



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Lindnaldo Maurício da Cunha Filho

**Cálculo da Ampacidade em Linhas de Transmissão:
Estudo de Caso**

Campina Grande
Julho de 2023

Lindnaldo Maurício da Cunha Filho

**Cálculo da Ampacidade em Linhas de Transmissão:
Estudo de Caso**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a obtenção
de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Professor Damásio Fernandes Júnior, D.Sc
(Membro Titular Externo)

Professor Talvanes Meneses Oliveira, D.Sc
(Orientador)

Campina Grande
Julho de 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois a Sua presença me sustenta e a Sua graça me basta.

À minha família, em especial à minha mãe, Kátia Lanucia; ao meu homônimo pai, Lindnaldo Maurício; e meu irmão, José Wellington que nunca deixaram e nem deixarão de me apoiar e sempre dispuseram todos os incentivos possíveis e impossíveis para chegar aonde quer que quisesse estar.

À minha amiga Laisy Araújo pela consideração e companhia adorável, que mesmo do campus Cuité, dispensou algumas noites de sono para me ajudar.

À instituição da UFCG, ao corpo discente, cujo papel fundamental foi primordial para dividir a jornada com todos os colegas de curso e não desanimar, que também foi como conheci o meu melhor amigo, Paulo Rodrigo Veras, que teve um apoio fundamental dentro e fora da vida acadêmica; ao corpo docente, pelos conhecimentos adquiridos, em especial ao meu orientador Professor Talvanes Meneses, pela paciência e esclarecimentos prestados durante uma pesquisa que envolvia princípios que são abordados não somente componentes curriculares do curso de graduação em engenharia elétrica.

RESUMO

Com a crescente demanda no setor energético nacional, fazem-se necessários estudos específicos para determinação da ampacidade de linhas de transmissão e distribuição. Este trabalho visa apresentar uma contribuição significativa para recapacitação de LTs, ou mesmo a prorrogação destas obras; discutindo o modelo determinístico para o cálculo da ampacidade pelo de condutores elétricos para linhas aéreas, fazendo uso de um estudo de caso de uma LT local. O modelo aborda os principais mecanismos de ganho e dissipação de calor em condutores: efeito joule; radiação solar; convecção; e irradiação, levando em consideração os parâmetros geográficos e meteorológicos.

Palavras-chave: Ampacidade, Linha de Transmissão, temperatura do condutor

ABSTRACT

With the growing demand in the national energy sector, specific studies are needed to determine the ampacity of transmission and distribution lines. This paper aims to present a significant contribution to the recapacitation of TLs, or even the prorogation of these works, discussing the deterministic model for the calculation of ampacity of electrical conductors for overhead lines, using a case study of a local TL. The model approaches the main mechanisms of heat gain and dissipation in conductors: joule effect; solar radiation; convection; and irradiation, taking into account the geographical and meteorological parameters.

Keywords: Ampacity, Transmission Line, Conductor Temperature

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|-----------|
| Figura 2.a Gráfico da Curva de Carga do Aparelho LCN RL-2 | 11 |
| Figura 5.a Definição de Vão e Flecha | 13 |
| Figura 5.2.a Balanço Térmico em um Condutor | 15 |
| Figura 6.1.a Trecho Avaliado | 23 |
| Figura 6.1.1.a Clima da Cidade de Lucena | 24 |
| Figura 6.2.1.a Gráfico da Quantidade de Calor por Efeito Joule dos cabos Poppy, Raven e Reforçado..... | 29 |
| Figura 6.2.1.b Variação da Resistência Elétrica nos Condutores | 30 |
| Figura 6.2.1.c Gráfico da Quantidade de Calor Ganho por Efeito Joule do Condutor T-Poppy | 31 |
| Figura 6.2.1.d Gráfico da Quantidade de Calor Ganho por Efeito Joule do Condutor T-Raven | 31 |
| Figura 6.2.2.a Gráfico da Quantidade de Calor Ganho por Radiação Solar versus Irradiância..... | 32 |
| Figura 6.2.3.a Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Irradiação do Cabo versus Temperatura Ambiente..... | 33 |
| Figura 6.2.3.b Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Irradiação do Cabo versus Temperatura Ambiente..... | 34 |
| Figura 6.2.4.a Gráfico da Variação do Número de Reynolds versus Velocidade do Vento | 35 |
| Figura 6.2.4.b Gráfico da Variação do Número de Reynolds versus Velocidade do Vento | 36 |
| Figura 6.2.4.c Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Convecção de ventos amenos dos cabos de diâmetro 9,36 mm..... | 37 |
| Figura 6.2.4.d Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Convecção de ventos amenos dos cabos de diâmetro 10,11 mm..... | 37 |
| Figura 6.2.4.e Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Convecção Forçada de ventos fortes dos cabos de diâmetro 9,36 mm | 38 |
| Figura 6.2.4.f Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Convecção Forçada de ventos fortes dos cabos de diâmetro 10,11 mm..... | 38 |
| Figura 6.2.4.g Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Convecção Natural dos Cabos de Diâmetro 9,36 mm..... | 39 |
| Figura 6.2.4.h Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Convecção Natural dos Cabos de Diâmetro 10,11 mm..... | 39 |
| Figura 6.3.a Gráfico da Ampacidade do Condutor Poppy | 41 |
| Figura 6.3.b Gráfico da Ampacidade dos Condutores Reforçado com Liga de Alumínio e T-Poppy | 42 |
| Figura 6.3.c Gráfico da Ampacidade do Condutor Raven | 42 |
| Figura 6.3.d Gráfico da Ampacidade do Condutor T-Raven..... | 43 |

ÍNDICE DE QUADROS E TABELAS

| | |
|--|----|
| Quadro 6.1.1.a Temperaturas médias mensais (1991-2021) | 24 |
| Quadro 6.1.2.a Irradiância Solar Média Mensal | 25 |
| Quadro 6.1.3.a Velocidade do Vento | 26 |
| Quadro 6.1.4.a Balanço Térmico nos Possíveis Condutores | 27 |
| Tabela 6.3.a Ampacidade com Dados dos Fabricantes | 40 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|--|
| CA | Cabo de Alumínio |
| CAA | Cabo de Alumínio com Alma de Aço |
| CALA | Cabo de Alumínio Reforçado com Liga de Alumínio |
| CIGRÉ | <i>Conseil International des Grands Réseaux Electriques</i> |
| CRESESB | Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito |
| EPE | Empresa de Pesquisa de Pesquisa Enrgética |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| LT | Linha de Transmissão |
| NBR | Norma Técnica Brasileira |
| T-CA | Cabo de Alumínio Termorresistente |
| T-CAA | Cabo de Alumínio com Alma de Aço Termorresistente |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 10 |
| 2. MOTIVAÇÃO | 10 |
| 3. OBJETIVO..... | 11 |
| 3.1. Objetivos Gerais | 11 |
| 3.2. Objetivos Específicos | 12 |
| 4. METODOLOGIA | 12 |
| 5. AMPACIDADE E CONCEITOS RELACIONADOS | 13 |
| 5.1. Condições Para o Cálculo da Ampacidade..... | 14 |
| 5.2. Cálculo da Quantidade de Calor..... | 15 |
| 5.2.1. Efeito joule..... | 16 |
| 5.2.2. Radiação solar..... | 17 |
| 5.2.3. Irradiação do cabo..... | 18 |
| 5.2.4. Convecção..... | 20 |
| 5.3. Ampacidade..... | 22 |
| 6. ESTUDO DE CASO DA LT | 22 |
| 6.1. Dados Geográficos, Atmosféricos e da Linha | 23 |
| 6.1.1. Temperatura ambiente e outros..... | 23 |
| 6.1.2. Irradiância | 25 |
| 6.1.3. Velocidade dos ventos | 25 |
| 6.1.4. Dados do Condutor | 27 |
| 6.2. Cálculo das Taxas de Quantidades de Calor | 28 |
| 6.2.1. Efeito Joule | 28 |
| 6.2.2. Radiação Solar | 32 |
| 6.2.3. Irradiação do Cabo..... | 33 |
| 6.2.4. Convecção..... | 34 |
| 6.3. Cálculo da Ampacidade..... | 40 |
| 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 43 |
| 7.1 Sugestão de Trabalhos Futuros | 44 |
| REFERÊNCIAS | 45 |
| APÊNDICE | 46 |

1. INTRODUÇÃO

Os investimentos em linhas de transmissão e distribuição têm sido cada vez mais requisitados no país. Do último *Plano Decenal*, emitido pela *EPE* (Empresa de Pesquisa Energética), estes investimentos chegaram a ultrapassar 300%, e, em relação à extensão das linhas, o total ultrapassou 13% do previsto pela empresa.

Para o biênio de 2023/2024 estima-se um investimento previsto de R\$ 50 bi, para cumprir com a expectativa de quadruplicar o escoamento de energia gerada na região Nordeste para Sudeste até 2028.

O crescimento dessas linhas de transmissão e o considerável aumento no seu investimento, atendem à expansão da produção, porém não garantem a segurança elétrica. O sistema elétrico nacional necessita dar garantia ao atendimento da demanda mesmo nos horários de pico. Assim sendo, é necessária uma análise criteriosa do modo em que esses recursos serão alocados não só no sistema de transmissão como também no sistema de distribuição.

No sistema de distribuição, existem as subestações em áreas remotas que são muitas vezes alimentadas por linhas radiais e que estas subestações ou linhas já se encontram muitas vezes no seu limite de operação quanto a demanda de potência nos horários de pico.

2. MOTIVAÇÃO

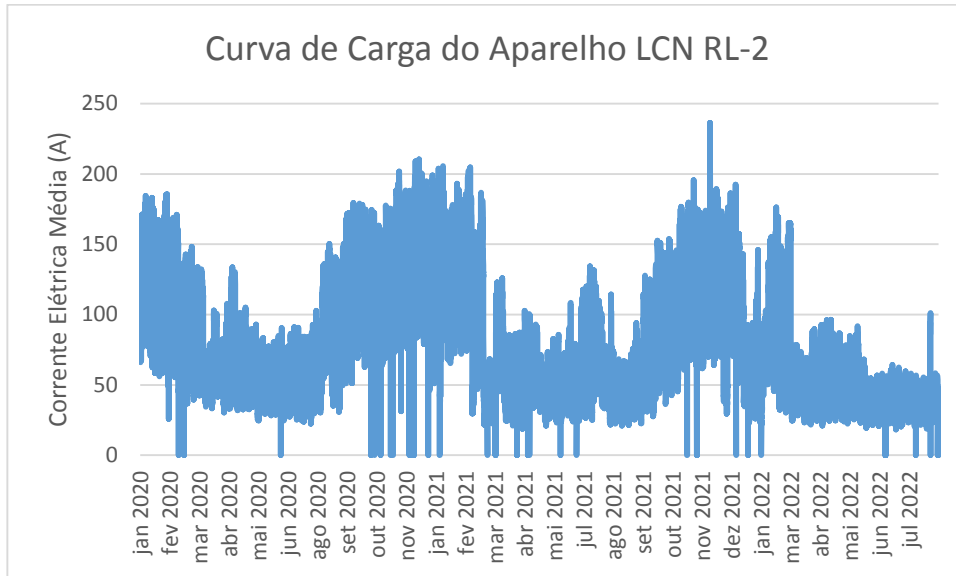
O atual cenário de crescimento da demanda de energia elétrica no Brasil vem tornando propício uma maior inserção de profissionais capacitados a implementar sistemas de transmissão e distribuição eficazes, de menor custo e maior benefício às linhas.

Um dos problemas a serem solucionados é a sobrecarga em linhas de distribuição de média/baixa tensão, especialmente em horário de pico, requerendo um estudo minucioso sobre as metodologias e práticas viáveis para suprir tais demandas de potência. Tais eventos costumam ser muito recorrente em cidades crescentes do país, onde existem LTs projetadas para uma demanda menor do que a atualidade requer.

O aparelho LCN RL-2, lotado na cidade de Lucena, na Paraíba, foi monitorado no biênio 2020/2022. Durante o período, a concessionária Energisa-Paraíba constatou que a linha de transmissão estava próxima da sobrecarga, o que evidentemente implicaria numa repotencialização da mesma para o ano de 2023.

O monitoramento foi feito de hora em hora durante o período de dois anos, a média entre as correntes de fase gerou os dados compilados no gráfico da *figura 2.a*:

Figura 2.a Gráfico da Curva de Carga do Aparelho LCN RL-2



Fonte: Energisa Paraíba

Segundo os responsáveis pelo monitoramento da linha, a corrente máxima do projeto é de 230 A. O gráfico ilustra que em alguns momentos este limite foi ultrapassado, ou esteve muito próximo. Durante todo o biênio, a média das correntes de fase foi de 78,84 A.

A preocupação com os percalços da troca de toda uma linha de transmissão para a população local e profissionais da área foram o norte para que este trabalho analisasse a real necessidade do empreendimento.

3. OBJETIVO

3.1. Objetivos Gerais

Em vista da alegação da concessionária e dos impactos sociais e econômicos da solução proposta pela Energisa-Paraíba, este trabalho visa contribuir com a proposição da necessidade de recapitação desta linha de transmissão, ou mesma a prorrogação destas obras.

3.2. Objetivos Específicos

Executar o cálculo de todos os mecanismos de ganho e perda das taxas quantidades de calor nos possíveis condutores, com a finalidade de chegar ao conhecimento da ampacidade do modelo utilizado, em relação às condições ambientais locais. Deste modo, tornando possível tratar as possíveis soluções do problema.

4. METODOLOGIA

A *capacidade* de uma linha de transmissão está associada à sua potência instalada. O projeto original de uma LT deve ter a condição de suprir a demanda exigida pela linha.

Outro importante fator refere-se a *disponibilidade* de uma linha de transmissão, que está relacionada ao tempo que a linha está em operação normal.

Da relação *capacidade x disponibilidade*, está a *capabilidade*, que se refere à energia suprida pela linha de transmissão.

No entanto, diversos fatores como crescimento populacional, aumento do setor habitacional, instalação de novas indústrias, empresas e outros tantos empreendimentos podem exigir um aumento da *capacidade* de uma LT, ou de sua *disponibilidade*, por consequência da *capabilidade*.

Tais solicitações do sistema podem resultar na readequação do projeto original de LTs, caso não seja viável uma troca total da linha. O IEEE define alguns conceitos que devem ser observados, dos quais cita-se:

- *Requalificação*, ou *up grade* — aumento da disponibilidade da linha;
- *Regradação* — elevação das características nominais da linha;
- *Restauração*, ou *refurbishment* — recuperação da capabilidade da linha, ou melhoria; e
- *Repotencialização*, ou *up rate*: elevação da capacidade da linha.

O termo *recapacitação* abrange todos os conceitos mencionados anteriormente, sendo definido como qualquer readequação de restauração das condições físicas, ou quaisquer alterações do projeto original de uma LT.

Vale salientar que, em qualquer projeto que se solicite aumento da capacidade da linha de transmissão, estas readequações se traduzem no aumento da capacidade térmica do projeto. É necessário que seja calculada a corrente limite a ser conduzida na linha de transmissão para

que não haja um rompimento do cabo, ocasionado pelo calor da passagem dos elétrons pelo condutor. Tal estado é chamado de *temperatura máxima de operação*.

