



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Graduação em Engenharia Elétrica

DIOGO ANDRADE DO NASCIMENTO

**Efeito de condições ambientais sob a luz da Norma IEEE 738 na
parametrização de relés de distância em linhas de transmissão**

**Uberlândia
2020**

DIOGO ANDRADE DO NASCIMENTO

**Efeito de condições ambientais sob a luz da Norma IEEE 738
na parametrização do relé de distância em linhas de
transmissão**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Maycon S. Bernardes

Assinatura do orientador

Uberlândia
2020

DIOGO ANDRADE DO NASCIMENTO

**Efeito de condições ambientais sob a luz da Norma IEEE 738
na parametrização do relé de distância em linhas de
transmissão**

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Banca examinadora

Prof. Dr. Wellington Maycon S. Bernardes (UFU) (Orientador)

Prof. Dr. José Roberto Camacho (UFU)

Prof. Dr. José Rubens Macedo Júnior (UFU)

Uberlândia
2020

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos aos meus pais, Marcelo e Fabiana, que sempre foram exemplo e inspiração para minha formação pessoal.

À minha pequena irmã, Eduarda, que me inspira a ser uma pessoa melhor e mais compreensiva.

Às minhas avós, Mariana e Antônia, por todo apoio dado nos momentos difíceis, os quais seriam infinitamente piores sem vocês.

À minha namorada, Domitila, que nos momentos de desânimo e descrença esteve ao meu lado, mantendo-me motivado a seguir meus sonhos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Wellington M. S. Bernardes, por ter me confiado o desenvolvimento deste trabalho, bem como por estar sempre disposto a me ajudar.

A todos os meus colegas de turma, por todos esses anos de amizade e aprendizado; em especial aos meus amigos íntimos, Lincoln, Gabriel e Justriano, que são para mim como uma segunda família.

E por fim, a Deus, por me fazer enxergar o lado positivo nas situações ruins e sempre ser grato a Ele.

RESUMO

NASCIMENTO, D. A. **Efeito de condições ambientais sob a luz da Norma IEEE 738 na parametrização de relés de distância em linhas de transmissão.** 2020. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

Um projeto adequado para transmissão de energia elétrica deve estar em consonância com certos princípios norteadores, entre eles: a continuidade, a confiabilidade, e a seletividade de atuação. Para tal, se faz necessário o uso de um conjunto de equipamentos que garantem proteção e confiabilidade do sistema — o relé de proteção e o disjuntor. Neste cenário, tem-se os relés de distância, que são responsáveis por proteger as linhas de transmissão de eventuais faltas ocorridas. Apesar de seu uso ser de grande utilidade atualmente, ainda ocorrem muitas falhas devido ao ajuste equívoco de sua impedância de referência. Muitas das vezes, tal erro se deve às mudanças de temperatura no cabo condutor, que provocam uma alteração na impedância da linha de transmissão, tornando assim o ajuste impreciso. Os principais fatores que provocam a alteração na temperatura do cabo condutor — temperatura ambiente, corrente elétrica, velocidade dos ventos, radiação solar e posição geográfica dos cabos — foram exaustivamente detalhados neste trabalho. Portanto, o objetivo principal do trabalho foi elaborar um sistema que corrige a impedância da linha de transmissão a partir de dados de entrada referentes a condições climáticas, conforme reza a norma IEEE738. Para tanto, utilizou-se a ferramenta *SIMULINK* do *software MATLAB*. Os resultados obtidos foram bem promissores mostrando que, para variações bruscas na temperatura ambiente, os relés não corrigidos apresentaram erros de precisão de até 16% na aferição da impedância da linha de transmissão. Outro caso de grande relevância observado, foi a relação temperatura *versus* corrente elétrica, onde o relé não corrigido apresentou um erro de precisão da ordem de até 12% na medição da impedância. Tanto a corrente elétrica, quanto a temperatura ambiente possuem relação diretamente proporcional à temperatura do cabo condutor. Por fim, a partir da correção da impedância da linha de transmissão por meio dos dados de entrada, é possível garantir um ajuste mais preciso e um sistema de proteção mais confiável.

Palavras-chave: Linhas de transmissão, Impedância, Relés de distância, IEEE 738, Temperatura, Vento.

ABSTRACT

NASCIMENTO, D. A. Effect of environmental conditions considering the IEEE 738 Standard on the adjustment of distance relays in transmission lines. 2020. Monography (Bachelor in Electrical Engineering) - Faculty of Electrical Engineering, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

An adequate power system transmission project must agree with certain guiding principles, among them: continuity, reliability, and selectivity of each action. Using a set of equipment that guarantees protection and trustability to the system is necessary – the protecting relay and the circuit breaker. In this scenario, there are distance relays responsible for protecting the transmission lines from possible faults. Although this device is largely used in the electrical sector nowadays, many failures still occur due to its reference impedance's equivocal adjustment. Often, this error is due to temperature changes in the conductor cable, which cause a change in the transmission line impedance, thus making the adjustment inaccurate. The main factors that cause changes in temperature of the conductor cable - ambient temperature, electric current, wind speeds, solar radiation, and geographical position of the cables - were exhaustively detailed in this work. Therefore, the work's main objective was to develop a computational system that corrects the impedance of the transmission line from input data related to climatic conditions, according to the IEEE738 standard. For this, the author used the tool SIMULINK from MATLAB software. The obtained results showed that, for sudden variations in the ambient temperature, the conventional relays showed a precision error of up to 16% in the measurement of the transmission line impedance. Another observed case of great relevance was the temperature versus electric current relationship, where the conventional relay had an accuracy error of up to 12% in the impedance measurement. Both the electric current and the ambient temperature are directly proportional to the temperature of the conductor cable. Finally, by correcting the impedance of the transmission line using the input data, it is possible to guarantee a more precise adjustment and a more reliable protection system.

Keywords: Transmission Lines, Impedance, Distance relays, IEEE 738, Temperature, Wind.

Lista de Figuras

1	Visão geral de um sistema de geração transmissão e distribuição de energia . . .	15
2	Triângulo de Potências	16
3	Cabo do tipo ACSR	18
4	Disjuntor de alta tensão	19
5	Relé digital com múltiplas funções	20
6	Montagem de um relé de distância.	23
7	Alcances das zonas de atuação de um relé de distância.	25
8	Representação das zonas de atuação pelo plano R-X	26
9	Fluxograma da lógica de atuação do relé	27
10	Ângulo de Azimute	31
11	Ângulo de Elevação Solar	31
12	Curva $T_s \times I$	42
13	Curva $T_s \times T_a$	43
14	Curva $T_s \times V_w$ - Ventos Leves	45
15	Curva $T_s \times V_w$ - Ventos Intensos	46
16	Curva $T_s \times V_w$ - Situação Extrapolada	46
17	Curva $T_s \times \phi$	47
18	Curva $T_s \times Z_l$	48
19	Parte Geral do Modelo	52
20	Subsistema Responsável Pela Correção	53
21	Janela Para Entrada de Valores	54
22	Subsistema Reatância	54
23	Diagrama Unifilar	56
24	Valores de Impedância Para o Primeiro Cenário	57
25	Impedâncias de Ajuste e Sinal de <i>Trip</i> Para o Primeiro Cenário	58
26	Representação do Primeiro Cenário no Plano R-X	58
27	Valores de Impedância Para o Segundo Cenário	60
28	Impedâncias de Ajuste e Sinal de <i>Trip</i> Para o Segundo Cenário	61
29	Representação do Segundo Cenário no Plano R-X	61
30	Impedâncias de Ajuste e Sinal de <i>Trip</i> Para o Terceiro Cenário	62
31	Representação do Terceiro Cenário no Plano R-X	62
32	Impedâncias de Ajuste e Sinal de <i>Trip</i> Para o Quarto Cenário	64
33	Representação do Quarto Cenário no Plano R-X	64

Lista de Tabelas

1	Exemplos de relés de proteção	20
2	Valores usuais de alcance e tempo de atuação das zonas do relé de distância . .	25
3	Constante do azimuth solar	32
4	Situação 1	33
5	Situação 2	34
6	Situação 3	35
7	Valores típicos de emissividade	38
8	Valores de resistividade e coeficiente de temperatura para diversos materiais a 25°C	40
9	Valores dos parâmetros para o cenário padrão	41

ABREVIATURAS E SIGLAS

AAAC	<i>All Aluminum Alloy Conductor</i>
AAC	<i>All Aluminum Conductor</i>
ACAR	<i>Aluminum Conductor, Aluminum Alloy-reinforced</i>
ACSR	<i>Aluminium Conductor Steel-Reinforced</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
FEELT	Faculdade de Engenharia Elétrica
<i>FP</i>	Fator de Potência
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LT	Linha de Transmissão
<i>P</i>	Potência Ativa
<i>Q</i>	Potência Reativa
RTC	Relação de Transformação de Corrente
RTP	Relação de Transformação de Potencial
<i>S</i>	Potência Aparente
SI	Sistema Internacional
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	13
1.2	VISÃO GERAL DO TRABALHO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	O SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	15
2.2	CABOS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	18
2.3	SISTEMA DE PROTEÇÃO	19
3	RELÉ DE IMPEDÂNCIA (ANSI 21)	23
3.1	ZONAS DE ATUAÇÃO	24
3.2	PLANO R-X	26
3.3	PROTEÇÃO DE RETAGUARDA	28
4	O EFEITO TÉRMICO	29
4.1	RELAÇÃO CALOR-TEMPERATURA	29
4.1.1	GANHO DE CALOR DEVIDO AO EFEITO JOULE – q_j	29
4.1.2	GANHO DE CALOR POR RADIAÇÃO SOLAR – q_s	30
4.1.3	PERDA DE CALOR POR CONVECÇÃO TÉRMICA – q_c	36
4.1.4	PERDA DE CALOR POR IRRADIAÇÃO – q_r	38
4.2	RELAÇÃO TEMPERATURA-IMPEDÂNCIA	38
4.3	INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NA TEMPERATURA FINAL DO CON- DUTOR: UMA ANÁLISE PRÁTICA	41
4.3.1	PARÂMETRO CORRENTE ELÉTRICA	42
4.3.2	PARÂMETRO TEMPERATURA AMBIENTE	43
4.3.3	PARÂMETRO VELOCIDADE DO VENTO	44
4.3.4	PARÂMETRO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO	47
4.3.5	PARÂMETRO ÂNGULO DE AZIMUTE DA LINHA	48
5	MODELAGEM NO <i>SIMULINK</i>	51
5.1	EXPLICAÇÃO GERAL DO MODELO	51
5.2	SIMULAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.2.1	PRIMEIRA SITUAÇÃO	56
5.2.2	SEGUNDA SITUAÇÃO	59
5.2.3	TERCEIRA SITUAÇÃO	60
5.2.4	QUARTA SITUAÇÃO	63
6	CONCLUSÃO	67
6.1	TRABALHOS FUTUROS	67

REFERÊNCIAS	70
A CÓDIGOS IMPLEMENTADOS NO <i>MATLAB</i>	71
B CÓDIGOS IMPLEMENTADOS NO <i>SIMULINK</i>	76

1 INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão são protegidas por um conjunto de dispositivos elétricos, que quando coordenados, garantem a proteção e a segurança da mesma. Destacam-se dois dispositivos essenciais na proteção da linha: o disjuntor e o relé de proteção. O disjuntor é composto de uma câmara extintora de arco elétrico, sendo assim, ele é responsável por interromper a passagem de corrente elétrica no circuito, porém, ele não é responsável por detectar faltas na linha de transmissão, e para isso, utiliza-se o relé de proteção. O relé de proteção tem como principal objetivo monitorar a linha de transmissão, e comandar a abertura do disjuntor caso seja detectada alguma anomalia (BAYLISS; HARDY, 1999). Simplificando: o relé de proteção monitora a linha a todo momento, e envia o sinal de abertura ao disjuntor caso seja detectada alguma falha na linha de transmissão, e o disjuntor por sua vez, tem como única função interromper o fluxo de corrente elétrica dessa linha.

