é normalmente utilizada para linhas de transmissão. Outros fatores não encontrados na norma IEC 60287 são: difusividade térmica e o fator de aquecimento mútuo entre cabos.

A norma IEC 60287 possui o fator geométrico (Seção 3.1.8) que permite determinar resistências térmicas de um número maior de tipos de linhas (três núcleos, cabos preenchidos com óleo, cabos blindados, etc.) se comparado a norma IEEE Std 835 (Seção 3.2.8).

## 5.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS NORMAS COM UM MODELO DE LINHA

Para que se pudesse avaliar os resultados das duas normas para uma mesma situação, foi escolhido uma situação muito usual em linhas de transmissão de parques eólicos ou solares. Na Tabela 7 se encontram os dados utilizados na determinação da ampacidade por ambas as normas.

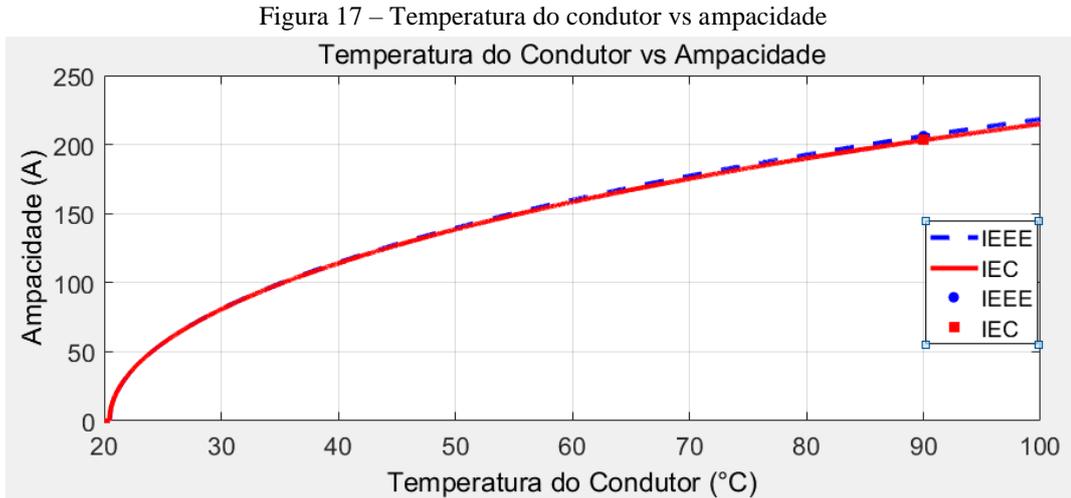
Tabela 7 – Dados da linha de transmissão subterrânea

| Cabo                            | AXKJ-F 3x95/25         |
|---------------------------------|------------------------|
| Tensão                          | 36 kV                  |
| Frequência                      | 60 Hz                  |
| Fator de carga                  | 100 %                  |
| Temperatura do condutor         | 90 °C                  |
| Temperatura no interior do duto | 40 °C                  |
| Temperatura do ambiente         | 20 °C                  |
| Resistividade do solo           | 1 K m/W ou 100 °C cm/W |
| Duto                            | Plástico               |
| Profundidade da linha           | 0,7 m                  |

Fonte: Autoria própria (2017)

Nos Anexos A e B se encontram mais informações sobre o cabo utilizado no modelo de linha utilizado para comparação entre as normas (REKA, 2017). Nos Apêndices D e E são apresentados todos os parâmetros (para cada norma) utilizados no software para a determinação da ampacidade.

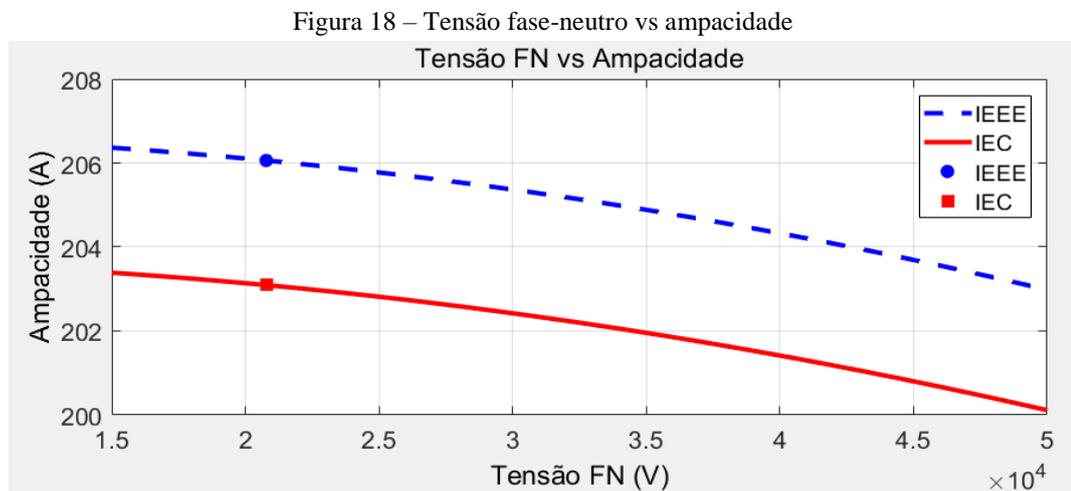
A Figura 17 apresenta o comportamento da ampacidade quando ocorre uma variação na temperatura do condutor. No projeto original a linha está instalada num ponto de operação de 90 °C no eixo horizontal. O cruzamento da temperatura de 90 °C com a ampacidade de cada curva são representados pelo círculo azul e o quadrado vermelho.