A determinação desta corrente limite é realizada com o cálculo de *ampacidade*.

O principal critério para avaliar a repotencialização de uma linha de transmissão é, indiscutivelmente, o estudo da ampacidade dos condutores utilizados nesta. Uma tarefa complexa e multidisciplinar, pois envolve tanto a área elétrica, como mecânica e termodinâmica.

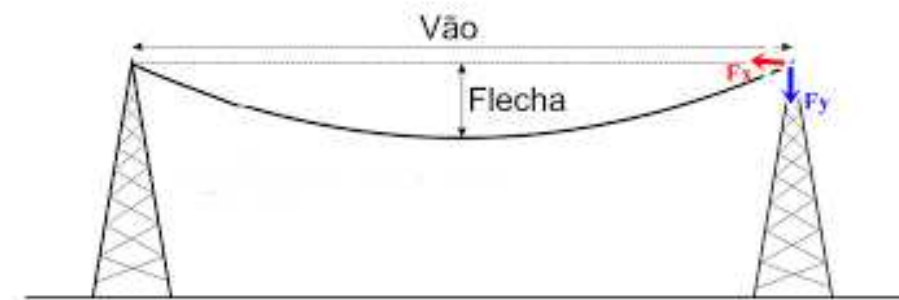
Assim, organizando-se deste modo:

- I. Revisão dos métodos para avaliar capacidade de corrente, através de dissertações de mestrado;
- II. Estudo das normas competentes ao problema;
- III. Cálculo das taxas de quantidade de calor ganho e perdido na linha de transmissão;
- IV. Cálculo da ampacidade da linha de transmissão através de modelagem matemática assistida por *software*; e
- V. Aplicação dos dados e estudos às normas.

5. AMPACIDADE E CONCEITOS RELACIONADOS

Define-se por *vão*, a distância entre dois sustentos de um condutor; e por *flecha*, a distância entre o ponto médio do vão ao condutor.

Figura 5.a Definição de Vão e Flecha



Fonte: CONEM 2012, 1036 (editada).

Com a passagem de corrente na linha haverá a dilatação térmica relativa ao material do condutor devido ao seu aquecimento. Tal fenômeno fará com que as forças mecânicas que atuam sobre o cabo, aumentem a distância da flecha e reduzam a distância de segurança em comparação ao solo.

É chamado de vão-crítico, quando é atingida distância máxima de segurança da flecha; e de *ampacidade*, a corrente máxima que percorre o condutor nesta condição.

5.1. Condições Para o Cálculo da Ampacidade

Ainda no século XIX, *Faraday* foi um dos primeiros pesquisadores a conduzir estudos sobre o aquecimento de condutores ocasionados por correntes elétricas. Não menos importante, o francês *Legrand*, também percebeu a importância da avaliação térmica de condutores nas linhas de transmissão em 1945.

Ao longo dos anos, todas pesquisas acerca do tema foram importantes para a formulação da NBR 5422, que definem os parâmetros ambientais ideais para as hipóteses de cálculo mecânico dos cabos.

- temperatura ambiente média, sem vento;
- temperatura ambiente máxima, sem vento;
- temperatura ambiente mínima, sem vento; e
- temperatura ambiente coincidente ocorrendo a velocidade de vento do projeto.

A temperatura ambiente, radiação solar e velocidade do vento, são fatores importantes para a determinação da temperatura máxima do condutor e de correntes possíveis de ocorrerem simultaneamente, devido a fatores meteorológicos, e/ou curvas de carga estimada. Dito isto, as condições de corrente máxima devem ser verificadas com as condições ambientais correspondentes.

Entretanto, muitas linhas do Brasil ainda não monitoram dados relacionados às exigências da norma. A falta destes dados faz com que a NBR 5422 recomende a utilização simultânea de valores conservadores como:

- temperatura ambiente máxima média;
- radiação solar igual 1000 W/m^2 ;
- velocidade do vento $\leq 1 \text{ m/s}$; e
- temperatura máxima média do ar.

Sobre estas condições, para o modelo determinístico, é necessário saber a corrente máxima cuja transferência de calor não atinja a integridade do cabo, ou que exceda a flecha máxima do projeto e chegue ao vão crítico. A dilatação dos cabos pode acarretar na diminuição da altura com relação ao solo.

Para o modelo estatístico, exige-se o monitoramento de todas as outras variáveis como velocidade do vento, irradiância, temperatura do cabo e temperatura ambiente, cujos dados não foram disponibilizados e não são de fácil acesso. Dada estas condições, este modelo não foi considerado para os estudos deste trabalho.

5.2. Cálculo da Quantidade de Calor

De forma analítica, a determinação da temperatura de um condutor não depende apenas do ganho de calor por efeito joule, ocasionado pela corrente elétrica que passa por este, mas também de fatores ambientais. Fatores como o calor irradiado do cabo para o ambiente, velocidade e direção do vento, e irradiação solar também influenciam na temperatura do condutor.

Figura 5.2.a Balanço Térmico em um Condutor



Fonte: Castilho, 2010

Em regime permanente, pode se considerar que o ganho de calor devido ao efeito joule e radiação solar, atingem o equilíbrio com a perda de calor devido a irradiação do condutor e a convecção.

Deste modo, correspondendo com a equação (5.1):

$$Q_j + Q_s = Q_{irr} + Q_c \quad (5.1)$$

Onde:

Q_j , corresponde à taxa de ganho de calor por efeito joule em W/m;

Q_s , corresponde à taxa de ganho de calor por radiação solar em W/m;

Q_{irr} , corresponde à taxa de perda de calor por irradiação do cabo em W/m; e

Q_c , corresponde à taxa de perda de calor por convecção em W/m.

Em resumo, condução, radiação, convecção e radiação são as três formas de transferência de calor.

5.2.1. Efeito joule

Baseado na interação entre partículas, a condução de calor ocorre quando as moléculas com mais energia colidem com as menos energéticas. Na presença de um gradiente de temperatura, haverá uma taxa de variação térmica da área de maior temperatura para de menor.

Quando os elétrons percorrem o condutor, estas partículas causam uma transferência energética. Assim, percorrido por uma corrente elétrica alternada, ou contínua, o cabo haverá de ganhar calor devido às perdas resistivas.

A potência dissipada em um condutor pode ser descrita pela equação (5.2):

$$Q_j = R'(T)I^2, \quad (5.2)$$

sabendo-se que:

Q_j , corresponde à taxa de ganho de calor por efeito joule em W/m;

I , corresponde à corrente elétrica que percorre o condutor em ampères (A), e

$R'(T)$, corresponde à resistência elétrica do condutor por unidade de comprimento em ohms por metro (Ω/m), em função da temperatura do mesmo.

$R'(T)$ pode ser obtido pela equação (3) (IEEE, Std, 2012):

$$R'(T) = \left[\frac{R'(75) - R'(20)}{75 - 20} \right] (T - 20) + R'(20), \quad (5.3)$$

em que:

$R'(T)$, corresponde à resistência elétrica do condutor por unidade de comprimento em ohms por metro (Ω/m), em função da temperatura do mesmo;

$R'(75)$, corresponde à resistência elétrica do condutor por unidade de comprimento em ohms por metro (Ω/m), em $75\text{ }^\circ\text{C}$;

$R'(20)$, corresponde à resistência elétrica do condutor por unidade de comprimento em ohms por metro (Ω/m), em $20\text{ }^\circ\text{C}$; e

T , corresponde à temperatura do condutor em graus celsius ($^\circ\text{C}$).

Vale salientar que, o monitoramento das temperaturas dos condutores, apesar de muito importante, ainda é uma prática pouco utilizada e/ou considerada no país. Tendo em vista as situações em que o monitoramento não é feito, para cálculos conservadores, é levada em consideração a resistência $R'(T)$ fornecida pelo fabricante, que geralmente é dada para a condição aproximada de $20\text{ }^\circ\text{C}$.

5.2.2. Radiação solar

A transferência de calor por radiação, diferente do mecanismo anterior, não necessita de um meio material para sua ocorrência. Transmitida por meio de ondas eletromagnéticas, a energia térmica pode ser emitidas e absorvidas pela superfície dos materiais. Quando possui temperatura diferente do zero absoluto, qualquer pode emitir radiação, e, como consequência, estão sujeitos à incidência de radiação de corpos próximos.

Outra forma de ganho de calor do cabo é devido ao efeito exercido pela radiação solar. A incidência de radiação solar do meio representa também uma mecanismo de adição de energia térmica em linhas de transmissão em geral.

Esta parcela de contribuição é mensurada a partir da capacidade de absorção de calor do condutor, uma propriedade física e que depende não somente de propriedades características do material em si, mas de seu estado de degradação.

Para o ganho de calor devido ao fluxo de radiação solar instantâneo sobre uma superfície (irradiância), tanto o IEEE, como CIGRÉ, se baseiam no modelo da equação (5.4),

$$Q_s = \alpha * I_s * D_0, \quad (5.4)$$

onde:

Q_s , corresponde à taxa de ganho de calor por radiação solar em W/m ;

α , corresponde à absorvidade do material, que é adimensional;

I_s , corresponde à irradiância solar (W/m^2); e

D_0 , corresponde ao diâmetro nominal do cabo (m).

A constante de absorvidade não é facilmente mensurável, mesmo em laboratórios, pois até mesmo a cor do material pode contribuir para absorção de calor. Os valores de absorvidade, podem variar de 0,2 para condutores polidos e/ou novos, até 0,9 para condutores em ambientes industriais após um ano. Tendo em vista a dificuldade de obtenção de um número exato, é recomendado que o valor não seja inferior a 0,8 (CIGRÉ, 2014).

Apesar de raramente ser monitorada nas linhas, a intensidade de radiação solar pode ser obtida por meio de dados fornecidos por institutos de pesquisa climáticos. Destes, pode-se extrair médias anuais mensais de irradiação solar em $kWh/m^2.dia$, que pode ser convertido para unidade de irradiância por meio da relação da equação (5.5):

$$1 \frac{kW}{m^2} = 24 \frac{kWh}{m^2} \quad (5.5)$$

5.2.3. Irradiação do cabo

Uma outra forma de interação da radiação como mecanismo das relações térmicas do material com o ambiente é a irradiação. Através da taxa de emissão de calor por área, o seu *poder emissivo*, um corpo pode irradiar energia térmica, dependendo apenas de suas características naturais e também da temperatura em que se encontra.

Considerando um corpo negro, um objeto hipotético que absorve toda a radiação eletromagnética que nele incide, o poder emissivo pode ser expressa pela *Lei de Stephen-Boltzman* expressa pela equação (5.6):

$$E_{cn} = \sigma T_c^4 \quad (5.6)$$

onde:

E_{cn} , corresponde ao poder emissivo de um corpo negro;

σ , à constante de Stephen-Boltzman equivalente a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$; e

T_c , corresponde à temperatura do corpo.

É necessário salientar que todo corpo possui uma emissividade específica, que pode ser observado seu poder de emissão ao de um corpo negro. Esta relação pode ser vista na equação (5.7):

$$e = \frac{E}{E_{cn}} \quad (5.7)$$

em que:

e , corresponde à constante de emissividade do material, adimensional;

E_{cn} , corresponde ao poder emissivo de um corpo negro;

E , corresponde ao poder emissivo de um corpo qualquer.

Pode-se dizer, então, que

$$E = eE_{cn}$$

Inserindo a equação (5) em (6), obtemos a equação (5.8)

$$E = e * \sigma T_c^4 \quad (5.8)$$

Assim, é possível observar que o poder emissivo de um corpo é tão maior quanto o crescimento da sua temperatura.

Pode-se dizer ainda que a potência irradiada por um corpo, ou a quantidade de calor emitida por um corpo é uma relação do seu poder emissivo e a sua área, expressa por:

$$E = \frac{Q_{irr}}{A}$$

Deste modo, é possível dizer que a potência irradiada é um produto do poder emissivo pela área.

$$Q_{irr} = E * A = e * \sigma T_c * A$$

Caso haja diferença de temperatura entre a temperatura do corpo e a do ambiente, o poder emissivo será expresso por

$$Q_{irr} = e * \sigma * A * (T_A^4 - T_c^4)$$

Para condutores, tanto os modelos de House e Tuttle, como Cigré e IEEE utilizando a equação (5.9):

$$Q_{irr} = e * \sigma * \pi D_0 * (T_A^4 - T_c^4) \quad (5.9)$$

onde:

Q_{irr} , corresponde à perda de calor por irradiação do cabo em W/m;

σ , a constante de Stephen-Boltzman equivalente a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$,

e , corresponde à constante de emissividade do material, adimensional;

D_0 , corresponde ao diâmetro da bitola em metros; e

T_c , corresponde à temperatura do corpo.

Q_{irr} pode ser chamado também de *potência irradiada líquida*, ou *fluxo líquido de energia*.

Considerando depara-se com as seguintes situações:

- $Q_{irr} > 0$. quando $T_A > T_c$, quando a potência irradiada pelo corpo é menor do que a potência com que este absorve energia, há absorção de energia térmica do ambiente.
- $Q_{irr} < 0$. quando $T_A < T_c$, quando a potência irradiada pelo corpo é maior do que a potência com que este absorve energia, há emissão de energia térmica para o ambiente.
- $Q_{irr} = 0$. quando $T_A = T_c$, quando a potência irradiada pelo corpo é igual à potência com que este absorve energia, há equilíbrio térmico com o ambiente.

5.2.4. Convecção

A convecção é o mecanismo com maior parcela de contribuição de dissipação de calor na estabilização de equilíbrio térmico, pois as linhas áreas estão expostas à ação atmosférica.

Quando a temperatura superficial de um corpo qualquer aquece o ar que o entorna, provoca a diminuição da densidade deste, que acaba cedendo espaço para o ar frio e mais denso. A recorrência deste efeito causa perdas de calor sucessivas e cíclicas, chamadas de curvas de convecção.

O modelo do IEEE, faz o uso de três modelos equacionais para o cálculo da perda de calor por convecção.

Para convecção natural, a perda de calor por convecção pode ser expressa por

$$Q_c = 3,645 \sqrt{\rho_r} D_0^{0,75} (T_c - T_A)^{1,25}, \quad (5.10)$$

de modo que:

T_c , corresponde à temperatura do corpo (especificamente a temperatura superficial do cabo) em graus célsius;

T_A , corresponde à temperatura do ambiente em graus célsius;

ρ_r , corresponde à densidade relativa do ar; e

D_0 , corresponde ao diâmetro da bitola em metros.

Para convecção forçada, a perda de calor por convecção pode ser expressa pelas seguintes equações:

$$Qc = K_a(1,01 + 1,35 * Re^{0,52})K_f(T_c - T_A); \quad (5.11)$$

$$Qc = K_a * 0,754 * Re^{0,6} * K_f * (T_c - T_A); \quad (5.12)$$

de modo que

Re , corresponde ao Número de Reynolds (adimensional);

K_a , corresponde ao multiplicador de Kang (adimensional);

K_f , corresponde à condutividade térmica do ar $0,03 \text{ W/m}^\circ\text{C}$;

T_c , corresponde à temperatura do corpo (especificamente a temperatura superficial do cabo) em graus célsius; e

T_A , corresponde à temperatura do ambiente em graus célsius.