O objeto de estudo desse trabalho é o relé de distância, mais precisamente o relé de impedância. Como detalhado em Mamede e Filho (2011), esse relé monitora a linha de transmissão tomando como referência a sua impedância, o qual seu valor total corresponde ao comprimento do trecho da linha protegido. A partir disso, pode-se estabelecer uma relação linear entre comprimento da linha e impedância, fenômeno explícito na obra de Fuchs (1979). Tal relação só é possível ser feita pois a impedância total de uma linha de transmissão é calculada a partir da soma de seus parâmetros distribuídos de resistência e reatância. Basicamente, quando ocorre uma falta na linha de transmissão, o caminho elétrico se encurta. Dessa maneira, é possível fazer a detecção de falhas na rede através da impedância da mesma, bem como determinar o trecho da linha de transmissão onde ocorreu tal falha.

Assim, fica evidente que a impedância da linha de transmissão é o fator determinante para o ajuste do relé de distância.

1.1 OBJETIVOS

O foco deste trabalho é analisar como a impedância de uma linha de transmissão, e por consequência, a precisão do relé de distância podem ser afetados através de fatores externos, tais como: mudanças na temperatura, velocidade do vento nos cabos condutores e posição geográfica da linha de transmissão. O objetivo principal é entender como uma linha de transmissão se comporta sob condições adversas, e então fazer a modelagem de um relé de distância que leve em consideração tais aspectos, a fim de aumentar a sua precisão.

Para simular o funcionamento do relé de distância sob diversos cenários diferentes, utilizou-se a ferramenta *Simulink* do *software MATLAB*, produzido pela *MathWorks*. Nele, foi possível modelar um relé de distância mais preciso, que opera em uma linha de transmissão fictícia também modelada pelo autor.

Salienta-se que o *Simulink* é uma ferramenta de grande importância para o meio acadêmico, visto que já foram produzidos diversos trabalhos científicos em sua plataforma, a exemplo de Oliveira (2019).

O ajuste desse relé é feito através de informações fundamentais, tais como impedância da linha de transmissão, e a relação de transformação dos transformadores de potencial e de corrente. Além disso, o relé modelado também recebe informações extras, que aumentam a precisão do seu ajuste, sendo a velocidade do vento e temperatura ambiente, para que o ajuste seja mais coerente com a realidade.

1.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO

O Capítulo 2 oferece um referencial teórico para melhor entendimento deste trabalho. De maneira geral e simplificada, explica-se como funciona o processo de transmissão de energia elétrica.

No Capítulo 3 é detalhado como um relé de impedância funciona, bem como a maneira que é feito seu ajuste, e as características de suas diferentes zonas de proteção.

Já no Capítulo 4, o foco é explicar como fatores externos afetam no valor da impedância de uma linha de transmissão.

O Capítulo 5 traz simulações computacionais do relé modelado no *Simulink*, bem como os resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 6 está reservado para as conclusões finais deste trabalho e sobre os trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Um sistema de transmissão de energia pode ser interpretado como um elo entre a geração e a distribuição de energia elétrica. Diversos dispositivos e equipamentos elétricos são utilizados para que esse elo seja funcional e eficiente, dentre eles destacam-se: transformadores, subestações e logicamente, as linhas de transmissão.

A linha de transmissão é o elemento que faz a conexão da unidade geradora ao centro de distribuição de energia, mas para que tal conexão seja feita de maneira eficiente, é necessário o uso de alguns equipamentos que operam de maneira harmônica.

Como exposto na Figura 1, logo na saída da estação geradora, ou seja, no início do sistema de transmissão, tem-se transformadores que são responsáveis por elevar a tensão do sistema, a fim de reduzir a corrente elétrica que flui na linha de transmissão, o que implica no uso de cabos condutores de menor calibre, tornando assim o seu projeto menos dispendioso (FUCHS, 1979).

Figura 1: Visão geral de um sistema de geração transmissão e distribuição de energia



Fonte: Argo (2020)

Além disso, como brilhantemente descrito em Nilsson e Riedel (2014), o fluxo de corrente elétrica menor implica em menos perdas elétricas, o que torna o sistema mais eficiente. Essa é a grande razão para os níveis de tensão serem tão elevados nos sistemas de transmissão de energia elétrica.

A obra de Eisberg e Lerner (1983) explica a fundo o efeito da redução da corrente em função da elevação da tensão, efeito existente devido à Lei de Ohm, pois o equacionamento que relaciona a potência elétrica com grandezas como corrente e a tensão, é derivado de tal lei.

O equacionamento a seguir expõe como a potência elétrica se relaciona com a corrente e a tensão.

Em sistemas trifásicos:

$$P = S \times FP \quad (1)$$

$$S = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1), tem-se:

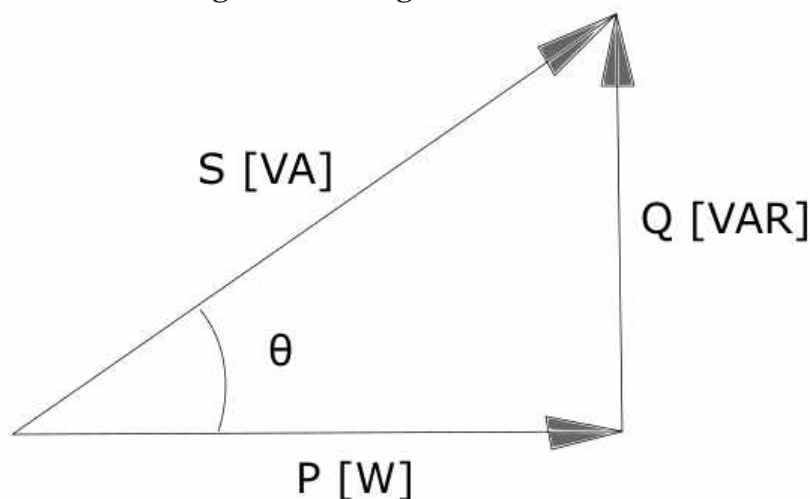
$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times FP \quad (3)$$

Onde:

- P é a potência elétrica em *Watts*;
- S é a potência aparente em *Volt-Ampère*;
- FP é o fator de potência (adimensional);
- V_L é a tensão de linha em *Volts* e;
- I_L é a corrente de linha em *Ampère*.

Os conceitos de Potência Ativa (P), Potência Aparente (S) e Fator de Potência (FP) podem ser facilmente compreendidos no método gráfico do triângulo de potências (NILSSON; RIEDEL, 2014), onde tais grandezas, em conjunto à Potência Reativa (Q), são relacionadas.

Figura 2: Triângulo de Potências



Fonte: O autor

Como exposto na Figura 2, o cosseno do ângulo θ é P sobre S , e isso corresponde ao fator de potência, como visto na Equação 1. Esse ângulo θ corresponde a defasagem do ângulo da tensão em relação ao ângulo da corrente, ou seja, caso altere-se apenas a magnitude de tais grandezas, o FP não muda seu valor.

A partir disso, tem-se a fórmula mais detalhada da potência ativa.

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos(\theta) \quad (4)$$

Isolando a corrente, tem-se:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \times V_L \times \cos(\theta)} \quad (5)$$

A potência elétrica entregue às linhas de transmissão, gerada nas usinas de energia elétrica, depende apenas da potência mecânica que suas turbinas podem extrair (MOURA; ROCHA, 2019), ou seja, o que determina a potência elétrica de uma usina hidrelétrica é a potência mecânica que suas turbinas podem extrair do fluxo de água. Portanto, alterações nos níveis de tensão e corrente em uma linha de transmissão, não influenciam significativamente na potência elétrica transmitida pela mesma. Então, caso a magnitude da tensão de um sistema de transmissão seja aumentada, a corrente elétrica necessariamente deve diminuir, pois, como exposto na equação (5) trata-se de grandezas inversamente proporcionais.

Posto isso, tem-se a seguir, o equacionamento da dissipação de potência elétrica (perdas Joulicas) nos cabos condutores (NILSSON; RIEDEL, 2014).

$$Perdas_{Joulicas} = R \times I^2 \quad (6)$$

Onde:

- R é a Resistência elétrica em *Ohms*.

O valor da resistência elétrica depende primordialmente dos aspectos construtivos do cabo condutor (tema que será abordado no Capítulo 4), então, pode-se afirmar que a única maneira efetiva de reduzir as perdas Joulicas em uma linha de transmissão já construída, é justamente reduzindo a corrente elétrica que flui sobre seus cabos condutores. Dessa maneira, fica provado algebricamente que ao elevar-se o nível de tensão em uma linha de transmissão, a corrente elétrica que percorre seus cabos condutores será reduzida, o que ocasiona em menores perdas elétricas.

A qualidade da transmissão está diretamente ligada às perdas elétricas, de modo que quanto menos perdas houver durante o percurso, mais eficiente é a transmissão de energia, e por consequência, a qualidade da transmissão é melhor. Portanto, o principal critério para se escolher qual material condutor utilizar em uma linha de transmissão, é justamente o critério da condutibilidade elétrica, pois cabos com alta condutibilidade elétrica possuem baixa resistência elétrica, e por consequência, apresentam baixas perdas elétricas.