Fonte: Autoria própria (2017)

Na Figura 17 o ponto em que a ampacidade é nula ocorre no momento em que a temperatura do condutor se iguala a soma da temperatura ambiente com a temperatura gerada pela perda no dielétrico (aproximadamente 20 °C). A medida que a temperatura do condutor se eleva o valor da corrente do condutor também se eleva. Observa-se também que ambas as normas descrevem curvas semelhantes.

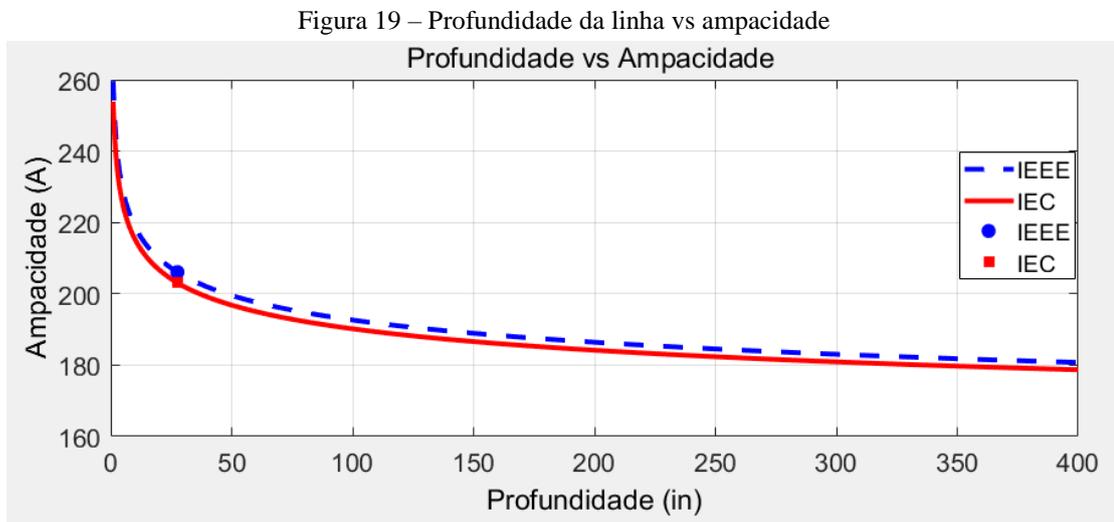
O comportamento da ampacidade da linha subterrânea de acordo com a tensão fase-neutro é apresentado na Figura 18.



Fonte: Autoria própria (2017)

Assim como na Figura 17, na Figura 18 o círculo azul e o quadrado vermelho sinalizam o cruzamento da tensão fase-neutro com a ampacidade da configuração que foi escolhida para realizar a comparação. Na Figura 18 percebe-se um decréscimo da ampacidade na medida que a tensão fase-neutro se eleva. Esse comportamento é justificado pelo aumento na perda do dielétrico (equações (13) e (41)) que é ocasionado pelo aumento da tensão fase-neutro. Nota-se também que as curvas das normas se assemelham.

A Figura 19 apresenta a relação da ampacidade com profundidade da linha partindo da superfície do solo.



Fonte: Autoria própria (2017)

Na Figura 19 é possível observar que na medida que a profundidade da linha se eleva o valor da ampacidade reduz. Isto ocorre, pois uma linha mais profunda resulta em uma resistência térmica externa maior e conseqüentemente uma ampacidade menor. Assim como nas Figuras 17 e 18, nessa Figura 19 é possível perceber uma semelhança nas curvas das normas.

A Tabela 8 apresenta os valores de ampacidade para as normas IEC 60287 e IEEE Std 835.