Na ocorrência de ventos de baixa velocidade recomenda-se o uso da equação (5.11). Quando se tem ambientes ventos de alta velocidade, é recomendado o uso da equação (5.12). As recomendações são usar o maior valor encontrada nas três equações (IEEE Std, 2012).

As equações para perda de calor por convecção forçada dependem ambas de parâmetros como o número adimensional de *Reynolds* (Re) e o multiplicador adimensional de *Kang* (K_a).

O número de Reynolds é expresso por

$$Re = \frac{\rho_f V D_0}{\mu_f} \quad (5.13)$$

considerando que:

ρ_f , corresponde à densidade do ar $1,03 \text{ kg/m}^3$;

V , corresponde à velocidade do vento (m/s);

D_0 , corresponde ao diâmetro da bitola em metros; e

μ_f , corresponde à viscosidade dinâmica do ar 18.10^{-6} Pa.s .

O multiplicador de Kang pode ser expresso por

$$K_a = 1,194 - \cos(\phi) + 1,94 \cos(2\phi) + 0,368 \sin(\phi) \quad (5.14)$$

sabendo-se que ϕ , corresponde ao ângulo de incidência do vento sobre o condutor.

5.3. Ampacidade

Expressos os modelos matemáticos para o cálculo das quantidades de calor ganho e dissipado, tornamos à equação para as condições do equilíbrio térmico (5.1):

$$Q_j + Q_s = Q_{irr} + Q_c.$$

Sabendo que a quantidade de calor ganho por efeito joule pode ser expressa por (5.2)

$$Q_j = R'(T)I^2,$$

inserindo (2.2) em (2.1):

$$R'(T)I^2 + Q_s = Q_{irr} + Q_c$$

Isolando a corrente elétrica obtemos a expressão para corrente elétrica correspondente ao equilíbrio térmico do condutor, a ampacidade

$$I = \sqrt{\frac{Q_{irr} + Q_c - Q_s}{R'(T)}} \quad (5.15)$$

em que:

I , corresponde à ampacidade em A;

$R'(T)$, corresponde à resistência elétrica do condutor por unidade de comprimento em ohms por metro (Ω/m), em função da temperatura do mesmo.

Q_j , corresponde à taxa de ganho de calor por efeito joule em W/m;

Q_s , corresponde à taxa de ganho de calor por radiação solar em W/m;

Q_{irr} , corresponde à taxa de perda de calor por irradiação do cabo em W/m; e

Q_c , corresponde à taxa de perda de calor por convecção em W/m.

6. ESTUDO DE CASO DA LT

Durante o biênio 2020/2022, a *Energisa Paraíba* monitorou as correntes elétricas de fase do aparelho *LCN RL-2*, que parte da subestação de Lucena, verificando os valores de correntes como subsídio a decisão de repotencialização da linha. A tensão da LT em questão é de 13,8 kV e os condutores utilizados são do 1/0 no padrão americano AWG.

Os dados obtidos no monitoramento da linha foram compartilhados para efeito de estudos a serem realizados durante a construção do projeto de engenharia elétrica, Trabalho de Conclusão de Curso, componente curricular obrigatório para cumprir a carga horária mínima à

conclusão do curso da Engenharia Elétrica da UFCG. A partir dos dados fornecidos, verificou-se que a corrente máxima projetada é 230 A, evidenciando momentos em que a corrente ultrapassava os limites estabelecidos para a linha.

6.1. Dados Geográficos, Atmosféricos e da Linha

A linha de transmissão em questão parte da subestação da cidade de Lucena, Paraíba, localizada nas coordenadas 6.94S; 34.91W. O trecho segue uma distância de 4060,39 metros (aproximadamente quatro quilômetros), na direção da estrada PB-025.

Figura 6.1.a Trecho Avaliado



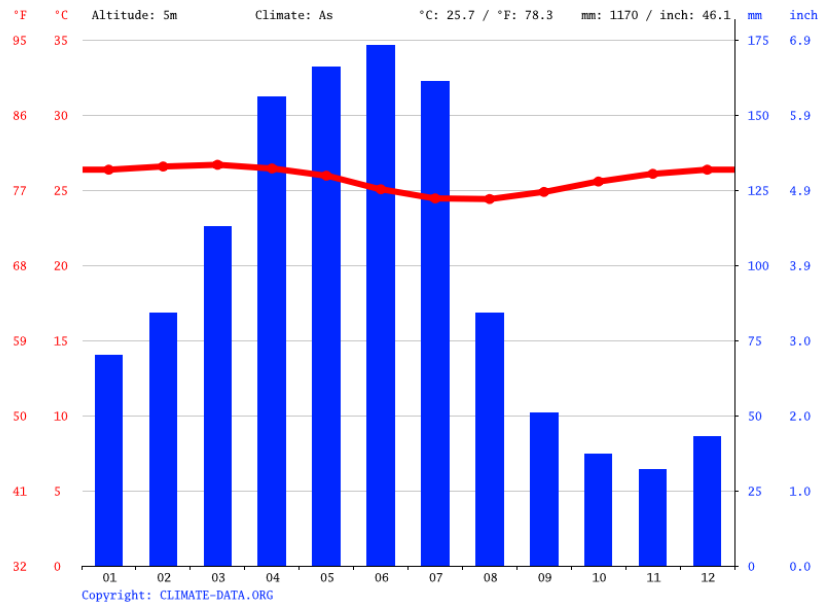
Fonte: Google Earth

6.1.1. Temperatura ambiente e outros

A cidade de Lucena tem um clima tropical. Na região, curiosamente há muito mais pluviosidade no verão que no inverno. Tem uma temperatura média de 25.7 °C e 1170 mm é o valor da pluviosidade média anual. Por estar localizada numa zona equatorial, existe a dificuldade da categorização das estações do ano.

O gráfico ilustrado na *figura 6.1.1.a*, identifica os dados relevantes referentes aos índices climáticos da região, referente a pluviosidade e temperatura no mês, num período de um ano.

Figura 6.1.1.a Clima da Cidade de Lucena



Fonte: *climate-data.org*

Um relevante indicador para este trabalho é a temperatura ambiente. Com o objetivo de ter essas significativas variáveis, foi construída no *quadro 6.1.1.a*:

Quadro 6.1.1.a Temperaturas médias mensais (1991-2021)

| | T MIN (°C) | T MED (°C) | T MAX (°C) | T MIN K | T MED K | T MAX K |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| JAN | 25 | 26,4 | 28 | 298,15 | 299,55 | 301,15 |
| FEV | 25,1 | 26,6 | 28,2 | 298,25 | 299,75 | 301,35 |
| MAR | 25,2 | 26,7 | 28,3 | 298,35 | 299,85 | 301,45 |
| ABR | 25 | 26,5 | 28,1 | 298,15 | 299,65 | 301,25 |
| MAI | 24,5 | 26 | 27,6 | 297,65 | 299,15 | 300,75 |
| JUN | 23,7 | 25,1 | 26,7 | 296,85 | 298,25 | 299,85 |
| JUL | 23,1 | 24,4 | 26,1 | 296,25 | 297,55 | 299,25 |
| AGO | 22,9 | 24,4 | 26,1 | 296,05 | 297,55 | 299,25 |
| SET | 24,2 | 24,9 | 26,6 | 297,35 | 298,05 | 299,75 |
| OUT | 24,2 | 25,6 | 27,3 | 297,35 | 298,75 | 300,45 |
| NOV | 24,8 | 26,1 | 27,7 | 297,95 | 299,25 | 300,85 |
| DEZ | 25 | 26,4 | 28 | 298,15 | 299,55 | 301,15 |
| MED | 24,39 | 25,76 | 27,39 | 297,54 | 298,91 | 300,54 |

Fonte: *climate-data.org*

6.1.2. Irradiância

A irradiância não é uma variável monitorada diretamente pelos institutos de pesquisas. Todavia, as médias anuais mensais de irradiação solar ($kWh/m^2.dia$), que pode ser convertido para unidade de irradiância (W/m^2) por meio da relação da equação (2.5).

No *quadro 6.1.2.a* são indicados os valores dos dados e conversões dessas variáveis:

Quadro 6.1.2.a Irradiância Solar Média Mensal

| Mês | ISM (kWh/m^2) | IRSM (W/m^2) |
|-----|-------------------|------------------|
| NOV | 6,24 | 260,00 |
| MAR | 6,12 | 255,00 |
| DEZ | 6,1 | 254,17 |
| OUT | 6,08 | 253,33 |
| FEV | 6,05 | 252,08 |
| JAN | 5,86 | 244,17 |
| SET | 5,77 | 240,42 |
| ABR | 5,46 | 227,50 |
| AGO | 5,33 | 222,08 |
| MAI | 4,88 | 203,33 |
| JUL | 4,5 | 187,50 |
| JUN | 4,41 | 183,75 |

Fonte: <http://www.cresesb.cepel.br/>

6.1.3. Velocidade dos ventos

Outro importante dado que se deve considerar é a velocidade dos ventos. No entanto, as bases de dados encontrados foram menores, com monitoramentos diários reduzidos a período de cinco dias. O *quadro 6.1.3.a* mostra as referências utilizadas para esta variável:

Quadro 6.1.3.a Velocidade do Vento

| Data/Hora | Velocidade (km/h) | Velocidade (m/s) |
|------------------|--------------------------|-------------------------|
| 12/6/23 6:00 | 14,05 | 3,90 |
| 12/6/23 9:00 | 13,93 | 3,87 |
| 12/6/23 12:00 | 23,26 | 6,46 |
| 12/6/23 15:00 | 25,4 | 7,06 |
| 12/6/23 18:00 | 24,23 | 6,73 |
| 12/6/23 21:00 | 18,14 | 5,04 |
| 13/6/23 6:00 | 14,47 | 4,02 |
| 13/6/23 9:00 | 14,46 | 4,02 |
| 13/6/23 12:00 | 23,44 | 6,51 |
| 13/6/23 15:00 | 26,45 | 7,35 |
| 13/6/23 18:00 | 25,09 | 6,97 |
| 13/6/23 21:00 | 16,85 | 4,68 |
| 14/6/23 6:00 | 10,65 | 2,96 |
| 14/6/23 9:00 | 10,7 | 2,97 |
| 14/6/23 12:00 | 17,73 | 4,93 |
| 14/6/23 15:00 | 22,61 | 6,28 |
| 14/6/23 18:00 | 20,29 | 5,64 |
| 14/6/23 21:00 | 15,89 | 4,41 |
| 15/6/23 6:00 | 11,79 | 3,28 |
| 15/6/23 9:00 | 12,74 | 3,54 |
| 15/6/23 12:00 | 19,82 | 5,51 |
| 15/6/23 15:00 | 22,73 | 6,31 |
| 15/6/23 18:00 | 23,92 | 6,64 |
| 15/6/23 21:00 | 17,85 | 4,96 |
| 16/6/23 6:00 | 12,34 | 3,43 |
| 16/6/23 9:00 | 13,42 | 3,73 |
| 16/6/23 12:00 | 20,38 | 5,66 |
| 16/6/23 15:00 | 22,89 | 6,36 |
| 16/6/23 18:00 | 22,9 | 6,36 |
| 16/6/23 21:00 | 15,67 | 4,35 |
| MÉDIA | 18,47 | 5,13 |

Fonte: <https://www.climatempo.com.br/vento/cidade/6082/lucena-pb>

É interessante frisar que a velocidade dos ventos, na região onde existe a linha de transmissão, por ser localizada em uma região costeira e praticamente no nível do mar, é bem maior que os 1m/s recomendados na NBR 5422. Numa condição ideal, seria importante monitorar esta variável, dado que a velocidade dos ventos muda por instante, turno ou época do ano.

6.1.4. Dados do Condutor

Para o padrão 1/0 AWG utilizado na linha, existem cinco diferentes tipos de condutores.

São eles:

- *Poppy*, CA;
- *T-Poppy*, variação termorresistente do anterior (T-CA);
- *Raven*, CAA;
- *T-Raven*, variação termorresistente do anterior (T-CAA); e
- Reforçado com Liga de Alumínio, CALA.

Estes cinco condutores se diferenciam entre si em algumas características, o que pode trazer diferenças significativas, uma vez que os que possuem valores resistências maiores acarretam em maiores quantidades de calor ganha por efeito joule para um mesmo valor de corrente em relação aos outros tipos.

Considerando se ter como única informação o padrão de cabos 1/0 AWG, sem saber fabricante ou tipo, foram considerados os diversos variações. Deste modo, é possível fazer algumas conjecturas com relação aos dados presentes nos catálogos dos fabricantes.

Quadro 6.1.4.a Balanço Térmico nos Possíveis Condutores

| | Resistência Elétrica | | | | | | Capacidade de Corrente | | | |
|------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|
| | Diâmetro | CC 20°C | 75°C | 100°C | 125°C | 150°C | 75°C | 100°C | 125°C | 150°C |
| | m | Ω/m | Ω/m | Ω/m | Ω/m | Ω/m | A | A | A | A |
| Poppy | 0,00936 | 0,000537 | | | | | 278 | | | |
| Raven | 0,01011 | 0,000534 | | | | | 284 | | | |
| Reforçado | 0,00936 | 0,000548 | | | | | 270 | | | |
| T-Poppy | 0,00936 | 0,000548 | 0,000698 | 0,000723 | 0,000777 | 0,000832 | 276 | 328 | 368 | 400 |
| T-Raven | 0,01011 | 0,000545 | 0,000665 | 0,000719 | 0,000773 | 0,000827 | 282,03 | 335,44 | 376,26 | 409,22 |
| Médias | 0,00966 | 0,000542 | 0,000681 | 0,000721 | 0,000775 | 0,000829 | 278,006 | 331,72 | 372,13 | 404,61 |

Fonte: Catálogo Alubar, 2015

Boa parte dos fabricantes não fornecessem os dados de resistência para algumas temperaturas, nem também para correntes alternadas à temperatura de 20 °C. Tais informações são importantes na consideração do efeito pelicular e magnético para a taxa de ganho de calor por efeito joule.

6.2. Cálculo das Taxas de Quantidades de Calor

Os parâmetros ambientais e as características físicas dos diferentes tipos de condutores foram inseridas nas equações vistas no capítulo anterior. Em seguida, se procurou a validação destes modelos matemáticos com auxílio do *software MatLab*.

Os códigos de todas as operações que geraram os gráficos estão contidos na secção de apêndices.

6.2.1. Efeito Joule

A potência dissipada em cada condutor pode calculada pela equação 6.1

$$Q_j = R'(T)I^2, \quad (6.1)$$

Considerando a condição de que uma única variável está sendo monitorada na linha sob estudo, a corrente elétrica nas fases, no período de janeiro de 2020 a agosto de 2022. Os dados estão contidos numa planilha do *Microsoft Excel*. Todavia, por serem muito extensos, e compor uma planilha com um número de linhas muito grande, não serão apresentados em forma de quadro ou tabela neste trabalho.