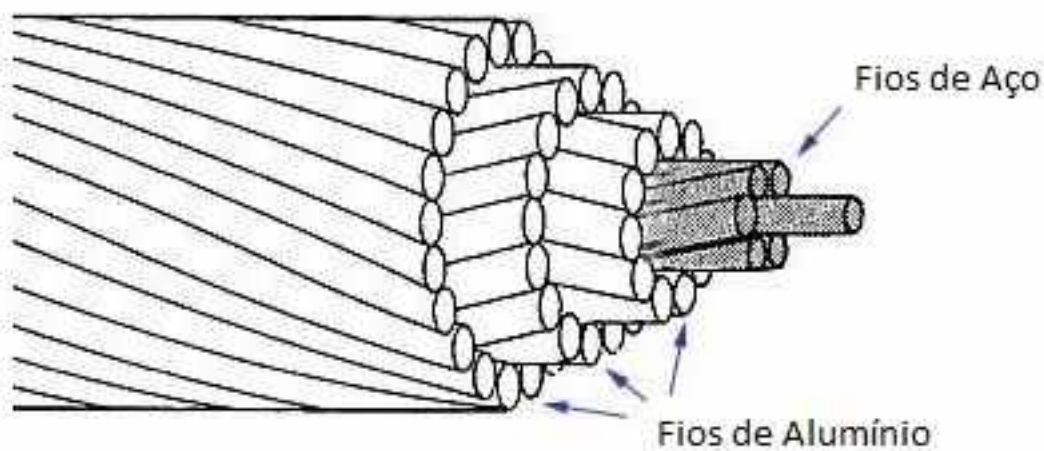
2.2 CABOS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os cabos condutores de uma linha de transmissão são submetidos a grandes esforços mecânicos, pois os mesmos estão expostos a diversos fenômenos da natureza, tais como tempestades, vendavais e mudanças bruscas de temperatura. Então, além do critério da alta condutibilidade elétrica, também é necessário que haja um cuidado extra em relação à carga mecânica de ruptura desses cabos, como exposto em Labegalini, Labegalini e Fuchs (1992).

Os cabos usualmente utilizados em projetos de linhas de transmissão, são:

- *All Aluminum Conductor* (AAC): cabo composto por vários fios de alumínio encordoados. Esses cabos possuem uma boa ampacidade, porém, como são cabos desalmados, não apresentam uma boa resistência mecânica se comparados aos próximos.
- *All Aluminum Alloy Conductor* (AAAC): nesse cabo são utilizadas ligas de alumínio de alta resistência. Isso garante uma resistência mecânica maior, porém sua resistência elétrica também é maior, o que diminui a sua capacidade de transmissão. Assim como os cabos do tipo AAC, os cabos AAAC são desalmados.
- *Aluminium Conductor Steel-Reinforced* (ACSR): esse cabo é composto por camadas concêntricas de fios de alumínio encordoados sobre uma alma de aço, que pode ser composta por apenas um fio ou por vários fios de aço também encordoados. Esse tipo de cabo garante uma boa resistência mecânica em conjunto à uma boa capacidade de condução de corrente. Por isso, é o tipo de cabo que é mais utilizado em projetos de linhas de transmissão (BAYLISS; HARDY, 1999).

Figura 3: Cabo do tipo ACSR



Fonte: Adaptado de *Transmission...* (2020)

- *Aluminum Conductor, Aluminum Alloy-reinforced (ACAR)*: a composição é feita de maneira semelhante ao cabo do tipo ACSR, porém os fios estão sobre uma alma de liga de alumínio com alta resistência mecânica. Esses cabos possuem uma alta ampacidade, porém sua resistência mecânica é menor que a do cabo tipo ACSR.

Exposto isso, fica evidente que cabos do tipo ACSR (Figura 3), são preferencialmente utilizados em linhas de transmissão, pois apresentam uma boa condutibilidade elétrica, além de garantir uma resistência mecânica aceitável para os esforços que são submetidos (ASSOCIATION et al., 1982).

2.3 SISTEMA DE PROTEÇÃO

Durante a concepção de um projeto de linha de transmissão, um aspecto fundamental a ser levado em conta é a proteção do sistema elétrico. O equipamento responsável por garantir tal proteção é denominado relé de proteção. Ele desempenha um papel muito importante, pois é responsável por prevenir e detectar falhas de funcionamento do sistema, minimizando assim os efeitos negativos causados por essas condições anormais de funcionamento. Um bom projeto de proteção garante uma maior confiabilidade no sistema.

Entretanto, relés de proteção não funcionam de maneira isolada, é necessário que haja uma operação conjunta com outros equipamentos, tais como, Disjuntores (Figura 4), Transformadores de Corrente (TCs), Transformadores de Potencial (TPs), entre outros (BERNARDES, 2013, 2018).

Figura 4: Disjuntor de alta tensão



Fonte: ABB (2019)

O papel do relé se restringe a detectar falhas e sinalizar ao disjuntor um comando de abertura, caso seja detectado alguma anormalidade. Então o que, de fato, realiza a abertura do circuito ao operar a proteção do sistema é o disjuntor.

Existem diversas formas diferentes para que seja feito o processo de detecção de falhas, por isso, existem vários tipos de relés, com diferentes funções. Para cada tipo de situação, existe um relé adequado para garantir a proteção. Por sua vez, é comum que esses dispositivos operem de forma conjunta, garantindo assim uma maior proteção e confiabilidade ao sistema. Para que não houver divergências na interpretação de um projeto elétrico, fez-se necessária a padronização na identificação desses equipamentos. Então a *American National Standards Institute* (ANSI), como visto em CSANY (2011), criou um modelo para a identificação de tais equipamentos elétricos, e atualmente é seguido no mundo inteiro, por ser de alta confiabilidade.

A Tabela 1 expõe algumas das funções mais difundidas na proteção do sistema elétrico, bem como a sua identificação segundo a ANSI.

Tabela 1: Exemplos de relés de proteção

Função	Nome	Parâmetro para Detecção de Falhas
21	Relé de Distância	Impedância
50	Relé de Sobrecorrente Instantâneo	Corrente de Surto
51	Relé de Sobrecorrente Temporizado	Sobrecorrente
67	Relé Direcional de Sobrecorrente	Sobrecorrente e Direção do Fluxo
87	Relé Diferencial de Corrente	Diferença da Corrente

Fonte: O autor.

O avanço da tecnologia possibilitou a criação de relés digitais com múltiplas funções, o que ocasionou o aumento na eficiência da proteção, e em certos casos, também tornou o processo menos dispendioso, pois vários relés analógicos, com diferentes funções, poderiam ser substituídos por apenas um único relé digital (Figura 5).

Figura 5: Relé digital com múltiplas funções



Fonte: SEL (2020)

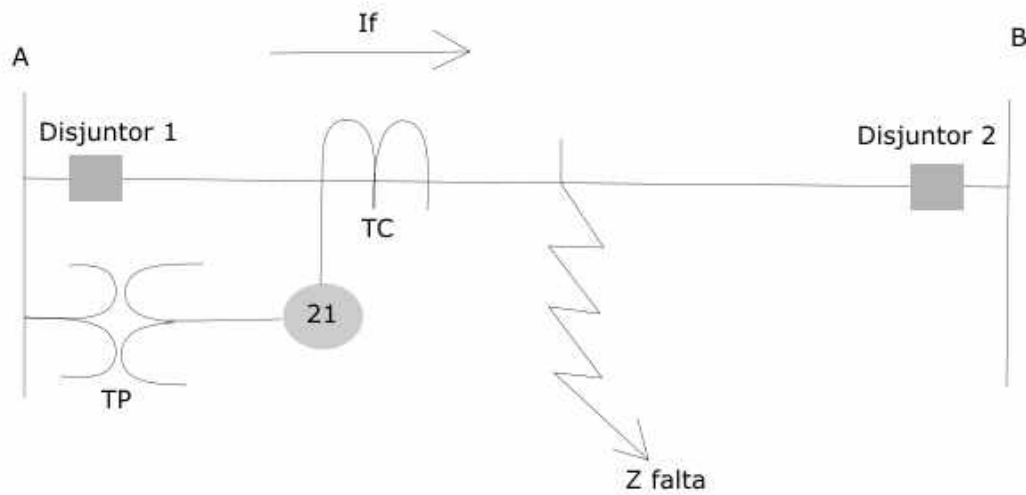
Ressalta-se que os relés são dispositivos sofisticados que não suportam os níveis de tensão e corrente dos sistemas os quais eles foram projetados para proteger. Por isso, para aferir o nível de tensão e corrente da rede, faz-se o uso de TCs e TPs. Esses dispositivos recebem os níveis de tensão e corrente da rede no seu primário, e os transformam para níveis aceitáveis para leitura do relé no seu secundário. A amplitude de valores que são usualmente utilizados no secundário dos TCs e TPs são de 5A e 115V, respectivamente.

Portanto, conforme exposto no Capítulo 1, o objeto de estudo deste trabalho é o relé de impedância, e sendo assim, se faz necessária uma especial atenção à impedância da linha de transmissão, uma vez que a mesma é o principal parâmetro de detecção de falhas utilizado por esse dispositivo. De modo consequente, fica reservado ao próximo capítulo o estudo detalhado do relé de impedância, com explanações a respeito de sua montagem bem como suas zonas de atuação.

3 RELÉ DE IMPEDÂNCIA (ANSI 21)

O relé de impedância opera em conjunto com um TC e um TP (vide Figura 6). Dessa forma, através da medição de corrente e tensão em uma linha de transmissão é possível calcular a impedância da mesma, pela lei de Ohm. No momento em que ocorre a falta, a corrente que flui pelo relé aumenta, enquanto a tensão diminui, isso provoca uma queda na impedância medida. Assim, o relé deve ser ajustado para operar sempre que a impedância medida for menor do que a impedância ajustada como referência. Como a impedância da linha é diretamente proporcional ao seu comprimento (FUCHS, 1979), é possível determinar a distância entre a falta e o relé, e é por isso que o relé de impedância é comumente chamado de relé de distância.

Figura 6: Montagem de um relé de distância.



Fonte: O autor

É importante salientar que o ajuste do relé é feito com base na leitura do secundário do TC e do TP, portanto, algumas variáveis, tais quais a relação de transformação do TC e do TP, são essenciais para o cálculo da impedância de ajuste do relé. As Equações 7, 8 e 9 expõem as etapas do equacionamento do ajuste do relé.

$$Z_{aj} = \frac{V_s}{I_s} \quad (7)$$

$$V_s = \frac{V_p}{RTP} \quad (8)$$

$$I_s = \frac{I_p}{RTC} \quad (9)$$

Substituindo as Equações 8 e 9 em 7, tem-se:

$$Z_{aj} = \frac{V_p}{I_p} \times \frac{RTC}{RTP} \quad (10)$$

Onde:

- Z_{aj} representa a impedância de ajuste do relé;
- V_s representa a tensão no secundário do transformador de potencial;
- V_p representa a tensão no primário do transformador de potencial;
- I_s representa a corrente no secundário do transformador de corrente;
- I_p representa a corrente no primário do transformador de corrente;
- RTP é a relação de transformação do transformador de potencial e;
- RTC é a relação de transformação do transformador de corrente.