Tabela 8 – Valores de ampacidade obtidos

| Norma        | Ampacidade (A) |
|--------------|----------------|
| IEC 60287    | 203,09         |
| IEEE Std 835 | 206,06         |

Fonte: Aatoria própria (2017)

Analisando os resultados mostrados nas Figuras 17, 18 e 19, e na Tabela 8 percebe-se que as normas IEEE Std 835 e IEC 60287 se comportam de maneira similar. Além disso elas apresentam resultados com uma diferença de 1,44%.

### 5.3 COMPARAÇÃO COM SOFTWARE E OS EXEMPLOS DAS NORMAS

Como havia sido comentado anteriormente, as configurações de linha de 0,6 kV, 15 kV e 35 kV estão fundamentados em exemplos da norma IEEE Std 835. Enquanto que a linha de 36 kV original da dissertação Lindstrom (2011) é aplicada na norma IEC 60287. Os parâmetros desses quatro modelos se encontram nos Apêndices A, B, C e E. Portanto essas quatro configurações possuem valores que podem ser comparados com os resultados obtidos pelo software como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Valores do software e dos exemplos das normas

| Norma        | Modelo da Linha                      | Software (A) | Norma (A) | Diferença (%) |
|--------------|--------------------------------------|--------------|-----------|---------------|
| IEEE Std 835 | 0.6 kV – 3 cabos dentro de um duto   | 283,93       | 284       | 0,025         |
| IEEE Std 835 | 15 kV – 1 cabo diretamente enterrado | 265,67       | 267       | 0,5           |
| IEEE Std 835 | 35 kV – 3 cabos um em cada duto      | 309,99       | 307       | 0,97          |
| IEC 60287    | 36 kV – 1 cabo de 3 condut. com duto | 203,09       | 205       | 0,93          |

Fonte: Aatoria própria (2017)

Conforme a Tabela 9 nota-se que o software desenvolvido com base nas normas, apresentou resultados satisfatórios com erros que não chegam a 1%.



## 6 CONCLUSÃO

Com relação ao estudo realizado, no primeiro momento procurou-se relatar um breve histórico das linhas de transmissão subterrâneas, em seguida relatou-se sobre o cabo isolado e sua composição interna. Logo após, foi desenvolvido o entendimento das características elétricas e térmicas, das equações que compõe a norma IEC 60287 e a norma IEEE Std 835 separadamente, assim como a estrutura do software desenvolvido.

Os três exemplos da norma IEEE Std 835 e o exemplo da norma IEC 60287 obtido da dissertação Lindstrom (2011) foram utilizados como configurações de linha de transmissão subterrânea. Todos apresentaram resultados satisfatórios com diferenças que não superam o valor de 1% se comparados com os resultados obtidos com o software. Com relação aos resultados obtidos no software para o exemplo da dissertação Lindstrom (2011), onde as duas normas foram comparadas entre si, foi obtido uma diferença de 1,44%.

Durante a comparação entre as duas normas utilizadas no software, foram desenvolvidos gráficos através do software MATLAB para fins de análise do comportamento das normas. Foram plotados três gráficos onde se variou a temperatura do condutor, a tensão fase-neutro da linha e a profundidade na qual a linha é enterrada, e observou-se os seus efeitos sobre a ampacidade. Nos três gráficos as duas normas demonstraram semelhança no comportamento.

Foi também desenvolvido um software que possibilita a utilização das duas normas de ampacidade para linhas subterrâneas para diferentes modelos de linha. Esse software possibilita que o usuário tenha facilidade de dimensionar os itens que compõe a sua linha enterrada, de forma que os projetos que estão sendo desenvolvidos sejam mais ágeis.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (Org.). **Redes subterrâneas de distribuição e de energia:** situação atual e avaliação da necessidade de aprimoramento da regulação associada. 2014. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br>> Técnica nº 0098-2014 - SRD-ANEE>. Acesso em: 6 nov. 2017.

ANDERS, George J.. **Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment.** New Jersey: Ieee, 2005. 349 p.

BRUNHEROTTO, Placido Antonio; OLIVEIRA, João José dos Santos. Redes Subterrâneas no Mundo: História e Números. **O Setor Elétrico**, São Paulo, v. 1, n. 84, p.36-39, jan. 2013.

CABLES, Reka. **Cabo intermediário AXKJ-F LT 24 kV 3x.** Disponível em: <<https://www.rekakabel.se>>. Acesso em: 1 set. 2017.

GONEN, Turan. Underground Power Transmission and Gas-Insulated Transmission Lines. In: GONEN, Turan. **Electrical Power Transmission System Engineering: Analysis and Design.** 3. ed. Sacramento: Crc Press, 2014. Cap. 5. p. 305-388.