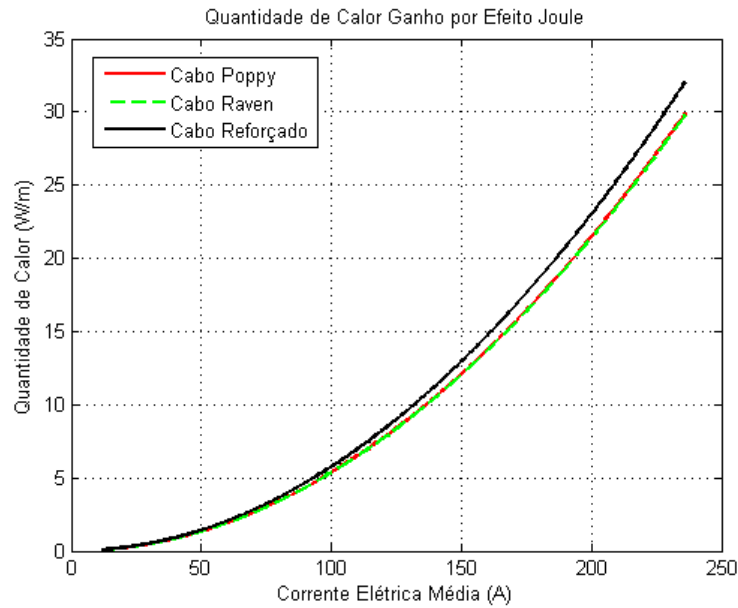
A partir destes dados extraiu-se a corrente mínima média entre as fases de 12 A, bem como a corrente máxima média entre as fases que foi de 236,33 A. Com isto, criou-se um vetor (que pode ser visto na seção de apêndice), variando a corrente entre esses dois valores.

A variação da resistência do condutor com relação à temperatura, presente na equação (5.2), visa condensar os ganhos de calor devido ao efeito magnético. Cabe salientar que todos os cabos apresentam apenas a resistência CC em 20 °C, como observado no *quadro 6.4*. Cabe salientar que, para esta temperatura, é ignorado o ganho de calor por efeito pelicular, devido a densidade maior da corrente alternada.

Ainda se pode verificar que o fabricante não fornece os dados para diferentes temperaturas além dos 20 °C para os condutores Poppy, Raven e Reforçado com Liga de Alumínio.

Na *figura 6.2.1-a* se permite observar o ganho de calor para estes tipos de condutores:

Figura 6.2.1.a Gráfico da *Quantidade de Calor por Efeito Joule dos cabos Poppy, Raven e Reforçado*



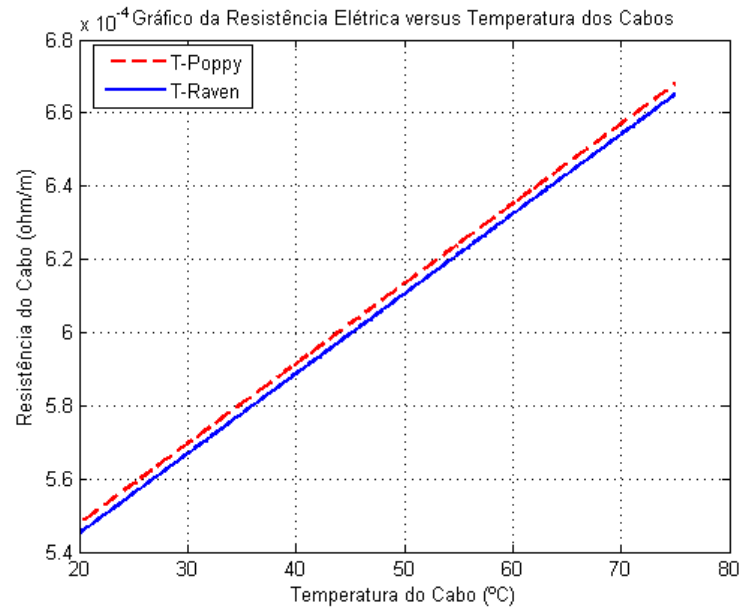
Fonte: próprio autor

Por outro lado, no caso dos tipos de condutores termorresistentes encontram-se dados mais detalhados, os quais são descritos no quadro 6.4. Destes, se pode extrair a linearização descrita na equação (5.3), ainda lembrando que o efeito pelicular é ignorado na temperatura de 20 °C.

$$R'(T) = \left[\frac{R'(75) - R'(20)}{75 - 20} \right] (T - 20) + R'(20),$$

A *figura 6.2.1-b* ilustra a variação da resistência elétrica para os condutores T-Poppy e T-Raven, em função da temperatura do cabo.

Figura 6.2.1.b Variação da Resistência Elétrica nos Condutores

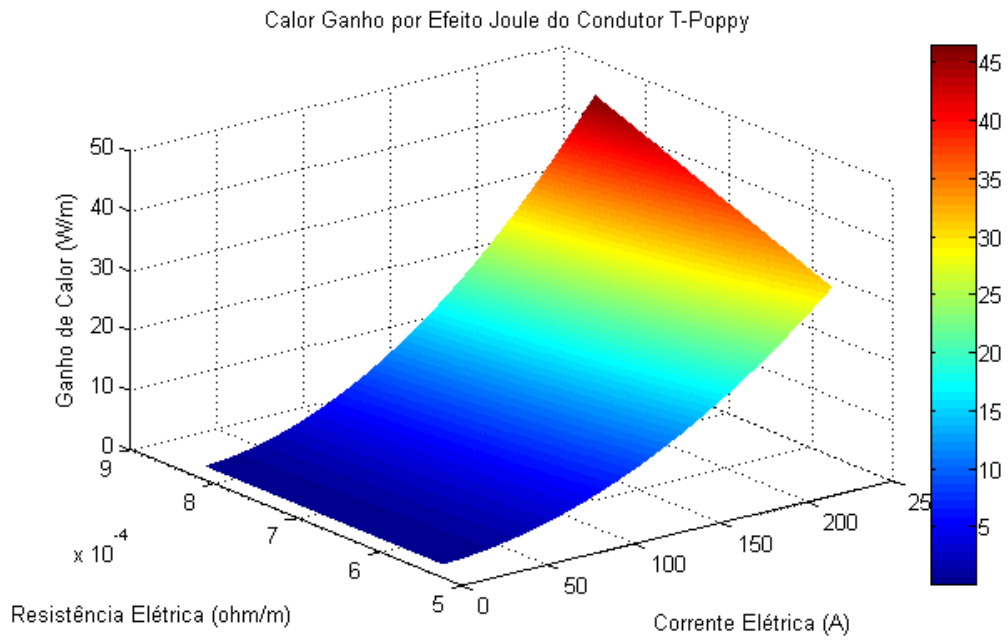


Fonte: próprio autor

A partir dos dados obtidos na linearização de resistência dos condutores, é possível obter os valores de resistência para a temperatura de 150 °C, os quais foram utilizados no vetor do cálculo da quantidade de calor de ambos os tipos de cabos.

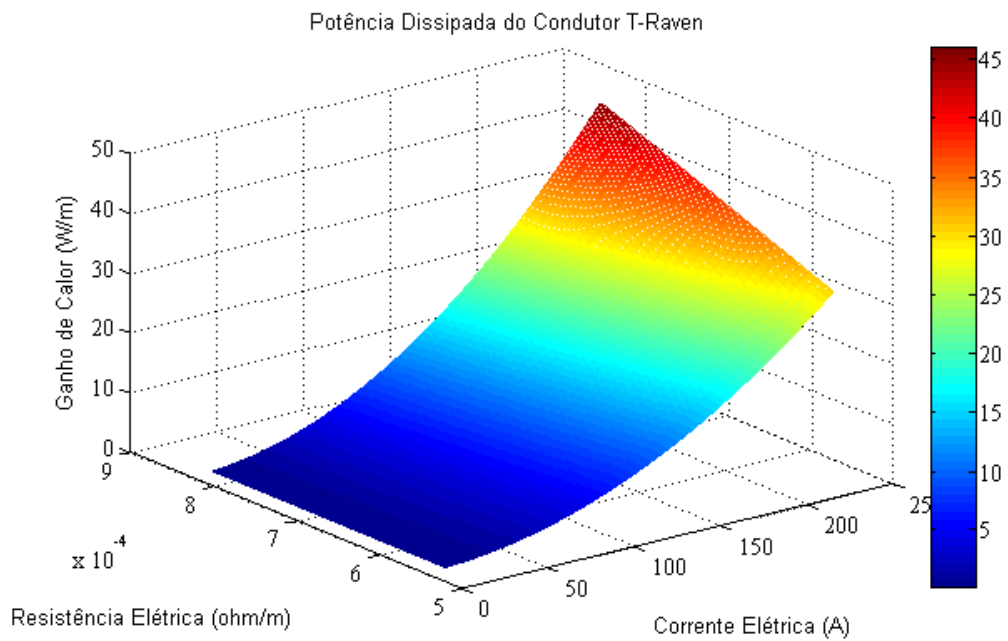
Nas *figuras 6.2.1-c e 6.2.1-d*, são ilustradas as curvas da quantidade de calor para os condutores T-Poppy e T-Raven, respectivamente, variando a resistência elétrica e a corrente elétrica monitorada pela Energisa Paraíba.

Figura 6.2.1.c Gráfico da Quantidade de Calor Ganho por Efeito Joule do Condutor T-Poppy



Fonte: próprio autor

Figura 6.2.1.d Gráfico da Quantidade de Calor Ganho por Efeito Joule do Condutor T-Raven



Fonte: próprio autor

6.2.2. Radiação Solar

Baseando-se no modelo da equação (6.2)

$$Q_s = \alpha * I_s * D_0, \quad (6.2)$$

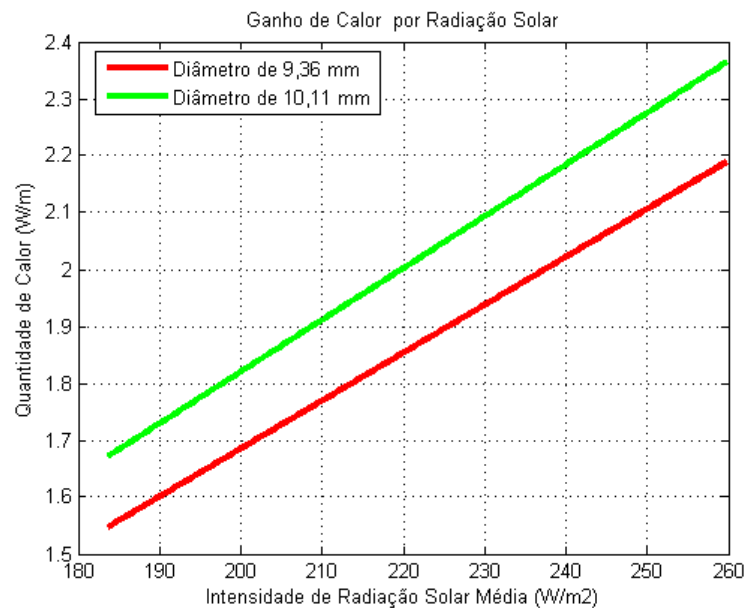
a modelagem do ganho de calor por radiação solar teve o parâmetro da absorvância do alumínio α , estimado em 0,9, valor usado para condutores em ambientes industriais após um ano.

O parâmetro I_s , que corresponde à irradiância solar do meio por unidade de área (W/m^2), teve um vetor gerado a partir do quadro 6.2, fazendo uso dos valores médios mínimos e máximos.

O diâmetro da bitola D_0 , recebeu os valores de 9,36 mm (Poppy, T-Poppy e Reforçado de Alumínio) e 10,11 mm (Raven e T-Raven), valores indicados no quadro 6.4.

A *figura 6.2.2-a* ilustra a curva do ganho de calor do condutor por radiação solar.

Figura 6.2.2.a Gráfico da Quantidade de Calor Ganho por Radiação Solar versus Irradiância



Fonte: próprio autor

6.2.3. Irradiação do Cabo

Para o cálculo deste mecanismo foi utilizado o modelo da equação 6.3, vista na seção anterior:

$$Q_{irr} = e * \sigma * \pi D_0 * (T_A^4 - T_c^4) \quad (6.3)$$

para simplificar os cálculos, a multiplicação das constantes pode aproximar esta equação em:

$$Q_{irr} = 17,8 * e * D_0 * (T_A^4 - T_c^4) \quad (6.4)$$

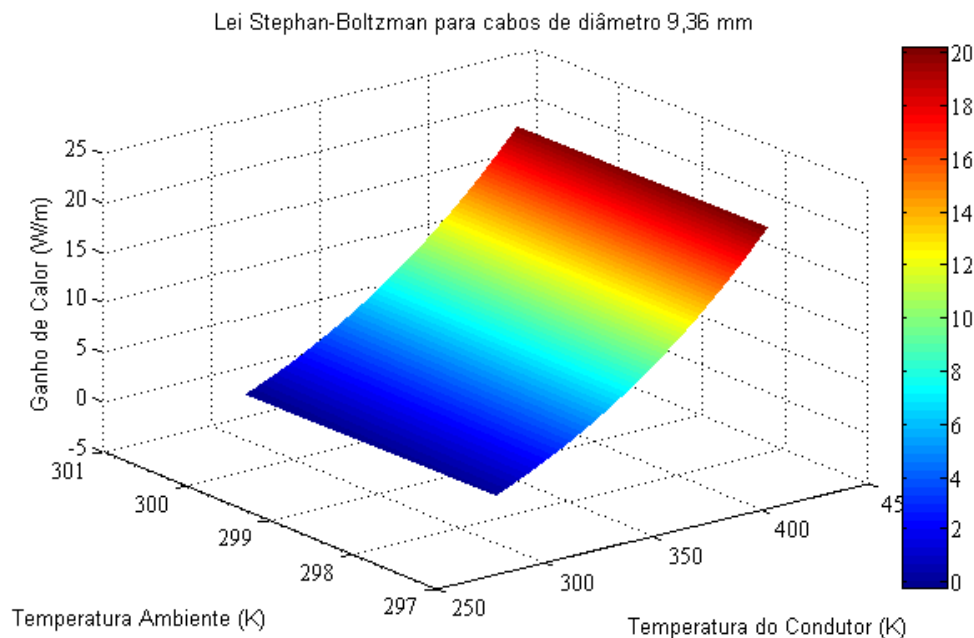
Sendo e , o valor da emissividade do alumínio, recomendado a 0,5 (Cavassini, 2011).

A variável T_A , que remete à temperatura ambiente, foi obtida a partir de um vetor utilizando as temperaturas médias mínimas e máximas locais mensais anuais da quadro 6.1.

A variável T_C , que remete à temperatura do condutor, foi obtida a partir de um vetor variando de dos correspondentes em Kelvin das temperaturas de 20 °C a 150 °C.