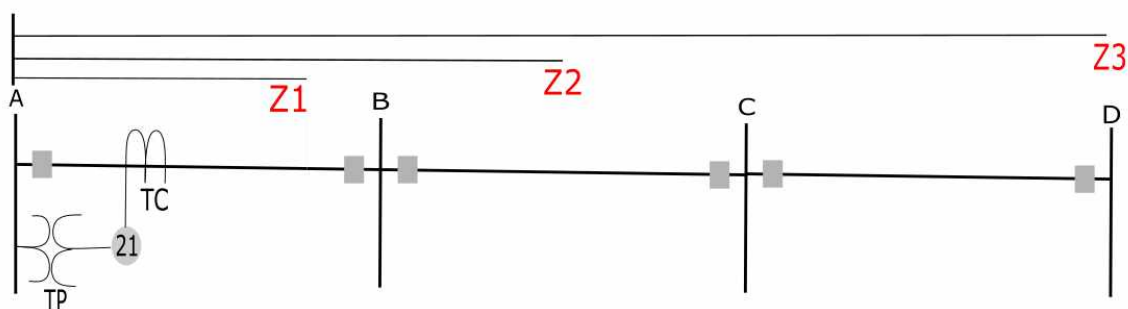
3.1 ZONAS DE ATUAÇÃO

As zonas de atuação do relé de distância reforçam a confiabilidade do sistema elétrico, podendo até garantir uma proteção de retaguarda, onde o relé é programado para atuar instantaneamente no seu trecho principal, e para os demais trechos, atua de forma temporizada. Isso ocorre pois a proteção de retaguarda só atua mediante a falha do relé de proteção principal do trecho onde ocorreu a falha (BAYLISS; HARDY, 1999). Neste contexto, têm-se as chamadas zonas de atuação do relé de impedância. A primeira zona de proteção geralmente é instantânea (principal). Para as demais zonas, a proteção é sempre temporizada, tratando-se, portanto, como uma proteção de retaguarda. Dessa forma, o tempo de atuação pela segunda e pela terceira zona devem ser maiores do que o da zona principal.

O ajuste das zonas de atuação é feito com base nas impedâncias dos trechos protegidos, devido ao fato do comprimento da linha de transmissão ser diretamente proporcional à sua impedância.

Tomando-se o sistema representado na Figura 7 como exemplo, o ajuste das zonas de atuação geralmente é feito da seguinte forma: a primeira zona (Z1) – ou zona instantânea – é ajustada para proteger de 80% a 90% do trecho “AB”; a segunda zona de atuação (Z2) é ajustada para cobrir todo o trecho “AB” além de 20% a 75% do trecho “BC”; e por fim, a terceira zona de atuação (Z3) fica responsável por cobrir integralmente todo o comprimento da linha (KINDERMANN, 2008).

Figura 7: Alcances das zonas de atuação de um relé de distância.



Fonte: O autor

Caso ocorra uma falta no trecho “CD” e o disjuntor do barramento “C” não opere, o relé, depois de um certo tempo, enviará o comando de abertura de disjuntor na barra “A” devido à proteção da zona 3. Sendo assim, o relé instalado na barra “A” funciona como proteção de retaguarda para eventuais falhas nos trechos “BC” e CD”. A zona 1, ou zona de atuação instantânea, não protege 100% do trecho “AB”, pois caso haja uma falta no barramento “B”, o relé de proteção que deve atuar instantaneamente é aquele instalado no próprio barramento “B” (principal), e não o que está situado no barramento “A”. Então para que se mantenha a seletividade de atuação entre os relés, o ajuste da zona instantânea é mantido em 80% do trecho principal.

O ajuste do relé para as zonas temporizadas geralmente é feito da seguinte maneira: a proteção de retaguarda da segunda zona deve atuar 0,5 segundos após a ocorrência da falta, e a proteção da terceira zona atua 1 segundo após a ocorrência da falta. A Tabela 2 esclarece todas as informações supracitadas.

Tabela 2: Valores usuais de alcance e tempo de atuação das zonas do relé de distância

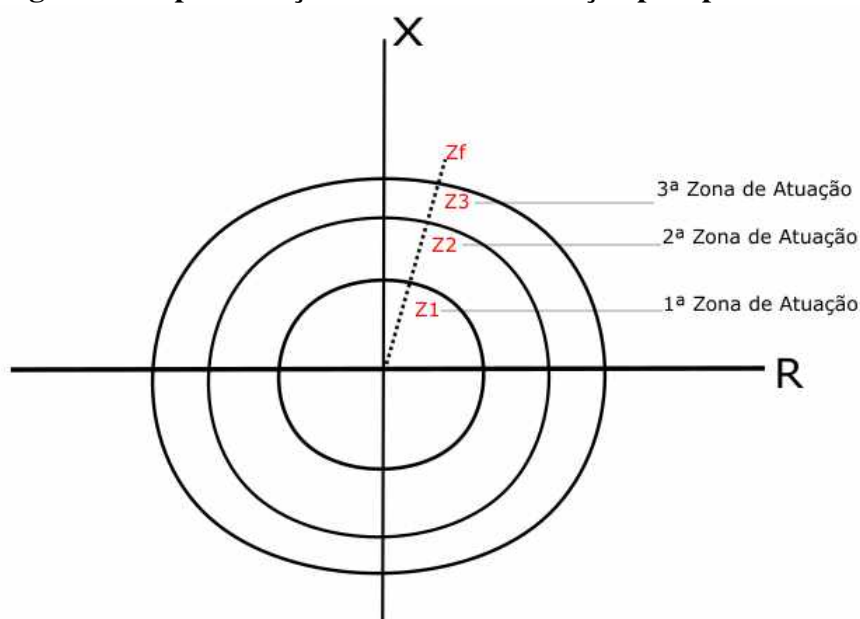
Zona	Alcance	Tempo de atuação
Z1	80% a 90% de “AB”	Instantâneo
Z2	“AB” + 20% a 75% de “BC”	0,5 segundos
Z3	“AB”+“BC”+“CD”	1 segundo

Fonte: KINDERMANN (2008)

3.2 PLANO R-X

Para melhor compreensão do funcionamento do relé de distância, bem como as peculiaridades das zonas de proteção, tem-se o plano R-X (Figura 8). Trata-se de um gráfico bidimensional que mostra, a depender da falta, por qual zona de atuação o relé é acionado. As zonas de proteção são representadas por círculos concêntricos, onde seus raios correspondem aos seus respectivos alcances.

Figura 8: Representação das zonas de atuação pelo plano R-X



Fonte: O autor

Quando a linha de transmissão opera em condições normais, a impedância vista pelo relé é a impedância da carga alimentada, somada à impedância da linha. Sendo assim, deve-se fazer uma soma vetorial para determinar a impedância vista pelo relé, e então representá-la no plano R-X com seu módulo e ângulo.

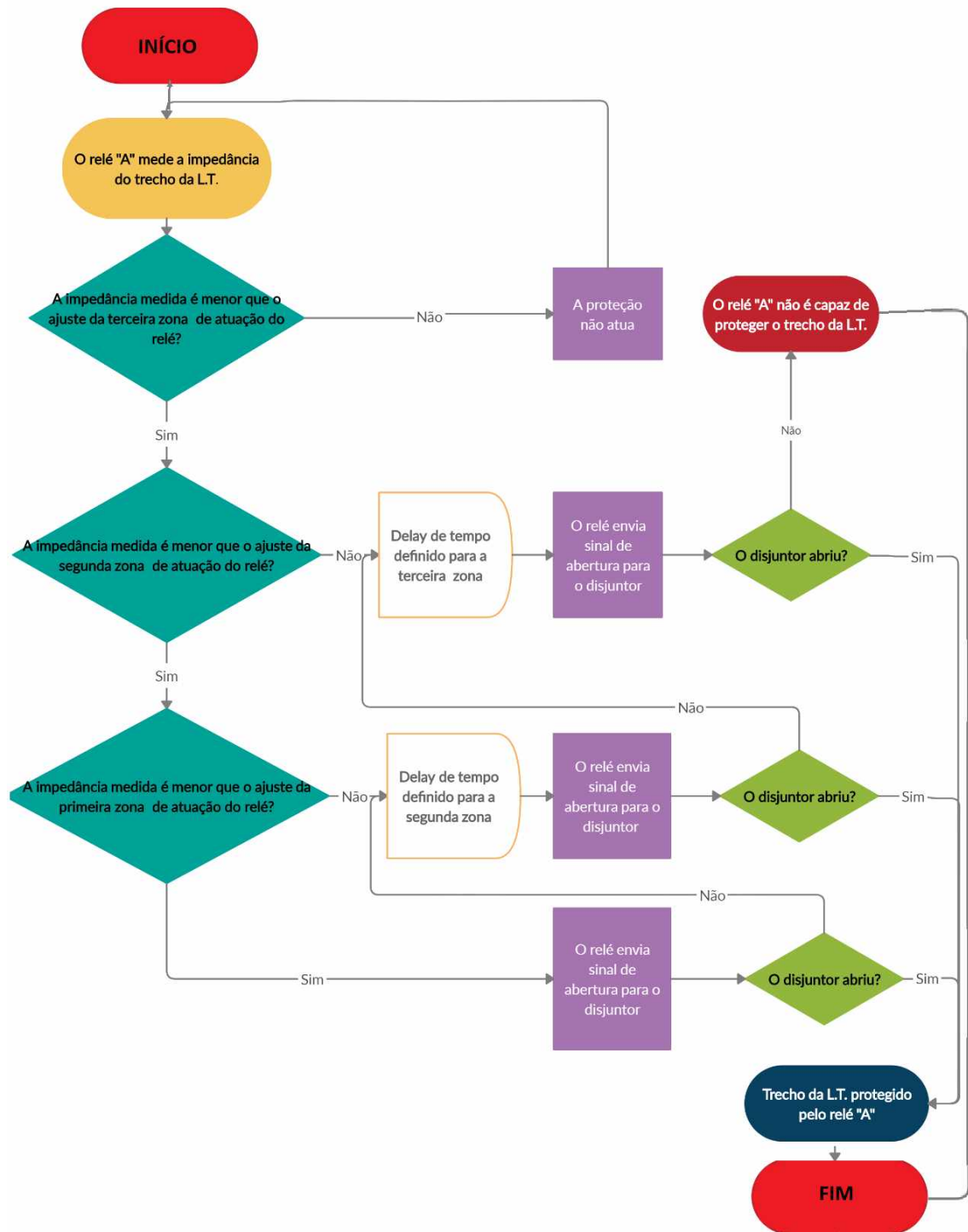
Como já exposto anteriormente, no decorrer de uma falta a impedância vista pelo relé diminui, pois o caminho elétrico se encurta e a carga deixa de ser alimentada, seja por uma fase (faltas fase-terra), duas fases (faltas fase-fase) ou até mesmo pelas três fases (curto-circuito trifásico), então um dos termos na soma vetorial de impedâncias deixa de existir. A impedância vista pelo relé então é projetada no plano R-X como uma reta fixada na origem, e a magnitude e o ângulo da impedância determinam o ponto final dessa reta. Caso a mesma seja abrangida por alguma zona de atuação, o relé envia um sinal de abertura ao disjuntor para efetuar a proteção.