GUERRISI, Alessandra. **Thermal Analysis of Power Lines: Methodologies and Applications.** 2013. 65 f. Tese (Doutorado) - Curso de Dottorato In Ingegneria Elettrica, Scienze Elettriche, Politecnico di Torino, Torino, 2013.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60287-1-1:** Electric Cables – Calculations of the current ratings – Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General, Edition 2.0 2006-12.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60287-2-1:** Electric Cables – Calculations of the current ratings – Part 2-1: Thermal resistance, Edition 1.2 2006-05.

KELLY, Lawrence J.; LANDINGER, Carl C.. Ampacity Cables. In: THUE, William A.. **Electrical Power Cable Engineering.** Boca Raton: Crc Press, 1998. Cap. 13. p. 203-219.

LEE, W. J. et al. Projeto de Linha de Transmissão Submarina Biguaçu - Desterro em 230 kV. In: DÉCIMO TERCER ENCUESTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ, 13., 2009, Florianópolis. **Documento**. Puerto Iguazú: Cigré, 2009. p. 1 - 7.

LINDSTROM, Ludvig. **Evaluating Impact on Ampacity According to IEC-60287 Regarding Thermally Unfavourable Placement of Power Cables**. 2011. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Electrical Engineering, Kth Royal Institute Of Technology, Stockholm, 2011.

NEHER, J. H.; MCGRATH, M. H.. The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems. **Transactions Of The American Institute Of Electrical Engineers. Part Iii: Power Apparatus and Systems**, [s.l.], v. 76, n. 3, p.752-764, abr. 1957. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/aieepas.1957.4499653>.

OLIVEIRA, Fábio Gabriel de. **Estudo de Instalações de Linhas Subterrâneas de Alta Tensão com Relação a Campos Magnéticos**. 2010. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia e Automação Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PIMENTEL, Bernardo Maia. **Introdução ao Estudo de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica a Cabos Isolados**. 2010. 50 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SILVA, João Luís Santos Ribeiro da. **Dimensionamento de Cabos de alta tensão (até 150kV) e elaboração de projecto de instalação elétrica**. 2008. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE STD 835: IEEE Standard Power Cable Ampacity Tables**. 1 ed. New York: Ieee, 1994. 3151 p.

VELASCO, Giuliana del Nero; LIMA, Ana Maria Liner Pereira; COUTO, Hilton Thadeu Zarate do. Análise Comparativa dos Custos de Diferentes Redes de Distribuição de Energia Elétrica no Contexto da Arborização Urbana. **Sociedade de Investigações Florestais**, Viçosa, v. 4, n. 30, p.679-686, 05 abr. 2006.

**APÊNDICE A – TABELA COM PARÂMETROS DA LINHA DE 0,6 kV**

Tabela 10 – Parâmetros da linha de 0,6 kV (3 cabos em um duto)

|                         | Parâmetro   | IEEE                       |
|-------------------------|---|----------------------------|
| Cabo                    | Diâmetro externo total do cabo isolado              | 1,873 in                   |
|                         | Distância entre cabos                               | n                          |
|                         | Fator de carga                                      | 75 %                       |
| Condutor                | Resistência do condutor                             | 50,5 $\mu\Omega$ /ft @25°C |
|                         | Temperatura do condutor                             | 90 °C                      |
|                         | Diâmetro externo do condutor                        | 0,681 in                   |
|                         | Comprimento do condutor                             | n                          |
|                         | Área transversal do condutor                        | n                          |
| Blindagem Semicondutora | Diâmetro externo da blindagem semicondutora externa | n                          |
|                         | Diâmetro externo da blindagem semicondutora interna | n                          |
| Isolante                | Diâmetro externo do isolante                        | 0,871 in                   |
|                         | Resistividade do isolante                           | 350 °C cm/W                |
|                         | Tensão no dielétrico                                | n                          |
|                         | SIC do isolante                                     | n                          |
|                         | Fator de dissipação                                 | n                          |
| Blindagem Metálica      | Diâmetro externo da blindagem metálica              | n                          |
|                         | Número de fios de cobre da blindagem metálica       | n                          |
|                         | Diâmetro do fio de cobre da blindagem metálica      | n                          |
|                         | Resistividade do fio de cobre da blindagem metálica | n                          |
|                         | Fator lay   | n                          |
| Jaqueta                 | Resistividade da jaqueta                            | n                          |
|                         | Espessura da jaqueta                                | n                          |
|                         | Diâmetro externo da jaqueta                         | n                          |
| Duto                    | Resistividade do duto                               | 600 °C cm/W                |
|                         | Temperatura dentro do duto                          | 70 °C                      |
|                         | Diâmetro externo do duto                            | 3,5 in                     |
|                         | Diâmetro interno do duto                            | 3,068 in                   |
|                         | Espessura do duto                                   | 0,216 in                   |
| Solo                    | Resistividade do solo                               | 120 °C cm/W                |
|                         | Temperatura do solo                                 | 25 °C                      |
|                         | Profundidade da linha com relação a superfície      | 36 in                      |