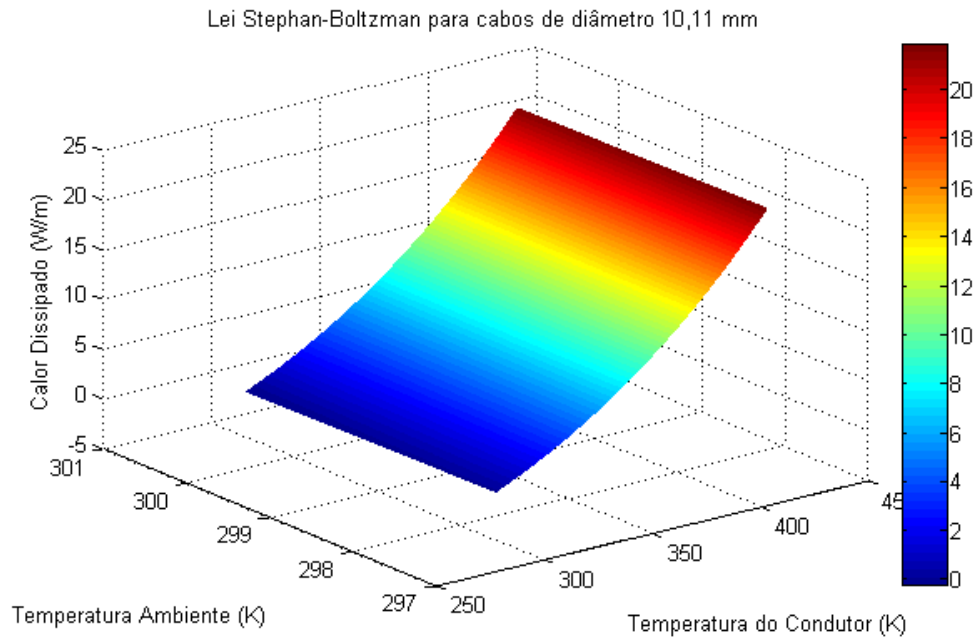
As Figuras 6.2.3-a e 6.2.3-b ilustram a variação de calor irradiado para os cabos de diâmetro 9,36 mm e 10,11 mm, respectivamente:

Figura 6.2.3.a Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Irradiação do Cabo versus Temperatura Ambiente



Fonte: próprio autor

Figura 6.2.3.b Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Irradiação do Cabo versus Temperatura Ambiente



Fonte: próprio autor

6.2.4. Convecção

Para o mecanismo de convecção, foram utilizadas três modelos do IEEE, de convecção normal, forçada para ventos fortes e amenos.

O primeiro modelo para convecção natural é descrito por

$$Q_c = 3,645\sqrt{\rho_r D_0}^{0,75} (T_c - T_A)^{1,25}, \quad (6.5)$$

para construir desta equação para o mecanismo, tivemos de considerar trabalhar com o valor absoluto, pois a raiz $(T_c - T_A)^{1,25}$ gera alguns valores complexos, o que nos faria trabalhar com uma quarta dimensão e esta não pode ser expressa nos gráficos do software, que são em três dimensões.

Para convecção forçada, a perda de calor por este mesmo mecanismo pode ser obtida por

$$Q_c = K_a (1,01 + 1,35 * Re^{0,52}) K_f (T_c - T_A) \quad (6.6)$$

$$Q_c = K_a * 0,754 * Re^{0,6} * K_f * (T_c - T_A) \quad (6.7)$$

Para ocorrência de ventos mais amenos a simulação foi feita a partir da equação (6.6). Para ventos de alta velocidade, a simulação foi feita a partir da equação (6.7).

Considerando que as equações para perda de calor por convecção forçada dependem ambas de parâmetros como o número adimensional de *Reynolds* (Re), o qual é expresso pela equação (6.8)

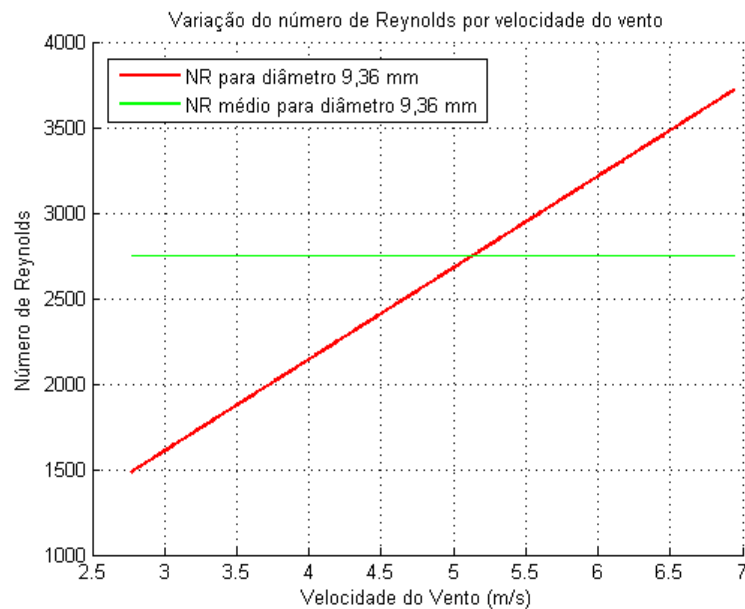
$$Re = \frac{\rho_f V D_0}{\mu_f} \quad (6.8)$$

O cálculo da variação do número de Reynolds foi feito com base num vetor, criado a partir das informações da quadro 6.3. A parte deste extraíram-se as velocidades média máxima e mínima registradas.

Para o cálculo do número de Reynolds médio, levou-se em consideração a velocidade média dos ventos, de 5,13 m/s.

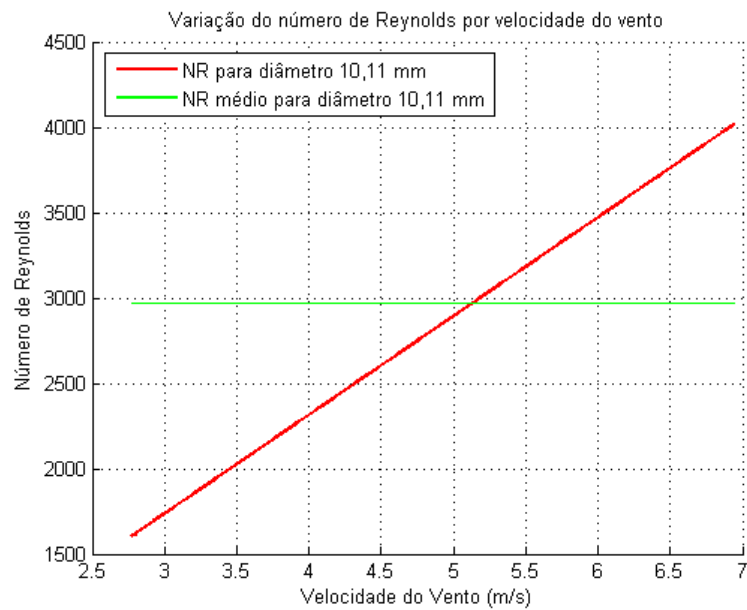
As *figuras 6.2.4-a e 6.2.4-b* ilustram a variação do número de Reynolds para os cabos de diâmetro 9,36 mm e 10,11 mm, respectivamente:

Figura 6.2.4.a Gráfico da Variação do Número de Reynolds versus Velocidade do Vento



Fonte: próprio autor

Figura 6.2.4.b Gráfico da Variação do Número de Reynolds versus Velocidade do Vento



Fonte: próprio autor

Um outro fator presente nas equações de convecção forçada é o multiplicador de da equação 6.9:

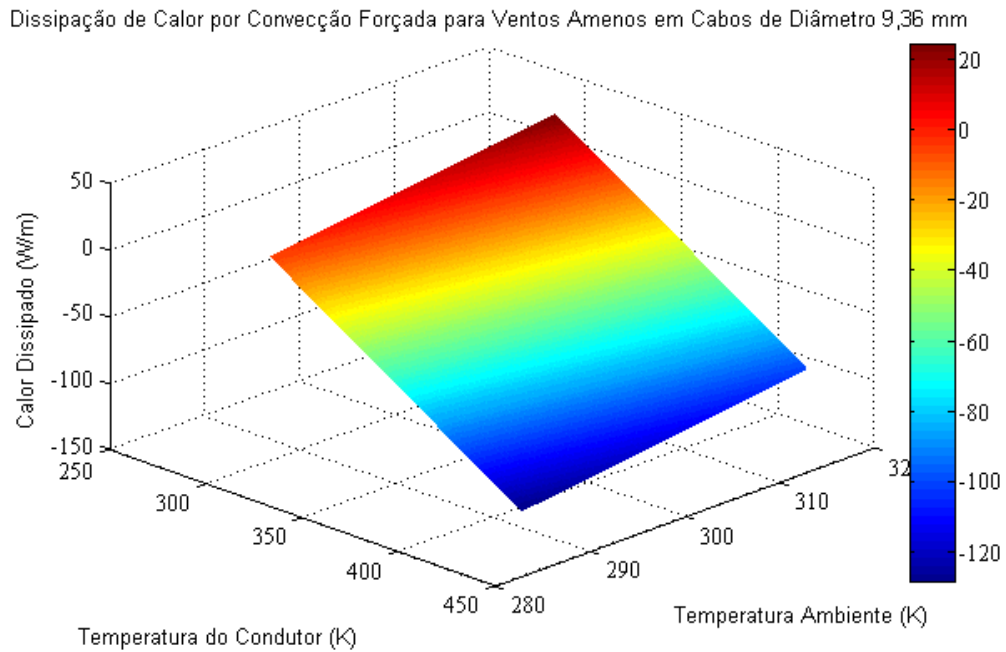
$$K_a = 1,194 - \cos(\phi) + 1,94 \cos(2\phi) + 0,368 \sin(\phi) \quad (6.9)$$

em que ϕ , o ângulo de incidência do vento sobre o condutor, foi considerado 90° para ação perpendicular do vento.

Seguindo neste mesmo princípio, foram obtidas as variáveis T_c e T_A utilizando o critério já abordado anteriormente do mecanismo de irradiação.

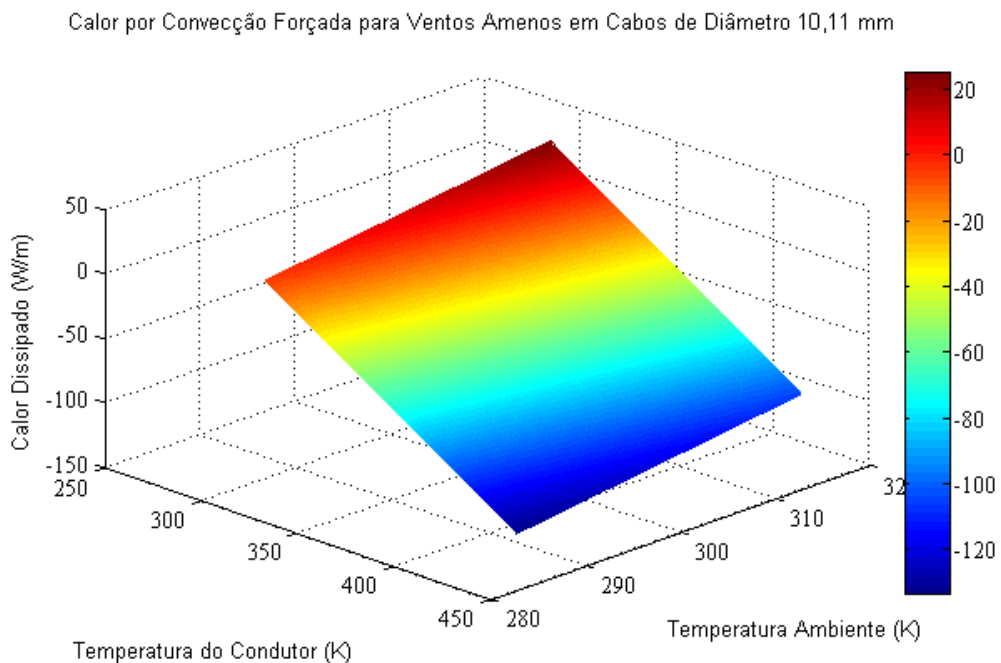
Por fim, o número de Reynolds médio para os casos em tela foram inseridos na equação 5.11, cujas simulações resultaram nas *figura 6.2.4.c* e *figura 6.2.4.d*, da convecção forçada de ventos amenos:

Figura 6.2.4.c Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Convecção de ventos amenos dos cabos de diâmetro 9,36 mm



Fonte: próprio autor

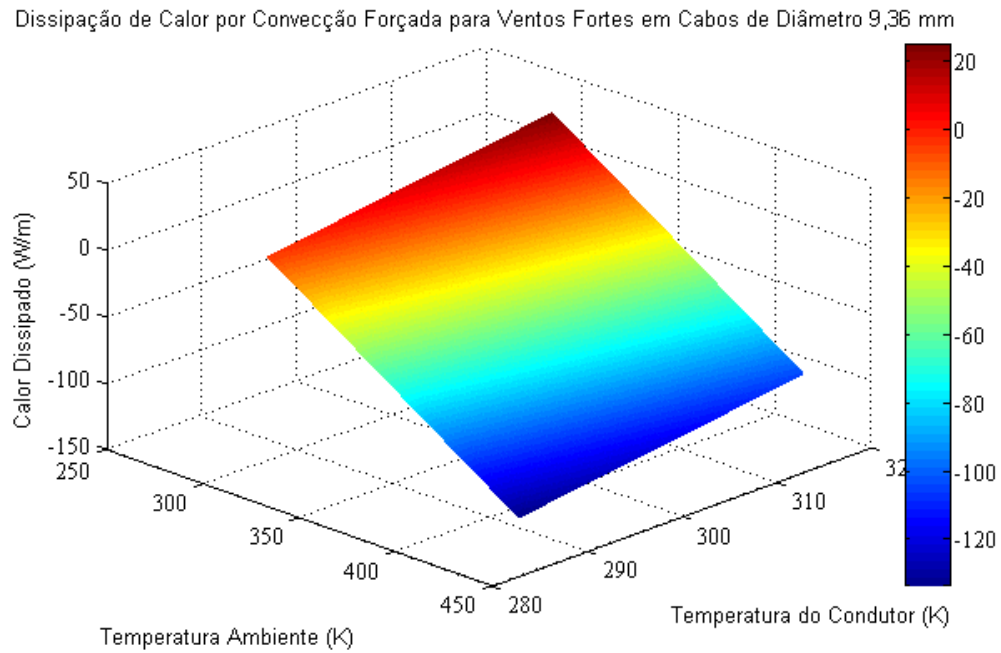
Figura 6.2.4.d Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Convecção de ventos amenos dos cabos de diâmetro 10,11 mm