Para uma falta ocorrida na primeira zona, o relé atua instantaneamente pelo ajuste da zona Z1. Caso ocorra uma falta na segunda zona, a zona Z1 não detectará a falha, uma vez que a falta estará fora de sua zona de atuação, sendo assim, o relé atua após 0,5 segundos pelo ajuste da zona temporizada Z2.

Por fim, caso ocorra uma falta na terceira zona, as zonas Z1 e Z2 não detectam a falta e o relé atua apenas depois de 1 segundo, pelo ajuste da zona Z3.

Todo processo descrito no parágrafo anterior pode ser representado pelo fluxograma da Figura 9.

Figura 9: Fluxograma da lógica de atuação do relé



Fonte: O autor.

3.3 PROTEÇÃO DE RETAGUARDA

A grande vantagem das múltiplas zonas de atuação é justamente a possibilidade de garantir uma proteção de retaguarda. Tal forma de proteção garante uma maior confiabilidade ao sistema de transmissão, pois garante redundância na proteção. Assim, na falha de atuação do disjuntor principal, o disjuntor do barramento anterior atuará pela sua zona de proteção temporizada (vide Figura 7).

Posto isso, é possível vislumbrar a importância do correto ajuste do relé de impedância, uma vez que o ajuste errôneo pode ocasionar situações de atuação em zonas inadequadas, ou até mesmo situações de não atuação. Então, para tanto, é necessário que haja um cuidado especial com a aferição correta da impedância da linha de transmissão, uma vez que tal grandeza é o parâmetro base do ajuste do relé. Diante de tal cenário, resta ao próximo capítulo a explicação de como a impedância da linha de transmissão é alterada através do efeito térmico.

4 O EFEITO TÉRMICO

4.1 RELAÇÃO CALOR-TEMPERATURA

Essa subseção baseia-se no método de cálculo da ampacidade de um condutor em função do balanço de calor do mesmo, proposto na obra de House e Tuttle (1958). Posteriormente, tal padrão foi adotado pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE).

Para montar a equação do balanço de calor de um condutor, é necessário ter conhecimento das principais formas as quais o condutor perde calor, bem como as formas as quais ele ganha calor. No padrão adotado pelo IEEE, representa-se os ganhos de calor do lado esquerdo da igualdade, enquanto as perdas ficam do lado direito da equação (IEEE. . . , 2013).

$$q_j + q_s = q_c + q_r \quad (11)$$

Onde:

- q_j representa o ganho de calor devido ao efeito Joule;
- q_s representa o ganho de calor por radiação solar;
- q_c representa a perda de calor por convecção forçada e;
- q_r representa a perda de calor por irradiação.

Ressalta-se que calor é classificado como energia térmica e, no Sistema Internacional (SI), sua unidade de medida é J (Joule). Energia e potência elétrica são grandezas que se relacionam através do tempo, tal relação se dá da seguinte maneira:

$$[W] = \frac{[J]}{s} \quad (12)$$

4.1.1 GANHO DE CALOR DEVIDO AO EFEITO JOULE – q_j

Como visto na subseção 2.1, o fluxo de corrente elétrica ocasiona perdas Joulicas sobre um condutor, e tal perda é a dissipação de potência elétrica na forma de calor (EISBERG; LERNER, 1983). Então, a simples circulação de corrente elétrica num condutor, provoca no mesmo o ganho de calor por efeito Joule.

Para calcular esse ganho de calor, tem-se a Equação 13.

$$q_j = I^2 \times R \quad (13)$$

Da Equação 13, infere-se que, quanto maior a magnitude da corrente elétrica que circular sobre o condutor, maior será o ganho de calor por efeito Joule.

Assim, isolando-se a corrente, e substituindo (13) em (11), tem-se a equação da corrente elétrica em função do fluxo de calor (Equação 14).

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R}} \quad (14)$$

4.1.2 GANHO DE CALOR POR RADIAÇÃO SOLAR – q_s

Este ganho de calor está diretamente ligado à absorção solar do material condutor. O cálculo do ganho de calor, conforme a norma IEEE... (2013), se dá através da Equação 15.

$$q_s = \alpha \times Q_s \times D_0 \times \text{sen}(\theta) \quad (15)$$

Onde:

- α representa o fator de absorção solar – adimensional;
- Q_s representa o fluxo total de calor solar [W/m^2];
- D_0 representa o diâmetro do cabo condutor [m] e;
- θ relaciona informações geográficas da linha de transmissão, tais como o ângulo azimutal e o ângulo zenital [$^\circ$], explicado em sequência.

Conforme a norma IEEE... (2013), θ é calculado através da Equação 16.

$$\theta = \arccos[\cos(H_c) \times \cos(Z_c - Z_l)] \quad (16)$$

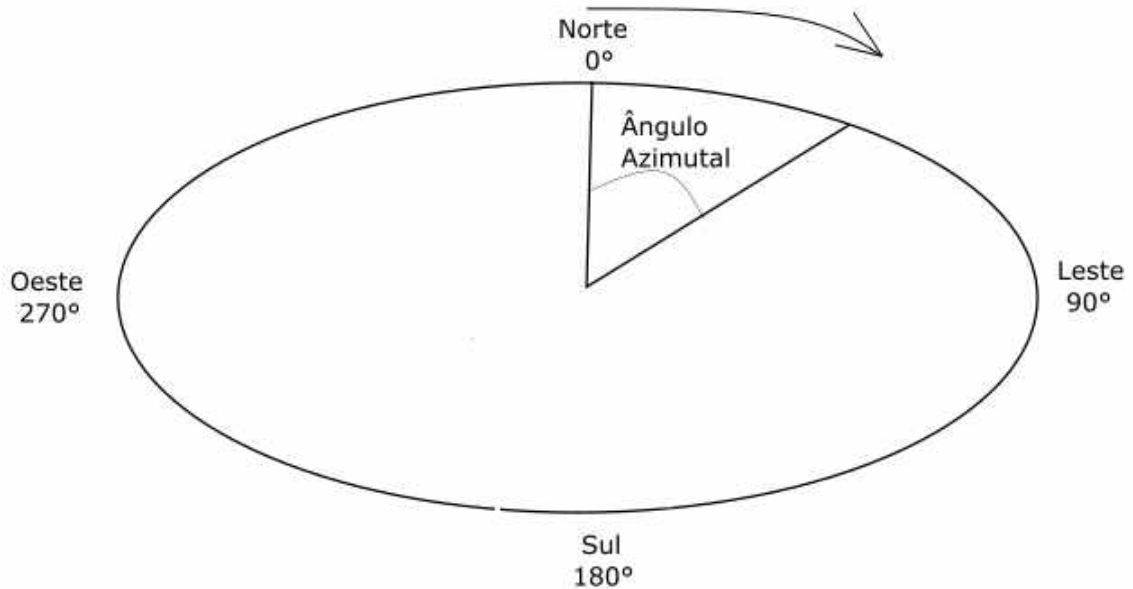
Onde:

- H_c é o ângulo de elevação solar [$^\circ$];
- Z_c é o ângulo de azimute do Sol [$^\circ$] e;
- Z_l é o ângulo de azimute da linha [$^\circ$].

Como exposto anteriormente, os ângulos H_c , Z_c e Z_l estão ligados à posição geográfica da linha de transmissão, bem como à sua disposição física no espaço. Assim sendo, o ganho de calor por absorção solar depende também do local onde a linha de transmissão está alocada.

O ângulo de azimute é calculado a partir de um ponto fixo, e o seu valor é medido no sentido horário a partir da referência, sendo ele o Norte astronômico. O ângulo de azimute solar depende exclusivamente da posição geográfica do observador, dado que é impossível alterar o movimento aparente do Sol. A Figura 10 ilustra perfeitamente como tal ângulo é medido.

Figura 10: Ângulo de Azimute

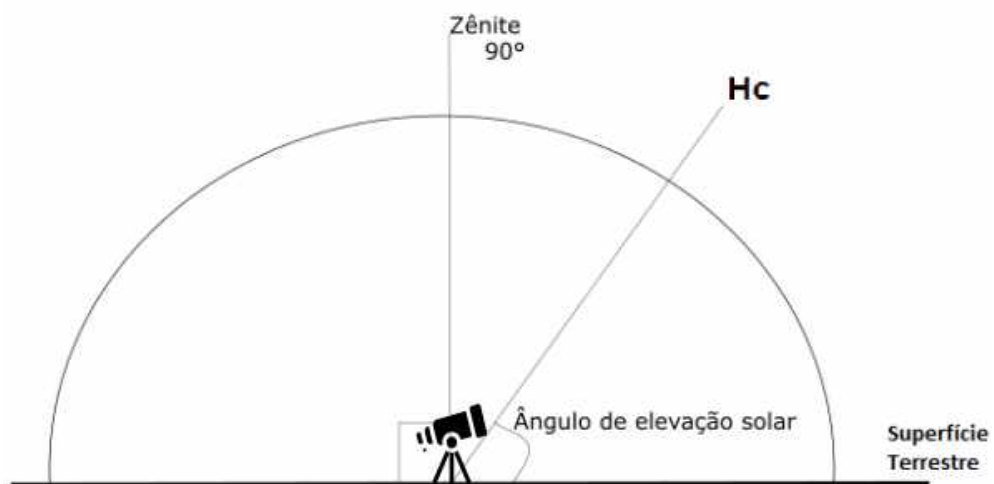


Fonte: O autor

O valor do ângulo azimutal da linha de transmissão, por sua vez, depende única e exclusivamente da sua disposição física no espaço, sendo assim, não existem fórmulas generalísticas para seu cálculo, uma vez que é ato discricionário do projetista dispor a respeito do arranjo espacial da linha de transmissão.

O ângulo de elevação solar, assim como o ângulo de azimute do Sol, depende diretamente da posição geográfica do observador. Ele é o complemento do ângulo zenital, ou seja, a soma entre o ângulo de elevação solar e o ângulo zenital resulta sempre 90° . A Figura 11 traz a representação do ângulo H_c .

Figura 11: Ângulo de Elevação Solar



Fonte: O autor

O ângulo de elevação solar (H_c), de acordo com IEEE... (2013), é calculado conforme a Equação 17.

$$H_c = \arcsen[\cos(Lat) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(Lat) \times \sin(\delta)] \quad (17)$$

Onde:

- Lat é a Latitude [$^\circ$];
- δ representa a declinação solar [$^\circ$] e;
- ω é o ângulo horário [$^\circ$].