Fonte: Autoria própria (2017)



## APÊNDICE B – TABELA COM PARÂMETROS DA LINHA DE 15 kV

Tabela 11 – Parâmetros da linha de 15 kV (diretamente enterrada)

|                         | Parâmetro   | IEEE                      |
|-------------------------|---|---------------------------|
| Cabo                    | Diâmetro externo total do cabo isolado              | n                         |
|                         | Distância entre cabos                               | n                         |
|                         | Fator de carga                                      | 75 %                      |
| Condutor                | Resistência do condutor                             | 168 $\mu\Omega$ /ft @25°C |
|                         | Temperatura do condutor                             | 90 °C                     |
|                         | Diâmetro externo do condutor                        | 0,373 in                  |
|                         | Comprimento do condutor                             | n                         |
|                         | Área transversal do condutor                        | n                         |
| Blindagem Semicondutora | Diâmetro externo da blindagem semicondutora interna | 0,403                     |
|                         | Diâmetro externo da blindagem semicondutora externa | 0,853                     |
| Isolante                | Resistividade do isolante                           | 350 °C cm/W               |
|                         | Diâmetro externo do isolante                        | 0,753 in                  |
|                         | Tensão no dielétrico                                | n                         |
|                         | SIC do isolante                                     | n                         |
|                         | Fator de dissipação                                 | n                         |
| Blindagem Metálica      | Diâmetro externo da blindagem metálica              | 0,981 in                  |
|                         | Número de fios de cobre da blindagem metálica       | 8                         |
|                         | Diâmetro do fio de cobre da blindagem metálica      | 0,0641                    |
|                         | Resistividade do fio de cobre da blindagem metálica | 10,575 Ohm cm/ft          |
|                         | Fator lay   | 1,05                      |
| Jaqueta                 | Resistividade da jaqueta                            | n                         |
|                         | Diâmetro externo da jaqueta                         | n                         |
|                         | Espessura da jaqueta                                | n                         |
| Duto                    | Resistividade do duto                               | n                         |
|                         | Temperatura dentro do duto                          | n                         |
|                         | Diâmetro externo do duto                            | n                         |
|                         | Diâmetro interno do duto                            | n                         |
|                         | Espessura do duto                                   | n                         |
| Solo                    | Resistividade do solo                               | 90 °C cm/W                |
|                         | Temperatura do solo                                 | 25 °C                     |
|                         | Profundidade da linha com relação a superfície      | 36 in                     |

Fonte: Autoria própria (2017)



## APÊNDICE C – TABELA COM PARÂMETROS DA LINHA DE 35 kV

Tabela 12 –Parâmetros da linha de 35 kV (3 cabos um em cada duto)

|                         | Parâmetro   | IEEE                       |
|-------------------------|---|----------------------------|
| Cabo                    | Diâmetro externo total do cabo isolado              | n                          |
|                         | Distância entre cabos                               | 7,5 in                     |
|                         | Fator de carga                                      | 100 %                      |
| Condutor                | Resistência do condutor                             | 70,8 $\mu\Omega$ /ft @25°C |
|                         | Temperatura do condutor                             | 90 °C                      |
|                         | Diâmetro externo do condutor                        | 0,558 in                   |
|                         | Comprimento do condutor                             | n                          |
|                         | Área transversal do condutor                        | n                          |
| Blindagem Semicondutora | Diâmetro externo da blindagem semicondutora interna | 0,558                      |
|                         | Diâmetro externo da blindagem semicondutora externa | 1,358                      |
| Isolante                | Resistividade do isolante                           | 350 °C cm/W                |
|                         | Diâmetro externo do isolante                        | 1,278 in                   |
|                         | Tensão no dielétrico                                | 20 kV                      |
|                         | SIC do isolante                                     | 2,3                        |
|                         | Fator de dissipação                                 | 0,1 %                      |
| Blindagem Metálica      | Diâmetro externo da blindagem metálica              | 1,486                      |
|                         | Número de fios de cobre da blindagem metálica       | 12                         |
|                         | Diâmetro do fio de cobre da blindagem metálica      | 0,0641                     |
|                         | Resistividade do fio de cobre da blindagem metálica | 10,575 Ohm cm/ft           |
|                         | Fator lay   | 1,05                       |
| Jaqueta                 | Resistividade da jaqueta                            | 500 °C cm/W                |
|                         | Diâmetro externo da jaqueta                         | 1,646 in                   |
|                         | Espessura da jaqueta                                | 0,080 in                   |
| Duto                    | Resistividade do duto                               | 600 °C cm/W                |
|                         | Temperatura dentro do duto                          | 70 °C                      |
|                         | Diâmetro externo do duto                            | 3,5 in                     |
|                         | Diâmetro interno do duto                            | 3,068 in                   |
|                         | Espessura do duto                                   | 0,216 in                   |
| Solo                    | Resistividade do solo                               | 60 °C cm/W                 |
|                         | Temperatura do solo                                 | 25 °C                      |
|                         | Profundidade da linha com relação a superfície      | 36 in                      |