Fonte: próprio autor

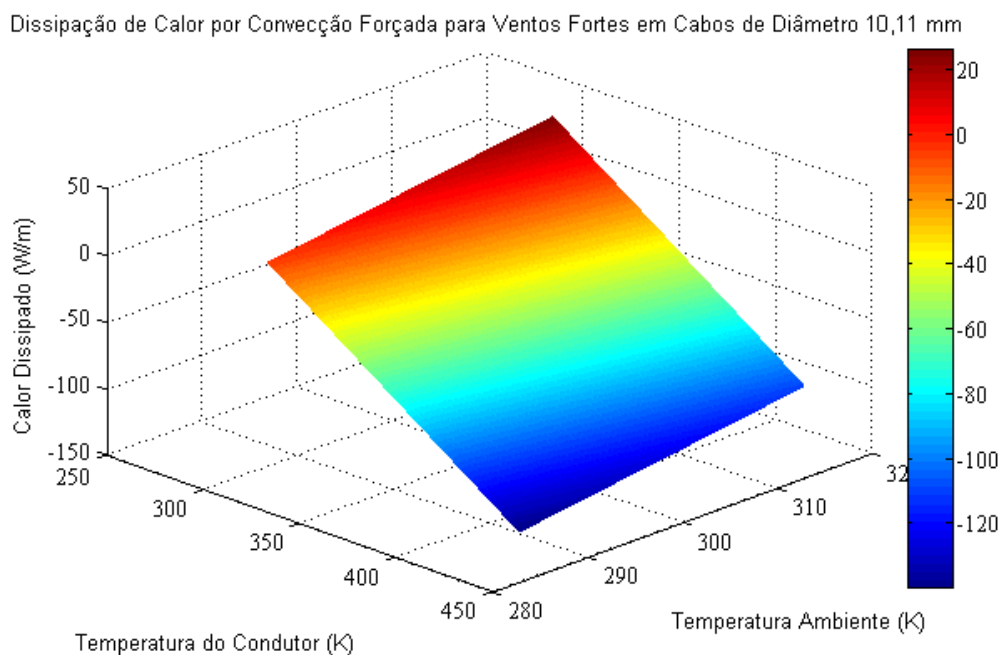
O mesmo procedimento foi adotado quando se aplica à equação 5.12, cujas simulações ilustram as *figuras 6.2.4.e e 6.2.4.f* da convecção forçada de ventos fortes:

Figura 6.2.4.e Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Convecção Forçada de ventos fortes dos cabos de diâmetro 9,36 mm



Fonte: próprio autor

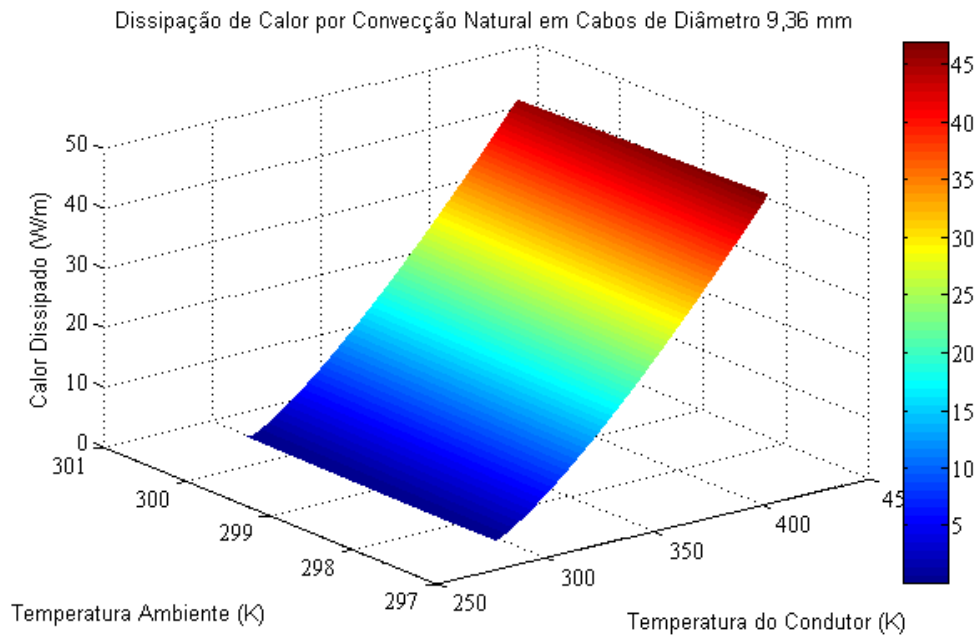
Figura 6.2.4.f Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Convecção Forçada de ventos fortes dos cabos de diâmetro 10,11 mm



Fonte: próprio autor

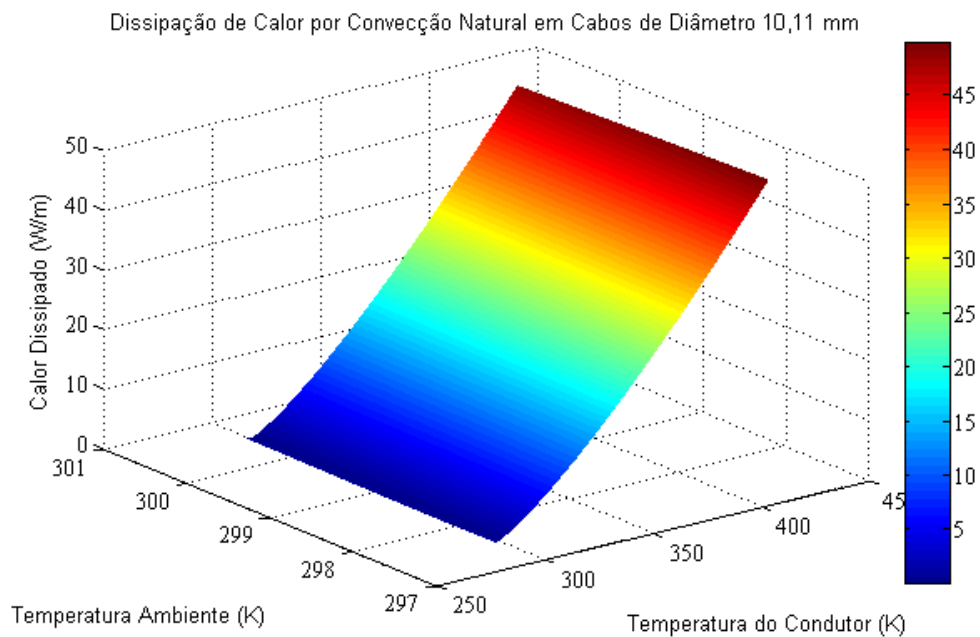
Por outro lado, utilizando a equação (5.10) é possível se traçar os gráficos das *figuras 6.2.4-g e 6.2.4-h* que ilustram a convecção natural.

Figura 6.2.4.g Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Convecção Natural dos Cabos de Diâmetro 9,36 mm



Fonte: próprio autor

Figura 6.2.4.h Gráfico da Quantidade de Calor Dissipado por Convecção Natural dos Cabos de Diâmetro 10,11 mm



Fonte: próprio autor

É recomendado para o cálculo da quantidade de calor dissipado por este mecanismo, se considerar a maior quantidade de calor (IEEE Std, 2012). Pelas simulações feitas, é notável a maior taxa de perda de calor pela modelo natural deste de convecção.

6.3. Cálculo da Ampacidade

A NBR 7271, para cabos de alumínio nu para uso em instalações aéreas, traz um quadro com para vários padrões sobre condições especificadas na sessão 5.1 deste trabalho e presentes na NBR 5422. Todavia, é listado na *tabela 6.3.a*, de modo simplificado, um conjunto de dados para os tipos abordados no estudo em questão:

Tabela 6.3.a Ampacidade com Dados dos Fabricantes

| Tipo | Capacidade de Corrente (A) | | | |
|--------------|----------------------------|-----|-----|-----|
| | Temperatura Ambiente (°C) | | | |
| | 20 | 30 | 35 | 40 |
| Poppy | 275 | 261 | 245 | 228 |
| Raven | 278 | 263 | 247 | 230 |

Fonte: NBR 7271

Para obtenção dos dados da tabela, a temperatura média dos condutores foi de 75 °C e a emissividade média de 0,23, usada para condutores novos e polidos. Percebe-se que quanto menor for a diferença entre a temperatura do condutor e a temperatura ambiente, ou seja, o salto térmico, menor é a ampacidade.

Nesta seção, levou-se em consideração a comparação dos dados calculados pelos fornecedores e cedidos à norma, com relação as condições locais e características nominais do padrão 1/0 AWG, inseridos na equação 5.15, da ampacidade

$$I = \sqrt{\frac{Q_{irr} + Q_c - Q_s}{R'(T)}}$$

Para fins de praticidade, muitos autores desconsideram a quantidade de calor ganha por radiação solar por sua contribuição ser muito pequena no processo. Como visto anteriormente, esse mecanismo não chega a atingir em média 6% da quantidade de calor ganho (que torna-se ainda menor, caso se leve em consideração os efeitos pelicular e do campo magnético), tendo o efeito joule a grande maior parte no processo de ganho de calor.

Além deste fator, este trabalho desconsidera este mecanismo para fins de praticidade. A quantidade de calor ganho por irradiação solar depende da irradiância, o que seria uma quarta variável e impossibilitaria a visualização de um gráfico, uma vez que o *software* utilizado não permite a entrada de mais três dimensões para estes fins.

Este fator também é decisivo para não calcular a ampacidade com a variação da resistência elétrica pela temperatura, uma vez que tornaria a ser mais uma dimensão. Assim, fica ignorado o efeito pelicular e magnético para esta sessão.

Dadas as considerações, a equação da ampacidade pode ser expressa na forma:

$$I = \sqrt{\frac{Q_{irr} + Q_c}{R(20^\circ\text{C})}}, \quad (6.16)$$

sendo:

I , corresponde à ampacidade em A.

Q_{irr} , corresponde à taxa de perda de calor por irradiação do cabo em W/m; e

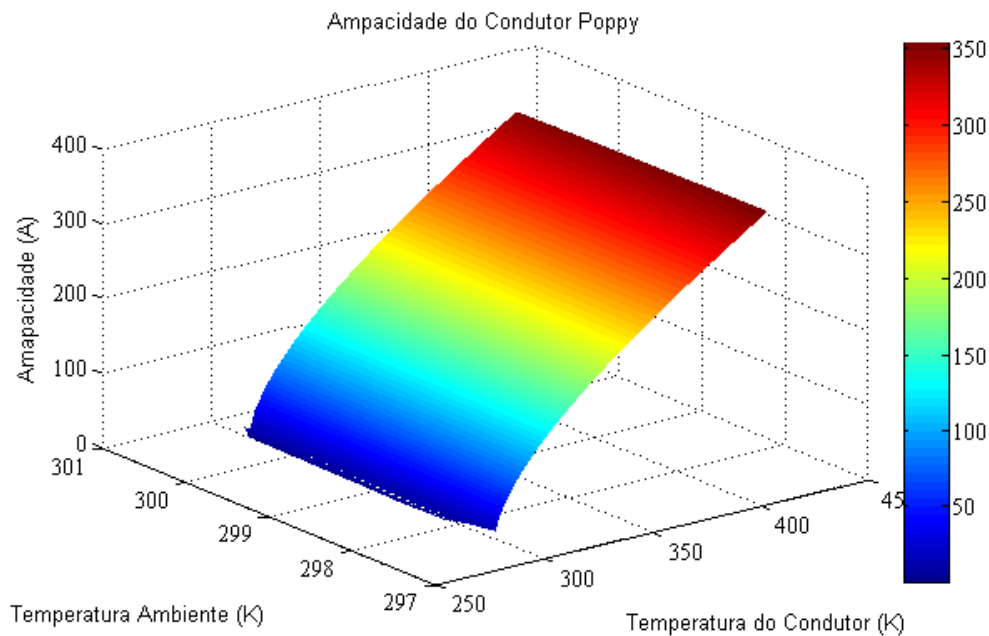
Q_c , corresponde à taxa de perda de calor por convecção em W/m.

$R(20^\circ\text{C})$, a resistência do condutor a 20°C .

Para construção dos gráficos de I , tivemos que trabalhar com os valores absolutos novamente, pois a equação gera valores complexos e isto resultaria em uma quarta dimensão, caindo novamente na problemática das limitações do *software*.

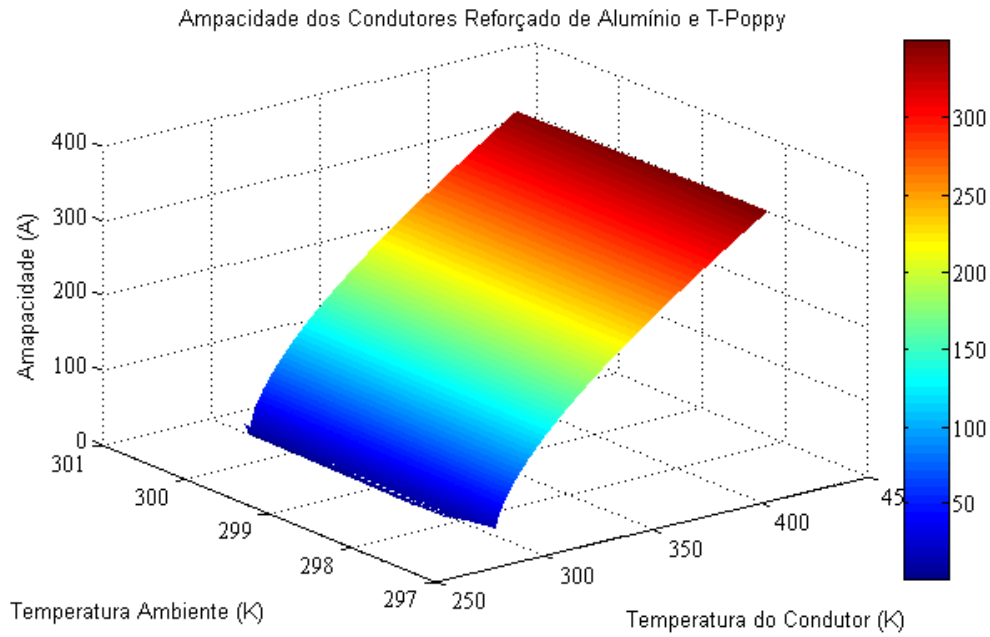
A seguir são ilustrados os resultados da ampacidade obtida para alguns tipos de condutores em função das temperaturas ambiente e dos condutores do padrão 1/0 AW.