Conforme a norma IEEE... (2013), o fator ω é a representação da hora do dia em graus, em que meio-dia corresponde a 0° , 11h00min corresponde a -15° , 13h00min corresponde a 15° , e assim por diante.

Ainda de acordo com IEEE... (2013) valor da declinação solar é calculado de acordo com a Equação 18.

$$\delta = 23.46 \times \sin\left[\frac{284 + N}{365} \times 360\right] \quad (18)$$

Onde:

- N representa o dia do ano.

Ressalta-se que, de acordo com a Equação 18, o valor da declinação solar pode variar de $\delta = -23,46^\circ$ a $\delta = 23,46^\circ$.

O ângulo de azimuth do Sol (Z_c), por sua vez, através da Equação 19.

$$Z_c = C + \arctan(\gamma) \quad (19)$$

Onde:

$$\gamma = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat) \times \cos(\omega) - \cos(Lat) \times \tan(\delta)} \quad (20)$$

A constante C é determinada de acordo com a Tabela 3:

Tabela 3: Constante do azimuth solar		
ω	C para $\gamma > 0^\circ$	C para $\gamma < 0^\circ$
$-180^\circ \leq \omega < 0^\circ$	0°	180°
$0^\circ \leq \omega < 180^\circ$	180°	360°

Fonte: IEEE... (2013)

Como pode-se observar, a Equação 15 depende do cálculo de θ , que por sua vez é calculado na Equação 16. O cálculo de θ depende diretamente dos ângulos H_c e Z_c . O cálculo de H_c (Equação 17) depende de variáveis tais como Latitude, ω e δ . O fator δ é calculado através da Equação 18, onde nota-se a importância da variável N , a qual representa o dia do ano. Por fim, o cálculo de Z_c se dá através da Equação 19, onde percebe-se a dependência da constante C (vide Tabela 3) e da variável γ . A variável γ é calculada a partir da Equação 20.

Sendo assim, fica evidente que todas as variáveis supracitadas estão completamente correlacionadas, e isso pode ser observado quando se adota um cenário padrão e varia-se apenas uma das variáveis. Tal teste foi feito e as Tabelas 4, 5 e 6 mostram o impacto de tais variáveis no cálculo de Z_c e H_c , e, por consequência, no cálculo de q_s .

Para a primeira situação (Tabela 4), considera-se a Latitude e o dia do ano (N) constantes, por consequência, o ângulo δ também é constante. O ângulo solar varia-se de $\omega = -75^\circ$ a $\omega = 75^\circ$, o que equivale uma variação horária de 07h00min às 19h00min.

Tabela 4: Situação 1

H_c [°]	Latitude [°]	δ [°]	ω [°]	N	γ [°]	Z_c [°]
12,938	-18,911	3,620085	-75	90	6,7202	81,5362
26,84664	-18,911	3,620085	-60	90	3,902752	75,62833
40,32638	-18,911	3,620085	-45	90	2,44653	67,7681
52,8618	-18,911	3,620085	-30	90	1,468301	55,74281
63,06249	-18,911	3,620085	-15	90	0,694057	34,76286
67,46892	-18,911	3,620085	0	90	0	0
63,06249	-18,911	3,620085	15	90	-0,69406	145,2371
52,8618	-18,911	3,620085	30	90	-1,4683	124,2572
40,32638	-18,911	3,620085	45	90	-2,44653	112,2319
26,84664	-18,911	3,620085	60	90	-3,90275	104,3717
12,938	-18,911	3,620085	75	90	-6,7202	98,4638

Fonte: O autor

A linha destacada evidencia uma situação retratada em todas as tabelas, onde o fator $N = 90$, o ângulo solar é $\omega = -15^\circ$ e a latitude é de $-18,911^\circ$.

Observa-se que a variável H_c possui valor máximo para $\omega = 0^\circ$ (meio-dia), e que tal ponto representa um eixo de simetria, ou seja: os valores à direita quanto à esquerda são simétricos. Então, H_c para $\omega = 15^\circ$ é idêntico à H_c para $\omega = -15^\circ$, e assim consecutivamente.

Já na segunda situação (Tabela 5, consideram-se fixos os seguintes fatores: a hora solar em $\omega = -15^\circ$ (11h00min), e a latitude em $-18,911^\circ$ (latitude da cidade de Uberlândia/MG). Os dias do ano variaram de 9 a 360.

Tabela 5: Situação 2

H_c [°]	Latitude [°]	δ [°]	ω [°]	N	γ [°]	Z_c [°]
75,58552	-18,911	-22,1837	-15	9	-3,56033	105,6886
75,77644	-18,911	-20,7402	-15	18	-5,72914	99,90102
75,80878	-18,911	-18,7999	-15	27	-28,7716	91,9906
75,49481	-18,911	-16,4093	-15	36	7,510893	82,41624
74,67028	-18,911	-13,6256	-15	45	3,090689	72,07089
73,25373	-18,911	-10,5155	-15	54	1,882915	62,02761
71,26863	-18,911	-7,15345	-15	63	1,331882	53,10014
68,81661	-18,911	-3,62008	-15	72	1,022176	45,62831
66,03422	-18,911	-5,7E-15	-15	81	0,826751	39,58227
63,06249	-18,911	3,620085	-15	90	0,694057	34,76286
60,03335	-18,911	7,153452	-15	99	0,599416	30,93914
57,06558	-18,911	10,51546	-15	108	0,529656	27,90821
54,26438	-18,911	13,62557	-15	117	0,4772	25,51049
51,72169	-18,911	16,40929	-15	126	0,437451	23,62704
49,51638	-18,911	18,79993	-15	135	0,40752	22,1719
47,71413	-18,911	20,74022	-15	144	0,385556	21,08446
46,36707	-18,911	22,18369	-15	153	0,370373	20,32327
45,51342	-18,911	23,09576	-15	162	0,361234	19,86144
45,17708	-18,911	23,45457	-15	171	0,357729	19,68359
45,36743	-18,911	23,25154	-15	180	0,359706	19,78397
46,07917	-18,911	22,49152	-15	189	0,367251	20,1658
47,2924	-18,911	21,19273	-15	198	0,380697	20,84168
48,97285	-18,911	19,38627	-15	207	0,400681	21,83503
51,07221	-18,911	17,11542	-15	216	0,428247	23,18287
53,52853	-18,911	14,43458	-15	225	0,465032	24,93994
56,26659	-18,911	11,40796	-15	234	0,513587	27,18443
59,19807	-18,911	8,108065	-15	243	0,57794	30,02532
62,22149	-18,911	4,613946	-15	252	0,664657	33,61026
65,22187	-18,911	1,009302	-15	261	0,784961	38,13053
68,07075	-18,911	-2,61952	-15	270	0,959392	43,81273
70,62883	-18,911	-6,18559	-15	279	1,229396	50,87484
72,75606	-18,911	-9,60349	-15	288	1,691755	59,41257
74,33703	-18,911	-12,7913	-15	297	2,633626	69,208
75,32239	-18,911	-15,6728	-15	306	5,434471	79,57361
75,7643	-18,911	-18,1788	-15	315	107,5162	89,46711
75,80915	-18,911	-20,2493	-15	324	-7,20185	97,90516
75,64446	-18,911	-21,8348	-15	333	-3,92192	104,3043
75,44021	-18,911	-22,8972	-15	342	-2,99193	108,4813
75,31538	-18,911	-23,4111	-15	351	-2,68086	110,4563
75,32746	-18,911	-23,3643	-15	360	-2,70661	110,2775

Fonte: O autor

No segundo caso, notou-se que H_c assumiu valores máximos para $N = 27$ e $N = 324$, e valor mínimo para $N = 171$.

Finalmente, tem-se a situação onde o ângulo solar é constante em $\omega = -15^\circ$ (11h00min), o dia do ano é fixado em $N = 90$, e, por consequência, o ângulo δ é constante em $\delta = 3,62^\circ$. A latitude varia de -90° a 90° (Tabela 6).

Tabela 6: Situação 3

H_c [°]	Latitude [°]	δ [°]	ω [°]	N	γ [°]	Z_c [°]
3,620085	90	3,620085	-15	90	-0,26795	165
8,062234	85,4	3,620085	-15	90	-0,27024	164,8777
12,50081	80,8	3,620085	-15	90	-0,27435	164,6583
16,93363	76,2	3,620085	-15	90	-0,28043	164,3352
21,35821	71,6	3,620085	-15	90	-0,28868	163,8979
25,77163	67	3,620085	-15	90	-0,29941	163,3316
30,1703	62,4	3,620085	-15	90	-0,31308	162,6159
34,5497	57,8	3,620085	-15	90	-0,33028	161,7229
38,90392	53,2	3,620085	-15	90	-0,35187	160,6145
43,22506	48,6	3,620085	-15	90	-0,3791	159,2381
47,50222	44	3,620085	-15	90	-0,41379	157,5205
51,71986	39,4	3,620085	-15	90	-0,45872	155,3579
55,85519	34,8	3,620085	-15	90	-0,51835	152,6001
59,87362	30,2	3,620085	-15	90	-0,60023	149,0266
63,7208	25,6	3,620085	-15	90	-0,71833	144,3092
67,30884	21	3,620085	-15	90	-0,90152	137,9648
70,49363	16,4	3,620085	-15	90	-1,22068	129,3248
73,04589	11,8	3,620085	-15	90	-1,90872	117,6506
74,64651	7,2	3,620085	-15	90	-4,43983	102,6931
74,98772	2,6	3,620085	-15	90	13,35206	85,71684
73,98877	-2	3,620085	-15	90	2,669933	69,467
71,86995	-6,6	3,620085	-15	90	1,488594	56,10779
68,96722	-11,2	3,620085	-15	90	1,036613	46,02991
65,55858	-15,8	3,620085	-15	90	0,799123	38,62916
63,06249	-18,911	3,620085	-15	90	0,694057	34,76286
57,88632	-25	3,620085	-15	90	0,555934	29,07118
53,80425	-29,6	3,620085	-15	90	0,486391	25,93788
49,6244	-34,2	3,620085	-15	90	0,434802	23,49949
45,37476	-38,8	3,620085	-15	90	0,39541	21,57433
41,07405	-43,4	3,620085	-15	90	0,364717	20,03777
36,73526	-48	3,620085	-15	90	0,340481	18,80275
32,36763	-52,6	3,620085	-15	90	0,321206	17,80734
27,97798	-57,2	3,620085	-15	90	0,305861	17,00685
23,57145	-61,8	3,620085	-15	90	0,293722	16,36867
19,15206	-66,4	3,620085	-15	90	0,284271	15,86889
14,72304	-71	3,620085	-15	90	0,277138	15,49009
10,28706	-75,6	3,620085	-15	90	0,272065	15,21979
5,846442	-80,2	3,620085	-15	90	0,268875	15,04949
1,403266	-84,8	3,620085	-15	90	0,267462	14,97396
-3,62008	-90	3,620085	-15	90	0,267949	15

Fonte: O autor

Para a terceira situação, nota-se que o valor de H_c cresce conforme o módulo da Latitude se aproxima de zero e decresce conforme o módulo da Latitude se aproxima de 90° . Por outro lado, o valor de Z_c tem relação diretamente proporcional à Latitude.