Fonte: Autoria própria (2017)



## APÊNDICE D – TABELA COM PARÂMETROS DA LINHA DE 36 kV (IEEE)

Tabela 13 – Parâmetros da linha de 36 kV (3 cabos em um duto) – IEEE Std 835

|                         | Parâmetro   | IEEE                                 |
|-------------------------|---|--------------------------------------|
| Cabo                    | Diâmetro externo total do cabo isolado              | 2,5197                               |
|                         | Distância entre cabos                               | 1,1811 in                            |
|                         | Fator de carga                                      | 100 %                                |
| Condutor                | Resistência do condutor                             | 90,68 $\mu\Omega/\text{ft}$ @20°C    |
|                         | Temperatura do condutor                             | 90 °C                                |
|                         | Diâmetro externo do condutor                        | 0,4724 in                            |
|                         | Comprimento do condutor                             | 1 m                                  |
|                         | Área transversal do condutor                        | 25 x 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> |
| Blindagem Semicondutora | Diâmetro externo da blindagem semicondutora interna | n                                    |
|                         | Diâmetro externo da blindagem semicondutora externa | n                                    |
| Isolante                | Resistividade do isolante                           | 350 °C cm/W                          |
|                         | Diâmetro externo do isolante                        | 1,1024 in                            |
|                         | Tensão no dielétrico                                | 20,78 kV                             |
|                         | SIC do isolante                                     | 2,5                                  |
|                         | Fator de dissipação                                 | 0,23 %                               |
| Blindagem Metálica      | Diâmetro externo da blindagem metálica              | n                                    |
|                         | Número de fios de cobre da blindagem metálica       | n                                    |
|                         | Diâmetro do fio de cobre da blindagem metálica      | n                                    |
|                         | Resistividade do fio de cobre da blindagem metálica | 1,7241 x 10 <sup>-8</sup> Ohm cm/m   |
|                         | Fator lay   | n                                    |
| Jaqueta                 | Resistividade da jaqueta                            | 600 °C cm/W                          |
|                         | Diâmetro externo da jaqueta                         | 2,1719 in                            |
|                         | Espessura da jaqueta                                | 0,1181 in                            |
| Duto                    | Resistividade do duto                               | 350 °C cm/W                          |
|                         | Temperatura dentro do duto                          | 40 °C                                |
|                         | Diâmetro externo do duto                            | 4,33 in                              |
|                         | Diâmetro interno do duto                            | 3,74 in                              |
|                         | Espessura do duto                                   | 0,315 in                             |
| Solo                    | Resistividade do solo                               | 100 °C cm/W                          |
|                         | Temperatura do solo                                 | 20 °C                                |
|                         | Profundidade da linha com relação a superfície      | 27,56 in                             |

Fonte: Autoria própria (2017)