Figura 6.3.a Gráfico da Ampacidade do Condutor Poppy



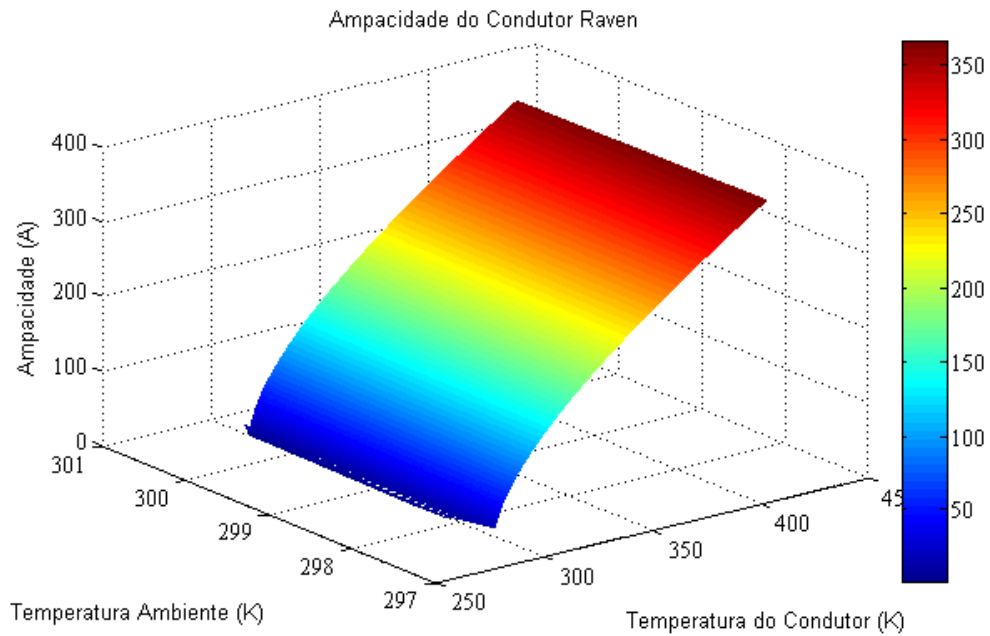
Fonte: próprio autor

Figura 6.3.b Gráfico da Ampacidade dos Condutores Reforçado com Liga de Alumínio e T-Poppy



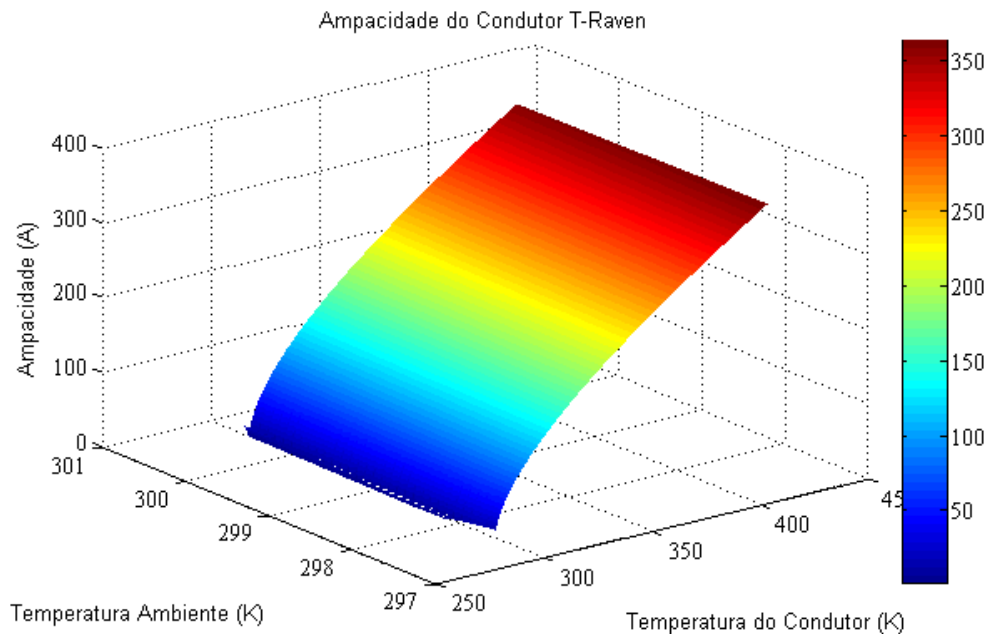
Fonte: próprio autor

Figura 6.3.c Gráfico da Ampacidade do Condutor Raven



Fonte: próprio autor

Figura 6.3.d Gráfico da Ampacidade do Condutor T-Raven



Fonte: próprio autor

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente demanda em linhas de transmissão e distribuição têm gerado grandes investimentos em todo o país. Por isso, com o intuito de aumentar a capacidade de corrente da linha do estudo em questão, foi programada uma recapitação da LT em questão para o ano de 2023.

Entretanto, as simulações feitas com os dados geográficos da localidade e com as condições dos cabos em atividade há anos, apontam que, para a temperatura de 75 °C e 25°C (salto térmico de 50 °C), a ampacidade cai para cerca de 194.4 A, para os cabos de diâmetro 9,36 mm; e 199.8 A para os cabos de diâmetro 10,11 mm, resultados inferiores aos vistos na seção anterior que mostrou a NBR 7271.

Ainda de acordo com as simulações, somente um salto térmico entre aproximadamente 61 °C e 65 °C poderiam fazer com que a ampacidade seja de 230 A. O que significa que, com as condições climáticas consideradas, o cabo teria sua temperatura variando entre aproximadamente 89 °C e 92 °C, o que acarretaria no recozimento dos condutores que não são termorresistentes.

Para se ter uma ideia, a NBR 6524 estabelece em 80 °C a temperatura máxima de operação em regime permanente para fios e cabos de cobre duro e meio duro, com ou sem cobertura protetora para instalações aéreas.

Ao observar a curva de carga apresentada pela concessionária e associar com as simulações de ampacidade ante as condições geográficas onde está situado o aparelho, pode se perceber que a alta demanda nos meses finais e iniciais do ano (verão) podem já estar fazendo a linha operar em sobrecarga há um bom tempo. Deste modo, torna-se necessária a repotencialização da linha através de condutores de maior diâmetro da bitola, ou, tomando a hipótese de que foram usados os cabos de alumínio mais comuns, até mesmo o uso dos termorresistentes de mesmo diâmetro seriam uma solução prática, que são opções de baixo custo e podem operar com temperaturas até 50% maior sem sofrer danos físicos.

7.1 Sugestão de Trabalhos Futuros

- Monitoramento de temperatura de cabos em linhas aéreas;
- Repotencialização versus Instalação de Banco de Baterias: viabilidade de recapitação de linhas aéreas; e
- Efeito skin no cálculo no calor em cabo nu.

REFERÊNCIAS

- ALUBAR ALTEC. **Catálogo de Técnico: Condutores Elétricos de Alumínio**. Bacarena, PA. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cabos de Alumínio nus para Linhas Aéreas**, NBR 7271. 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Fios e cabos de cobre duro e meio duro com ou sem cobertura protetora para instalações aéreas**, NBR 6524. 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica: Normas Recomendadas**, NBR 5422. 1985.
- BERTEL ELÉTRICA. **Catálogo de Técnico: Cabos de Cobre nus**. São Bernardo dos Campos, SP. 2008.
- CAVASSIN, R. S. **Uma Abordagem Multicritérios para Recapitação de Linhas de Transmissão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná. 2011.
- CARVALHO, R. V. **Monitoramento Térmico de Linhas de Transmissão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná. 2017.
- CASTILHO, R. M. **Otimização do Uso da Linha de Transmissão Através do Monitoramento em Tempo Real**. Dissertação – UNICAMP. Campinas. 2010.
- CLIMATE DATA. **Climate Data: Dados Climáticos para Cidades Mundiais**. Disponível em <<https://pt.climate-data.org/>>. Acesso em 21 de junho de 2023.
- CRESESB. CRESESB: **Base de Dados de radiação solar incidente (irradiação solar)**. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid%20=casa_solar/>. Acesso em 21 de junho de 2023.
- OLIVEIRA, C. M. F. **Recapitação de Linhas de Transmissão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2000.
- PEREIRA DA SILVA, A. A. **Modelagem para Repotencialização de Linhas de Transmissão Através da Aplicação de Condutores Especiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco. 2009.
- PODER 360. **Linhas de transmissão superaram projeções em mais de 300%**. Disponível em: <<https://www.poder360.com.br/energia/linhas-de-transmissao-superaram-projecoes-em-mais-de-300/>>. Acesso em 03 de novembro de 2022.

APÊNDICE

A. Código para Simulação da potência dissipada para Cabo AWG (1/0) Poppy, Raven e CALA, possivelmente usados em LT da cidade onde o aparelho está situado, Lucena.

```
%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da potência dissipada para cabo AWG (1/0) usando em LT da cidade
onde o aparelho está situado, Lucena.

I = 12:0.5:236.33; %Vetor média entre as correntes de fase em passos de
0.5.

%Resistências dos respectivos cabos.

Ra = 0.0005369; %Resistência do cabo Poppy em ohm/m.
Rb = 0.0005343; %Resistência do cabo Raven em ohm/m.
Rc = 0.0005750; %Resistência do cabo de Alumínio Reforçado com Liga de
Alumínio Liga em ohm/km.

%Quantidades de calor para os respectivos cabos.

Qa = Ra*I.^2; %Quantidade de calor por efeito Joule para o cabo Poppy em
W/m;
Qb = Rb*I.^2; %Quantidade de calor por efeito Joule para o cabo Raven em
W/m;
Qc = Rc*I.^2; %Quantidade de calor por efeito Joule para o cabo de Alumínio
Reforçado com Liga de Alumínio Liga em W/m;

plot(I,Qa,'r', I,Qb, '--g', I,Qc, 'k', 'LineWidth', 2) %printa a função de
Stephan-Boltzman em função da matriz de temperaturas
title('Quantidade de Calor Ganho por Efeito Joule')
xlabel('Corrente Elétrica Média (A)')
ylabel('Quantidade de Calor (W/m)')
legend('Cabo Poppy', 'Cabo Raven', 'Cabo Reforçado')
grid on
```

B. Código para Simulação da resistência cabo AWG (1/0) usando em LT da cidade onde o aparelho está situado, Lucena.

```
%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da resistência cabo AWG (1/0) usando em LT da cidade onde o
aparelho está situado, Lucena.

Tc = 20:0.1:75; %Vetor temperatura do cabo variando de 20 graus celsius a
150, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.
%Resistências dos respectivos cabos.

Rd20 = 0.0005477; %Resistência do cabo T-Poppy a 20 graus celcius em ohm/m.
Rd75 = 0.0006679; %Resistência do cabo T-Poppy a 75 graus celcius em ohm/m.
Rd = [(Rd75 - Rd20)/(75-20)]*(Tc-20) + Rd20; %Resistência do cabo T-Poppy
em ohm/m.

Rd150 = [(Rd75 - Rd20)/(75-20)]*(150-20) + Rd20
```

```

Re20 = 0.000545; %Resistência do cabo T-Raven a 20 graus celcius em ohm/m.
Re75 = 0.000665; %Resistência do cabo T-Raven a 75 graus celcius em ohm/m.
Re = [(Re75 - Re20)/(75-20)]*(Tc-20) + Re20; %Resistência do cabo T-Raven
em ohm/m.

```

```

Re150 = [(Re75 - Re20)/(75-20)]*(150-20) + Rd20

```

```

plot(Tc,Rd,'--r', Tc,Re,'b', 'LineWidth', 2) %printa a função de Stephan-
Boltzman em função da matriz de temperaturas
title('Gráfico da Resistência Elétrica versus Temperatura dos Cabos')
xlabel('Temperatura do Cabo (°C)')
ylabel('Resistência do Cabo (ohm/m)')
legend('T-Poppy', 'T-Raven')
grid on

```

C. Código para Simulação da potência dissipada para cabo AWG (1/0) T-Poppy

```

%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da potência dissipada para cabo AWG (1/0) T-Poppy.

rd = 0.0005477:0.000001:0.0008318; %Vetor resistência do cabo T-Poppy para
temperatura de 20 a 150 graus celcius em passos de 0.000001 em ohm/m.
i = 12:0.5:236.33; %Vetor média entre as correntes de fase em passos de
0.5.

[I,RD] = meshgrid(i,rd); %Transforma os vetores média entre as correntes de
fase e resistência do cabo T-Poppy para diversas temperaturas em matriz.

Qd = RD.*I.^2; %Quantidade de calor por efeito Joule para o cabo T-Poppy em
W/m;

mesh(I,RD, Qd)
colorbar

```

D. Código para Simulação da potência dissipada para cabo AWG (1/0) T-Raven.

```

%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da potência dissipada para cabo AWG (1/0) T-Raven.

re = 0.000545:0.00001:0.0008313; %Vetor resistência do cabo T-Raven para
temperatura de 20 a 150 graus celcius em passos de 0.001.
i = 12:0.5:236.33; %Vetor média entre as correntes de fase em passos de
0.5.

[I,RE] = meshgrid(i,re); %Transforma os vetores média entre as correntes de
fase e resistência do cabo T-Raven para diversas temperaturas em matriz.

Qe = RE.*I.^2; %Quantidade de calor por efeito Joule para o cabo T-Raven em
W/m;

```

```
mesh(I, RE, Qe)
colorbar
```

E. Código para Simulação da função de ganho de calor por radiação solar cabo AWG (1/0) usando em LT

```
%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da função da taxa ganho de calor por radiação solar cabo AWG
(1/0) usando em LT
%da Energisa, com parâmetros ambientais da cidade onde o aparelho está
situado, Lucena.

D0 = 0.00936; %diâmetro do cabo em metros
D1 = 0.01011; %diâmetro do cabo em metros
A = 0.9; %Absortividade do cabo alumínio
Ir = 183.75:0.5:260.00; %Vetor intensidade de radiação solar média, em W/m2
com passos de 0,5 unidades.

Qs0 = D0*A*Ir; %Quantidade de calor por radiação solar para diâmetro 9,36
mm.
Qs1 = D1*A*Ir; %Quantidade de calor por radiação solar para diâmetro 10,11
mm.

ma0 = max(Qs0); %Mostra o maior valor ganho por radiação solar para
diâmetro 9,36 mm.
mi0 = min(Qs0); %Mostra o menor valor ganho por radiação solar para
diâmetro 9,36 mm.

ma1 = max(Qs1); %Mostra o maior valor ganho por radiação solar para
diâmetro 10,11 mm.
mi1 = min(Qs1); %Mostra o menor valor ganho por radiação solar para
diâmetro 10,11 mm.

plot(Ir,Qs0, 'r', Ir,Qs1, 'g', 'LineWidth', 3) %printa a função de Stephan-
Boltzman em função da matriz de temperaturas
title('Taxa de Ganho de Calor por Radiação Solar')
xlabel('Intensidade de Radiação Solar Média (W/m2)')
ylabel('Quantidade de Calor (W/m)')
legend('Diâmetro de 9,36 mm', 'Diâmetro de 10,11 mm')
grid on
```

F. Código para Simulação da função Lei Stephan-Boltzman para cabos de diâmetro 9,36 mm

```
%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da função Lei Stephan-Boltzman para cabos de diâmetro 9,36 mm
%(Poppy, T-Poppy e Reforçado de Alumínio)
%da Energisa, com parâmetros ambientais da cidade onde o aparelho está
situado, Lucena.

D0 = 0.00936; %diâmetro do cabo em metros
E = 0.5; %Emissividade do alumínio
```



```

tc = 298.15:0.1:423.15; %Vetor temperatura do cabo variando de 20 graus
celsius a 150, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.
ta = 297.54:0.1:300.54; %Vetor temperatura ambiente médias variando de
24,39 graus celsius a 27,39, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.

[TC,TA] = meshgrid(tc,ta); %Transforma os vetores temperatura em matriz.

Qirr = 17.8*D0*E*[(TC/100).^4-(TA/100).^4]; %Lei de Stephan-Boltzman

ma = max(Qirr); %Cria um vetor com os maiores valores da matriz de perda de
calor por convecção por irradiação.
mi = min(Qirr); %Cria um vetor com os menores valores da matriz de perda de
calor por convecção por irradiação.

mesh(TC,TA, Qirr) %printa a função de Stephan-Boltzman em função da matriz
de temperaturas
colorbar