4.1.3 PERDA DE CALOR POR CONVECÇÃO TÉRMICA – q_c

O fenômeno que causa a transferência de calor do cabo condutor para o ar, é denominada convecção térmica. Segundo a norma IEEE... (2013), ela pode ocorrer de duas formas distintas, sendo por convecção natural ou forçada.

Para situações sem vento, a Equação 21 é utilizada para calcular a convecção natural.

$$q_{cn} = 3,645 \times \rho_f^{0,5} \times D_o^{0,75} \times (T_s - T_a)^{1,25} \quad (21)$$

Onde:

- ρ_f é a densidade do ar [Kg/m^3];
- D_o é o diâmetro do condutor [m];
- T_s é a temperatura do cabo condutor [$^{\circ}C$] e;
- T_a é a temperatura ambiente [$^{\circ}C$].

Entretanto, quando o cabo condutor é resfriado por vento, ocorre a convecção forçada. Segundo a norma IEEE... (2013), o vento influencia diretamente no cálculo do Número de Reynolds (N_{Re}), que por sua vez, é utilizado no cálculo da perda de calor por convecção forçada.

$$N_{Re} = \frac{D_o \times \rho_f \times V_w}{\mu_f} \quad (22)$$

Onde:

- μ_f é a viscosidade dinâmica do ar [Kg/ms] e;
- V_w é a velocidade do vento [m/s].

A norma propõe duas fórmulas distintas para se calcular a perda de calor por convecção forçada, uma para velocidade de vento alta (Equação 24), e outra para velocidade de vento baixa (Equação 23). São elas:

$$q_{c1} = K_a \times [1,01 + 1,35 \times N_{Re}^{0,52}] \times k_f \times (T_s - T_a) \quad (23)$$

$$q_{c2} = K_a \times 0,754 \times N_{Re}^{0,6} \times k_f \times (T_s - T_a) \quad (24)$$

Onde:

- K_a é um fator calculado a partir do ângulo de incidência do vento – adimensional e;
- k_f é o coeficiente da condutividade térmica do ar [$W/m^{\circ}C$].

Conforme a norma IEEE... (2013), o fator K_a é calculado da seguinte forma:

$$K_a = 1,194 - \cos(\phi) + 0,194 \times \cos(2\phi) + 0,368 \times \sin(2\phi) \quad (25)$$

Onde:

- ϕ denota o ângulo entre o eixo do cabo condutor e o vento incidente horizontalmente [°].

Segundo a norma, a Equação 23 traz resultados satisfatórios para baixas velocidades de vento, mas subestima as perdas de calor por convecção forçada para altas velocidades de vento. De maneira análoga, a Equação 24 traz resultados satisfatórios para altas velocidades de vento, mas subestima a perda de calor em situações de velocidades baixas.

Salienta-se que a norma não definiu a faixa de velocidades de vento adequada para cada uma das duas equações, isto é, não foi especificado o que é vento de velocidade alta, e o que é vento de velocidade baixa.

Sendo assim, coube ao autor igualar as Equações 23 e 24 para determinar qual é a velocidade de vento (V_w) que se adequa às duas equações.

$$q_{c1} = q_{c2} \quad (26)$$

$$K_a \times [1,01 + 1,35 \times N_{Re}^{0,52}] \times k_f \times (T_s - T_a) = K_a \times 0,754 \times N_{Re}^{0,6} \times k_f \times (T_s - T_a) \quad (27)$$

$$1,01 + 1,35 \times \left(\frac{D_o \times \rho_f \times V_w}{\mu_f} \right)^{0,52} = 0,754 \times \left(\frac{D_o \times \rho_f \times V_w}{\mu_f} \right)^{0,6} \quad (28)$$

A solução da Equação 28 traz uma velocidade de vento (V_w) igual à $1,25m/s$. Portanto, conclui-se que velocidades de vento superiores à $1,25m/s$ são consideradas velocidades altas, e se enquadram na Equação 24. Analogamente, velocidades abaixo desse marco são consideradas velocidades baixas, e se enquadram na Equação 23.

Analisando as Equações 23 e 24, fica evidente que os dois principais fatores que responsáveis pela perda de calor por convecção forçada são: (a) a velocidade do vento e; (b) seu ângulo de incidência em relação ao eixo do cabo condutor.

4.1.4 PERDA DE CALOR POR IRRADIAÇÃO – q_r

As perdas de calor por irradiação estão ligadas diretamente ao aspecto físico-construtivo do material condutor. Conforme a norma IEEE... (2013), o cálculo de tal perda de calor é feito conforme a Equação 29.

$$q_r = 17,8 \times \varepsilon \times D_o \times \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (29)$$

Onde:

- ε é a emissividade do material condutor – Adimensional;

De acordo com o estudo feito por Bockarjova e Andersson (2007), a emissividade (fator adimensional) do condutor nu aumenta conforme o tempo passa, sendo $\varepsilon = 1$ o maior valor possível. Essa situação máxima representaria um corpo totalmente negro, que não reflete luz. De maneira análoga, um valor de $\varepsilon = 0$ representaria um corpo espelhado, que não absorve luz alguma.

Tabela 7: Valores típicos de emissividade

Material	Emissividade (ε)
Alumínio polido	0,10
Alumínio bruto	0,68
Alumínio oxidado	0,85

Fonte: Pereira, Carvalho e Santos (2015)

Como pode ser observado na Tabela 7, o condutor já oxidado tem seu valor de emissividade mais elevado, isso se dá pelo fato da superfície se escurecer à medida em que o material se oxida.

4.2 RELAÇÃO TEMPERATURA-IMPEDÂNCIA

A impedância (Z) é uma grandeza elétrica que representa a dificuldade da passagem de corrente elétrica em um material condutor. Ao contrário de grandezas como tensão (V) e corrente (A), a impedância não é um fasor, apesar disso, ela é expressa como um número complexo, e na sua forma retangular, possui uma parte real e uma parte imaginária (NILSSON; RIEDEL, 2014).

$$Z = R + jX \quad (30)$$

Como exposto na Equação 30, a resistência (R) corresponde a parte real da impedância. Ela representa a dissipação de potência na forma de calor, que ocorre quando uma corrente elétrica percorre o condutor.

A reatância (X), por sua vez, corresponde a parte imaginária da impedância. Ela representa as perdas do fluxo magnético.

Conforme exposto na obra de Villate (2011), a resistência elétrica de um condutor é calculada a partir de três parâmetros, são eles: a resistividade do material condutor, a área da seção transversal do condutor e o comprimento total do cabo condutor.

A Equação 31 descreve como tais parâmetros influenciam no cálculo da resistência elétrica.

$$R = \rho \times \frac{L}{A} \quad (31)$$

Onde:

- R é a resistência do condutor [Ω];
- ρ é o valor da resistividade elétrica do condutor [$\Omega.m$];
- L é o comprimento do cabo condutor [m] e;
- A é a área da seção transversal do cabo condutor [m^2].

A mudança de temperatura sobre um material provoca nele uma dilatação térmica, que age em 3 diferentes dimensões, sendo elas: a dilatação linear, a dilatação superficial, e por fim, a dilatação volumétrica.

Em cabos condutores, o efeito da dilatação linear é o mais impactante. Então, dependendo da diferença de temperatura que o cabo for submetido, o comprimento do mesmo pode expandir ou contrair. O grau de intensidade dessa dilatação depende do coeficiente de dilatação linear do material condutor.

Além disso, ao se alterar a temperatura de um material condutor, sua resistividade elétrica também é modificada (YOUNG; FREEDMAN, 2008). Isso ocorre pelo seguinte motivo: com o aumento da temperatura, as moléculas que compõem o material condutor aumentam seu grau de agitação, o que ocasiona uma maior dificuldade no fluxo de corrente elétrica, caracterizando assim um aumento na resistividade elétrica do condutor.

A Tabela 8 contém valores típicos de coeficiente de temperatura e resistividade para diversos materiais. Destaca-se que, para condução de corrente elétrica, comumente são utilizados cabos de Cobre e Alumínio, pois são de baixo custo e possuem uma baixa resistividade elétrica. Ademais, os coeficientes de temperatura desses materiais são praticamente idênticos.

Além disso, é possível observar o valor negativo do coeficiente de temperatura de alguns materiais da Tabela 8, tais como Germânio e Silício. Isso significa que o aumento da temperatura desses materiais provoca uma diminuição em sua resistência elétrica.

Tabela 8: Valores de resistividade e coeficiente de temperatura para diversos materiais a 25°C

Material	Resistividade $\rho [10^{-8} \Omega m]$	Coeficiente de Temperatura $\alpha [K^{-1}]$
Prata	1,6	0,0038
Cobre	1,7	0,0040
Ouro	2,4	0,0039
Alumínio	2,8	0,0039
Tungstênio	5,6	0,0048
Zinco	5,9	0,0038
Bronze	6,7	0,0020
Latão	8,0	0,0015
Níquel	8,7	0,0047
Platina	10,8	0,0049
Estanho	11,5	0,0042
Ferro	12,0	0,0050
Constantan	50,0	0,0002
Mercúrio	96,0	0,0009
Nicromo	110,0	0,0001
Carbono (Grafite)	$(3 - 60) \times 10^3$	-0,0005
Germânio	$(1 - 500) \times 10^5$	-0,0500
Silício	$(0,1 - 60)$	-0,0700

Fonte: Adaptado de Santos (2020)

Como exposto em Poisl (2008), o coeficiente de temperatura é calculado conforme a Equação 32.

$$\alpha = \frac{1}{R_{T_o}} \times \frac{R_{T_f} - R_{T_o}}{T_f - T_o} \quad (32)$$

Isolando-se o termo R_{T_f} , tem-se:

$$R_{T_f} = R_{T_o} \times [1 + \alpha \times (T_f - T_o)] \quad (33)$$

Onde:

- R_{T_f} é a resistência do material à temperatura final $[\Omega]$;
- R_{T_o} é a resistência do material à temperatura inicial $[\Omega]$;
- α é o valor do coeficiente de temperatura do material $[K^{-1}]$;
- T_f é o valor da temperatura final do material em Kelvin $[K]$ e;
- T_o é o valor da temperatura inicial do material em Kelvin $[K]$.

Salienta-se que os dados de temperatura devem ser preferencialmente manipulados em Kelvin, porém, como o cálculo da resistência é feito a partir da variação de temperatura, não é errado utilizar graus Celsius nas operações, pois $\Delta ^\circ\text{C} = \Delta K$.