## APÊNDICE E – TABELA COM PARÂMETROS DA LINHA DE 36 kV (IEC)

Tabela 14 – Parâmetros da linha de 36 kV (3 cabos em um duto) – IEC 60287

|                         | Parâmetro   | IEC                                  |
|-------------------------|---|--------------------------------------|
| Cabo                    | Diâmetro externo total do cabo isolado              | 64 mm                                |
|                         | Distância entre cabos                               | 30 mm                                |
|                         | Fator de carga                                      | 100 %                                |
| Condutor                | Resistência do condutor                             | 297,52 $\mu\Omega/m$ @20°C           |
|                         | Temperatura do condutor                             | 90 °C                                |
|                         | Diâmetro externo do condutor                        | 12 mm                                |
|                         | Comprimento do condutor                             | 1 m                                  |
|                         | Área transversal do condutor                        | 25 x 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> |
| Blindagem Semicondutora | Diâmetro externo da blindagem semicondutora interna | n                                    |
|                         | Diâmetro externo da blindagem semicondutora externa | n                                    |
| Isolante                | Resistividade do isolante                           | 3,5 K m/W                            |
|                         | Diâmetro externo do isolante                        | 28 mm                                |
|                         | Tensão no dielétrico                                | 20,78 kV                             |
|                         | SIC do isolante                                     | 2,5                                  |
|                         | Fator de dissipação                                 | 0,23 %                               |
| Blindagem Metálica      | Diâmetro externo da blindagem metálica              | n                                    |
|                         | Número de fios de cobre da blindagem metálica       | n                                    |
|                         | Diâmetro do fio de cobre da blindagem metálica      | n                                    |
|                         | Resistividade do fio de cobre da blindagem metálica | 1,7241 x 10 <sup>-8</sup> Ohm x m    |
|                         | Fator lay   | n                                    |
| Jaqueta                 | Resistividade da jaqueta                            | 6 K m/W                              |
|                         | Diâmetro externo da jaqueta                         | 55,168 mm                            |
|                         | Espessura da jaqueta                                | 3 mm                                 |
| Duto                    | Resistividade do duto                               | 3,5 K m/W                            |
|                         | Temperatura dentro do duto                          | 40 °C                                |
|                         | Diâmetro externo do duto                            | 110 mm                               |
|                         | Diâmetro interno do duto                            | 95 mm                                |
|                         | Espessura do duto                                   | 8 mm                                 |
| Solo                    | Resistividade do solo                               | 1 K m/W                              |
|                         | Temperatura do solo                                 | 20 °C                                |
|                         | Profundidade da linha com relação a superfície      | 700 mm                               |

Fonte: Autoria própria (2017)



## ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CABO DA LINHA DE 36 kV - I

Figura 20 – Especificações técnicas do cabo da linha de 36 kV - I

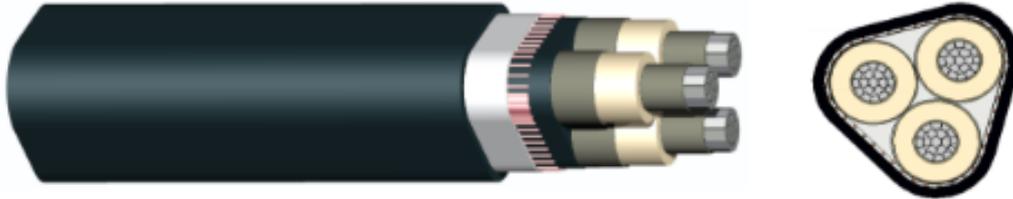
**REKA**  
C A B L E S

TECHNICAL SPECIFICATION

22.9.2017 LaVa

**AHXCMK-WTC AXKJ-F 24 kV**  
12/20(24) kV

Page 1/2



### Three-core Aluminium Power Cable

#### CONSTRUCTION

**CENELEC HD 620 S2:2010 Part 10 Sections F and M**

|                     |   |
|---------------------|---|
| Phase conductor:    | Longitudinally water sealed, circular, stranded and compacted aluminium conductor, EN 60228 class 2   |
| Conductor screen:   | Semi-conducting cross-linked polyethylene (XLPE) with nominal thickness of 0,5 mm   |
| Insulation:         | Extruded cross-linked polyethylene (XLPE) with nominal thickness of 5,5 mm  |
| Insulation screen:  | Semi-conducting cross-linked polyethylene (XLPE) with nominal thickness of 0,5 mm   |
|                     | Three insulated conductors are laid up together. A lapped layer of semi-conducting tape as a binder   |
| Metallic screen:    | Layer of helically wound copper wires with a copper equalization tape. Lapped plastic tapes applied over the metallic screen  |
| Oversheath:         | Extruded black lead free polyvinyl chloride (PVC) compound  |
| Rated voltage:      | $U_0/U (U_m) = 12/20 (24) \text{ kV}$   |
| Temperature limits: | Max. conductor temperature 90 °C<br>Max. short circuit temperature 250 °C (duration not exceeding 5 sec.)<br><br>Min. temperature during handling and installation -15 °C<br>Min. temperature during transport -40 °C |
| Fire performance:   | F4C   |
| Applications:       | Cable is intended for fixed installations indoors and outdoors, on cable ladders, in conduits and cable ducts. Cable may also be buried in soil. Not for submarine or similar applications.                           |