```

G. Código para Simulação da função Lei Stephan-Boltzman para cabos de diâmetro 10,11 mm

```

%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da função Lei Stephan-Boltzman para cabos de diâmetro 10,11 mm
%(Raven e T-Raven)
%da Energisa, com parâmetros ambientais da cidade onde o aparelho está
situado, Lucena.

D1 = 0.01011; %diâmetro do cabo em metros
E = 0.5; %Emissividade do alumínio
tc = 298.15:0.1:423.15; %Vetor temperatura do cabo variando de 20 graus
celsius a 150, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.
ta = 297.54:0.1:300.54; %Vetor temperatura ambiente médias variando de
24,39 graus celsius a 27,39, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.

[TC,TA] = meshgrid(tc,ta); %Transforma os vetores temperatura em matriz.

Qirr = 17.8*D1*E*[(TC/100).^4-(TA/100).^4]; %Lei de Stephan-Boltzman

ma = max(Qirr); %Cria um vetor com os maiores valores da matriz de perda de
calor por convecção por irradiação.
mi = min(Qirr); %Cria um vetor com os menores valores da matriz de perda de
calor por convecção por irradiação.

mesh(TC,TA, Qirr) %printa a função de Stephan-Boltzman em função da matriz
de temperaturas
colorbar

```

H. Código para Simulação do Número de Reynolds para cabo AWG (1/0) usando em LT

```

%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação do Número de Reynolds para cabo AWG (1/0) usando em LT
%da Energisa, com parâmetros ambientais da cidade onde o aparelho está
situado, Lucena.
clc, clear;

D0 = 0.00936; %diâmetro do cabo em metros
D1 = 0.01011; %diâmetro do cabo em metros
V = 2.77:0.01:6.94; %velocidade do vento em metros por segundo
Vm = 5.13; %velocidade média do vento local em metros por segundo
pf = 1.03;%densidade do ar
uf = 18*10.^-6;%viscosidade dinâmica do ar

Re0 = (V*D0*pf)/uf; %Número de Reynolds para diâmetro 9,36 mm.
Rem0 = (Vm*D0*pf)/uf %Número de Reynolds para a velocidade média dos ventos
de cabos com diâmetro 9,36 mm.

Re1 = (V*D1*pf)/uf; %Número de Reynolds para diâmetro 10,11 mm.
Rem1 = (Vm*D1*pf)/uf %Número de Reynolds para a velocidade média dos ventos
de cabos com diâmetro 10,11 mm.

figure(1);
hold 'on';
plot(V, Re0, 'r', V, Rem0, 'g', 'LineWidth', 2); %printa a função do
Número de Reynolds em função da velocidade do vento para cabos com diâmetro
9,36 mm.
legend('NR para diâmetro 9,36 mm', 'NR médio para diâmetro 9,36 mm');

title('Variação do número de Reynolds por velocidade do vento');
xlabel('Velocidade do Vento (m/s)');
ylabel('Número de Reynolds');
grid 'on';

figure(2);
hold 'on';
plot(V, Re1, 'r', V, Rem1, 'g', 'LineWidth', 2); %printa a função do
Número de Reynolds em função da velocidade do vento para cabos com diâmetro
10,11 mm.
legend('NR para diâmetro 10,11 mm', 'NR médio para diâmetro 10,11 mm');

title('Variação do número de Reynolds por velocidade do vento');
xlabel('Velocidade do Vento (m/s)');
ylabel('Número de Reynolds');

grid 'on';

```

I. Código para Simulação da Dissipação de Calor por Convecção Forçada para Ventos Amenos em Cabos de Diâmetro 9,36 mm

```
%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da Dissipação de Calor por Convecção Forçada para Ventos Amenos
em Cabos de Diâmetro 9,36 mm
%(Poppy, T-Poppy e Reforçado de Alumínio)
%da Energisa, com parâmetros ambientais da cidade onde o aparelho está
situado, Lucena.

Rem = 2.7476e+03; %Número de Reynolds para a velocidade média local dos
ventos
Kf = 0.03;
fi = 90; %ângulo dos ventos para máxima convecção
Ka = 1.194 - cosd(fi) + 1.94*cosd(2*fi) + 0.368*sind(fi); %multiplicador de
Kang
tc = 293.15:0.5:423.15; %Vetor temperatura do cabo variando de 20 graus
celsius a 150, em Kelvin com passos de 0,5 unidades.
ta = 288.15:0.5:318.15; %Vetor temperatura ambiente (ou sensação térmica)
variando de 15 graus celsius e 45, em Kelvin com passos de 0,5 unidades.

[TC,TA] = meshgrid(tc,ta); %Transforma os vetores temperatura em matriz.

Qc = Ka*[1.01 + 1.35*(Rem.^0.52)]*Kf*(TC-TA); %Modelo IEEE

mesh(TC,TA, Qc) %printa a função da perda de calor por convecção forçada
para ventos amenos
colorbar
```

J. Código para Simulação da Dissipação de Calor por Convecção Forçada para Ventos Amenos em Cabos de Diâmetro 10,11 mm

```
%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da Dissipação de Calor por Convecção Forçada para Ventos Amenos
em Cabos de Diâmetro 10,11 mm
%(Raven e T-Raven)
%da Energisa, com parâmetros ambientais da cidade onde o aparelho está
situado, Lucena.

Rem = 2.9678e+03; %Número de Reynolds para a velocidade média local dos
ventos
Kf = 0.03;
fi = 90; %ângulo dos ventos para máxima convecção
Ka = 1.194 - cosd(fi) + 1.94*cosd(2*fi) + 0.368*sind(fi); %multiplicador de
Kang
tc = 293.15:0.5:423.15; %Vetor temperatura do cabo variando de 20 graus
celsius a 150, em Kelvin com passos de 0,5 unidades.
ta = 288.15:0.5:318.15; %Vetor temperatura ambiente (ou sensação térmica)
variando de 15 graus celsius e 45, em Kelvin com passos de 0,5 unidades.

[TC,TA] = meshgrid(tc,ta); %Transforma os vetores temperatura em matriz.

Qc = Ka*[1.01 + 1.35*(Rem.^0.52)]*Kf*(TC-TA); %Modelo IEEE
```

```
mesh(TC,TA, Qc) %printa a função da perda de calor por convecção forçada
para ventos amenos
colorbar
```

K. Código para Simulação da Dissipação de Calor por Convecção Forçada para Ventos Fortes em Cabos de Diâmetro 10,11 mm

```
%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da Dissipação de Calor por Convecção Forçada para Ventos Fortes
em Cabos de Diâmetro 10,11 mm
%(Raven e T-Raven)
%da Energisa, com parâmetros ambientais da cidade onde o aparelho está
situado, Lucena.

Rem = 2.9678e+03; %Número de Reynolds para a velocidade média local dos
ventos
Kf = 0.03;
fi = 90; %ângulo dos ventos para máxima convecção
Ka = 1.194 - cosd(fi) + 1.94*cosd(2*fi) + 0.368*sind(fi); %multiplicador de
Kang
tc = 293.15:0.5:423.15; %Vetor temperatura do cabo variando de 20 graus
celsius a 150, em Kelvin com passos de 0,5 unidades.
ta = 288.15:0.5:318.15; %Vetor temperatura ambiente (ou sensação térmica)
variando de 15 graus celsius e 45, em Kelvin com passos de 0,5 unidades.

[TC,TA] = meshgrid(tc,ta); %Transforma os vetores temperatura em matriz.

Qc = Ka*0.754*(Rem.^0.60)*Kf*(TC-TA); %Modelo IEEE

mesh(TC,TA, Qc) %printa a função da perda de calor por convecção para
forçada para ventos fortes
colorbar
```

L. Código para Simulação da Dissipação de Calor por Convecção Forçada para Ventos Fortes em Cabos de Diâmetro 10,11 mm

```
%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da Dissipação de Calor por Convecção Forçada para Ventos Fortes
em Cabos de Diâmetro 10,11 mm
%(Raven e T-Raven)
%da Energisa, com parâmetros ambientais da cidade onde o aparelho está
situado, Lucena.

Rem = 2.9678e+03; %Número de Reynolds para a velocidade média local dos
ventos
Kf = 0.03;
fi = 90; %ângulo dos ventos para máxima convecção
Ka = 1.194 - cosd(fi) + 1.94*cosd(2*fi) + 0.368*sind(fi); %multiplicador de
Kang
tc = 293.15:0.5:423.15; %Vetor temperatura do cabo variando de 20 graus
celsius a 150, em Kelvin com passos de 0,5 unidades.
ta = 288.15:0.5:318.15; %Vetor temperatura ambiente (ou sensação térmica)
variando de 15 graus celsius e 45, em Kelvin com passos de 0,5 unidades.
```

```
[TC,TA] = meshgrid(tc,ta); %Transforma os vetores temperatura em matriz.

Qc = Ka*0.754*(Rem.^0.60)*Kf*(TC-TA); %Modelo IEEE

mesh(TC,TA, Qc) %printa a função da perda de calor por convecção para
forçada para ventos fortes
colorbar
```

M. Código para Simulação da Dissipação de Calor por Convecção Natural em Cabos de Diâmetro 9,36 mm

```
%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da Dissipação de Calor por Convecção Natural em Cabos de
Diâmetro 9,36 mm
%(Poppy, T-Poppy e Reforçado de Alumínio)
%da Energisa, com parâmetros ambientais da cidade onde o aparelho está
situado, Lucena.

D0 = 0.00936; %diâmetro médio dos tipos de cabo cabo em metros
pr = 1.03; %densidade relativa do ar
tc = 298.15:0.1:423.15; %Vetor temperatura do cabo variando de 20 graus
celsius a 150, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.
ta = 297.54:0.1:300.54; %Vetor temperatura ambiente médias variando de
24,39 graus celsius a 27,39, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.

[TC,TA] = meshgrid(tc,ta); %Transforma os vetores temperatura em matriz.

Qc = 3.645*sqrt(pr)*D0.^0.75*(TC-TA).^1.25; %Perda de calor por convecção
por ventilação natural

ma = max(abs(Qc)); %Cria um vetor com os maiores valores da matriz de perda
de calor por convecção por ventilação natural.
mi = min(abs(Qc)); %Cria um vetor com os menores valores da matriz de perda
de calor por convecção por ventilação natural.

mesh(TC,TA, abs(Qc)) %printa a função da perda de calor por convecção
forçada para ventos amenos
colorbar
```

N. Código para Simulação da Dissipação de Calor por Convecção Natural em Cabos de Diâmetro 10,11 mm

```
%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da Dissipação de Calor por Convecção Natural em Cabos de
Diâmetro 10,11 mm
%(Raven e T-Raven)
%da Energisa, com parâmetros ambientais da cidade onde o aparelho está
situado, Lucena.

D1 = 0.01011; %diâmetro médio dos tipos de cabo cabo em metros
pr = 1.03; %densidade relativa do ar
tc = 298.15:0.1:423.15; %Vetor temperatura do cabo variando de 20 graus
celsius a 150, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.
```

```

ta = 297.54:0.1:300.54; %Vetor temperatura ambiente médias variando de
24,39 graus celsius a 27,39, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.

[TC,TA] = meshgrid(tc,ta); %Transforma os vetores temperatura em matriz.

Qc = 3.645*sqrt(pr)*Dl.^0.75*(TC-TA).^1.25; %Perda de calor por convecção
por ventilação natural

ma = max(abs(Qc)); %Cria um vetor com os maiores valores da matriz de perda
de calor por convecção por ventilação natural.
mi = min(abs(Qc)); %Cria um vetor com os menores valores da matriz de perda
de calor por convecção por ventilação natural.

mesh(TC,TA, abs(Qc)) %printa a função da perda de calor por convecção
forçada para ventos amenos
colorbar

```

O. Código para Simulação da ampacidade para cabo AWG (1/0) usando em LT

```

%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da ampacidade para cabo AWG (1/0) usando em LT
%da Energisa, com parâmetros ambientais da cidade onde o aparelho está
situado, Lucena.

D0 = 0.00936; %diâmetro médio dos tipos de cabo cabo em metros
pr = 1.03; %densidade relativa do ar

E = 0.5; %Emissividade do alumínio

tc = 298.15:0.1:423.15; %Vetor temperatura do cabo variando de 20 graus
celsius a 150, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.
ta = 297.54:0.1:300.54; %Vetor temperatura ambiente médias variando de
24,39 graus celsius a 27,39, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.
[TC,TA] = meshgrid(tc,ta); %Transforma os vetores temperatura em matriz.

Qirr = 17.8*D0*E*[(TC/100).^4-(TA/100).^4]; %Lei de Stephan-Boltzman
Qc = 3.645*sqrt(pr)*D0.^0.75*(TC-TA).^1.25; %Perda de calor por convecção
por ventilação natural

R1 = 0.000537; %Resistência a 20 graus celsius do cabo Poppy.
R2 = 0.000548; %Resistência a 20 graus celsius dos cabos Reforçado com Liga
de Alumínio e T-Poppy.

figure(1)
I = sqrt((abs(Qc) + Qirr)/R1); %Corrente máxima do cabo Poppy.
mesh (TC, TA, abs(I))
colorbar

figure(2)
I = sqrt((abs(Qc) + Qirr)/R2); %Corrente máxima dos cabos Reforçado com
Liga de Alumínio e T-Poppy
mesh (TC, TA, abs(I))
colorbar

```

P. Código para Simulação da ampacidade para cabos de diâmetro 10,11mm AWG (1/0) usando em LT

```

%Autor: Lindnaldo Maurício
%Simulação da ampacidade para cabo AWG (1/0) usando em LT
%da Energisa, com parâmetros ambientais da cidade onde o aparelho está
situado, Lucena.

D0 = 0.01011; %diâmetro médio dos tipos de cabo cabo em metros
pr = 1.03; %densidade relativa do ar

E = 0.5; %Emissividade do alumínio

tc = 298.15:0.1:423.15; %Vetor temperatura do cabo variando de 20 graus
celsius a 150, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.
ta = 297.54:0.1:300.54; %Vetor temperatura ambiente médias variando de
24,39 graus celsius a 27,39, em Kelvin com passos de 0,1 unidades.
[TC,TA] = meshgrid(tc,ta); %Transforma os vetores temperatura em matriz.

Qirr = 17.8*D0*E*[(TC/100).^4-(TA/100).^4]; %Lei de Stephan-Boltzman
Qc = 3.645*sqrt(pr)*D0.^0.75*(TC-TA).^1.25; %Perda de calor por convecção
por ventilação natural

R1 = 0.000534; %Resistência a 20 graus celsius do cabo Raven.
R2 = 0.000545; %Resistência a 20 graus celsius do cabo T-Raven.

figure(1)
I = sqrt((abs(Qc) + Qirr)/R1); %Corrente máxima do cabo Raven.
mesh (TC, TA, abs(I))
colorbar

figure(2)
I = sqrt((abs(Qc) + Qirr)/R2); %Corrente máxima do cabo T-Raven.
mesh (TC, TA, abs(I))
colorbar

```