## ANEXO B – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CABO DA LINHA DE 36 kV - II

Figura 21 – Especificações técnicas do cabo da linha de 36 kV - II

|  | 3x50/16 | 3x70/16 | 3x95/16 | 3x120/25 | 3x150/25 | 3x185/25 | 3x240/25 |
|--|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Technical information</b>   |         |         |         |          |          |          |          |
| <b>Product code</b>  | 1187502 | 1187503 | 1187564 | 1187505  | 1187506  | 1187567  | 1187568  |
| Nominal diameter of phase conductor (mm)   | 8,1     | 9,5     | 11,1    | 12,8     | 14,2     | 16,2     | 18,0     |
| Nominal thickness of insulation (mm)   | 5,5     | 5,5     | 5,5     | 5,5      | 5,5      | 5,5      | 5,5      |
| Nominal diameter over insulation without insulation screen (mm)  | 19,3    | 20,7    | 22,3    | 23,8     | 25,3     | 26,8     | 29,2     |
| Nominal thickness of sheath (mm)   | 2,7     | 2,8     | 3,0     | 3,1      | 3,2      | 3,3      | 3,5      |
| Nominal diameter of complete cable (mm)*   | 53      | 56      | 60      | 64       | 68       | 73       | 76       |
| Nominal weight of cable (kg/km)*   | 2000    | 2300    | 2700    | 3150     | 3600     | 4200     | 4800     |
| <b>Maximum forces during installation when pulling by</b>  |         |         |         |          |          |          |          |
| - Pulling-eye (kN)   | 7,5     | 10,5    | 14,3    | 18,0     | 20,0     | 20,0     | 20,0     |
| - Pulling-stocking (kN)  | 2,3     | 3,2     | 4,3     | 5,4      | 6,8      | 8,3      | 8,5      |
| <b>Minimum bending radii</b>   |         |         |         |          |          |          |          |
| - During handling and installation (m)   | 0,64    | 0,67    | 0,72    | 0,77     | 0,82     | 0,89     | 0,91     |
| - In case of only one single smooth bending to final position (m)  | 0,45    | 0,47    | 0,50    | 0,54     | 0,57     | 0,62     | 0,64     |
| <b>Max. d.c-resistance at 20 °C</b>  |         |         |         |          |          |          |          |
| - Phase conductor (Ω/km)   | 0,641   | 0,443   | 0,320   | 0,253    | 0,206    | 0,164    | 0,125    |
| - Metallic screen (Ω/km)   | 1,2     | 1,2     | 1,2     | 0,8      | 0,8      | 0,8      | 0,8      |
| <b>AC-resistance of phase conductor, screen circuit closed<sup>1</sup></b>                                     |         |         |         |          |          |          |          |
| - Conductor temperature 65 °C (Ω/km)   | 0,76    | 0,52    | 0,38    | 0,30     | 0,24     | 0,19     | 0,15     |
| - Conductor temperature 90 °C (Ω/km)   | 0,82    | 0,57    | 0,41    | 0,32     | 0,26     | 0,21     | 0,16     |
| Inductance per phase (mH/km)*  | 0,37    | 0,35    | 0,34    | 0,32     | 0,31     | 0,30     | 0,29     |
| Capacitance (µF/km)*   | 0,17    | 0,18    | 0,20    | 0,22     | 0,24     | 0,26     | 0,29     |
| Charging current (A/km)*   | 0,6     | 0,7     | 0,7     | 0,8      | 0,9      | 0,9      | 1,1      |
| Earth fault current (A/km)*  | 1,8     | 2,0     | 2,2     | 2,4      | 2,6      | 2,8      | 3,2      |
| <b>Current ratings in trefoil (according to CENELEC HD 620 S2 2010 Part 10F) when screen circuit is closed</b> |         |         |         |          |          |          |          |
| - Cables in air (25 °C), conductor temperature 90 °C (A)   | 160     | 190     | 230     | 265      | 305      | 340      | 400      |
| - Cables in ground (15 °C and 1,0 KmW) installation depth 0,7 m, conductor temperature 65 °C (A)               | 145     | 175     | 205     | 230      | 260      | 290      | 340      |
| <b>Maximum 1 second thermal short-circuit current</b>  |         |         |         |          |          |          |          |
| - Phase conductor (temp. at the beginning 90 °C, final temperature 250 °C) (kA)                                | 4,7     | 6,6     | 8,9     | 11,3     | 14,1     | 17,4     | 22,6     |
| - Metallic screen (temp. at the beginning 80 °C, final temperature 250 °C) (kA)                                | 2,4     | 2,4     | 2,4     | 3,7      | 3,7      | 3,7      | 3,7      |

- 1) Calculated value, for guidance only
- 2) Calculated value for guidance, with operational voltage U = 20 kV