4.3 INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NA TEMPERATURA FINAL DO CONDUTOR: UMA ANÁLISE PRÁTICA

Nessa subseção, o objetivo principal é explicar como os parâmetros expostos anteriormente alteram a temperatura final do condutor. Para isso, adota-se um cenário base com parâmetros pré-definidos, e calcula-se uma temperatura final padrão, conforme feito em IEEE... (2013).

A partir disso, altera-se as variáveis do cenário base, uma a uma, para se ter noção do real impacto na temperatura que tais variáveis causam. O cenário padrão é visto na Tabela 9.

Tabela 9: Valores dos parâmetros para o cenário padrão

Parâmetro	Magnitude	Unidade [SI]
Corrente (I)	300	[A]
Velocidade do Vento (V_w)	0,61	[m/s]
Emissividade do cabo (ε)	0,8	—
Fator de absorção solar (α)	0,8	—
Temperatura ambiente (T_a)	25	[°C]
Diâmetro do cabo condutor (D_o)	0,0281	[m]
Resistência a 25°C (R_{25})	$7,283 \times 10^{-5}$	[Ω/m]
Coeficiente de temperatura do alumínio (α_{Al})	0,0039	[K ⁻¹]
Azimute da linha (Z_l)	90	[°]
Elevação do condutor (H_e)	0	[m]
Densidade do ar (ρ_f)	1,029	[Kg/m ³]
Viscosidade absoluta do ar (μ_f)	$2,043 \times 10^{-5}$	[Kg/ms]
Condutividade térmica do ar (K_f)	0,02945	[W/m°C]
Ângulo de incidência do vento (ϕ)	90	[°]
Ângulo de altitude do Sol (H_c)	49	[°]
Fluxo total de calor irradiado pelo Sol (Q_s)	1027	[W/m]
Azimute do Sol (Z_c)	172,5	[°]

Fonte: O autor

Substituindo os valores da Tabela 9 nas equações 13, 15, 23 e 29, tem-se:

$$q_j = 7,283 \times 10^{-5} \times 300^2 = 6,55 \text{ W/m} \quad (34)$$

$$\theta = \arccos(\cos(49^\circ) \times \cos(172,5^\circ - 90^\circ)) = 85^\circ \quad (35)$$

$$q_s = 0,8 \times 1027 \times \sin(76,1^\circ) \times 0,0281 = 23 \text{ W/m} \quad (36)$$

$$q_c = 1 \times [1,01 + 1,35 \times 863,34^{0,52}] \times 0,02945 \times (T_s - 25) \quad (37)$$

$$q_r = 17,8 \times 0,0281 \times 0,8 \times \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{25 + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (38)$$

É possível calcular o valor base de T_s substituindo-se as Equações 34, 36, 37 e 38 em 11, resultando um valor de $T_s = 41,18 \text{ }^\circ\text{C}$.

Então, conforme a Equação 33, é possível determinar a resistência da linha de transmissão no cenário padrão, ou seja, a resistência da linha à temperatura de $T_s = 41,18 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$R_{41,18 \text{ }^\circ\text{C}} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (41,18 - 25)] = 7,7425 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (39)$$

Esse valor obtido na Equação 39 será usado como base de comparação para as próximas simulações. Os resultados simulados desta subseção foram obtidos no *software MATLAB*, e todos os códigos implementados estão expostos no Apêndice A.

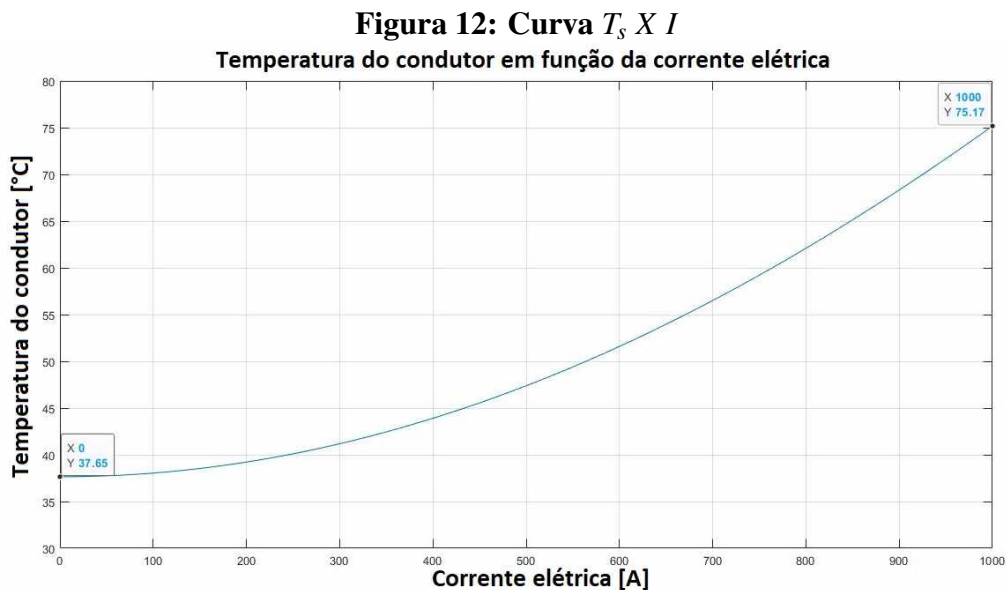
4.3.1 PARÂMETRO CORRENTE ELÉTRICA

Inicialmente, imputa-se à corrente elétrica (I) uma condição variável, enquanto mantém-se os valores padrões como constantes. Novamente, devido à Equação 11 é possível analisar o padrão de variação da temperatura final do condutor em função da corrente.

Os códigos computacionais desenvolvidos para efetuar os seguintes cálculos estarão disponibilizados no Apêndice A.

O comportamento da curva da Figura 12 condiz com a realidade, haja vista que quanto maior o valor da corrente elétrica, maior tende a ser a temperatura do cabo condutor.

Para esse caso em específico, variou-se a corrente elétrica de 0 a 1000A, e os resultados de temperatura obtidos foram, respectivamente: $37,65 \text{ }^\circ\text{C}$ e $75,17 \text{ }^\circ\text{C}$.



Fonte: O autor

A variação da resistência elétrica para tais valores de temperatura pode ser calculada da seguinte forma:

$$R_{37,65\text{ }^{\circ}\text{C}} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (37,65 - 25)] = 7,6423 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (40)$$

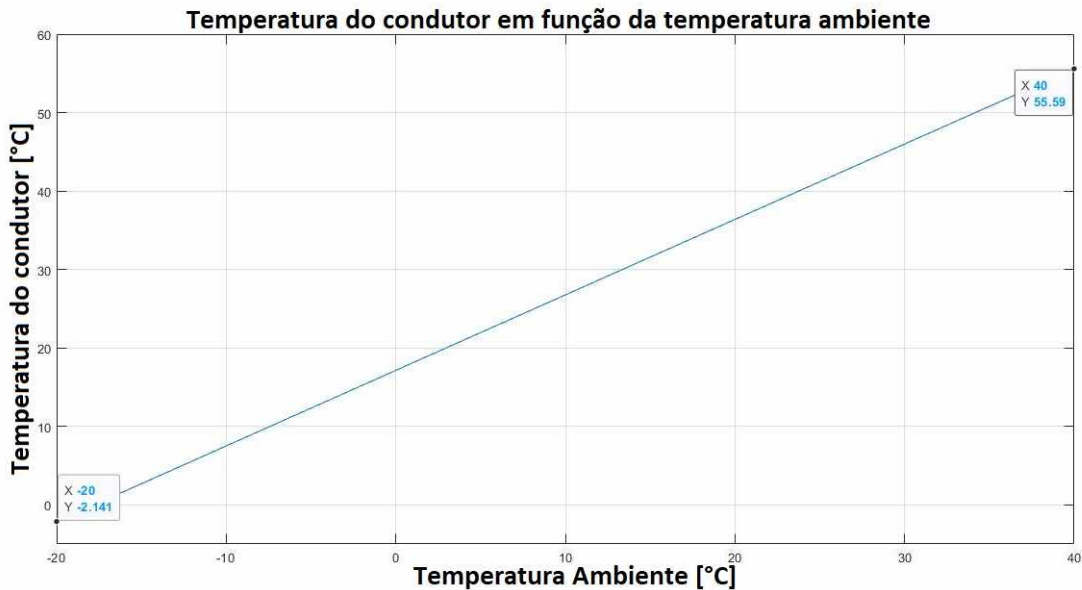
$$R_{75,17\text{ }^{\circ}\text{C}} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (75,17 - 25)] = 8,708 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (41)$$

Comparando tais valores com o resultado base — $R = 7,7403 \times 10^{-5} \Omega/m$ — obtido na Equação 39, nota-se um decréscimo de 1,26% para o primeiro caso, e um acréscimo de 12,5% no segundo caso.

4.3.2 PARÂMETRO TEMPERATURA AMBIENTE

Agora, a temperatura ambiente (T_a) será a nova variável. Novamente, o cálculo da temperatura final do condutor em função da temperatura ambiente é possível devido a Equação 11. Na simulação realizada, variou-se T_a de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, conforme a Figura 13, os resultados de T_s obtidos foram, respectivamente, $-2,14\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $55,59\text{ }^{\circ}\text{C}$. O resultado obtido foi o esperado, uma vez que a temperatura do condutor e a temperatura ambiente tem relação linear, ou seja, a temperatura do condutor cresce na mesma intensidade da temperatura ambiente.

Figura 13: Curva $T_s \times T_a$



Fonte: O autor

Tal mudança na temperatura provocou uma variação na resistência que pode ser calculada conforme as Equações 42 e 43.

$$R_{-2,14\text{ }^{\circ}\text{C}} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times ((-2,14) - 25)] = 6,5121 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (42)$$

$$R_{55,59\text{ }^{\circ}\text{C}} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (55,59 - 25)] = 8,1518 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (43)$$

Ao comparar tais valores com o resultado base, tem-se um decréscimo de 16% para o primeiro caso, e um acréscimo de 5,17% no segundo caso.

4.3.3 PARÂMETRO VELOCIDADE DO VENTO

A variável agora é a velocidade do vento (V_w). Utilizando a Equação 11, calcula-se o impacto da variação de V_w na temperatura final do condutor. Esse cálculo não é de natureza trivial, pois a cada faixa de velocidade do vento, tem-se uma equação diferente de q_c (como exposto na Subseção 4.1.3), sendo uma equação para condição sem vento (Equação 21), uma equação para a faixa de ventos brandos (Equação 23) e, por fim, uma equação para a faixa de ventos intensos (Equação 24).

Inicialmente, calcula-se a temperatura do cabo condutor para uma condição sem vento. O resultado obtido foi de $T_s = 52,67\text{ }^{\circ}\text{C}$. O valor constante já era esperado, haja vista que se trata de uma equação com apenas uma variável (T_s). Também já era esperado um elevado valor de temperatura T_s , uma vez que não há uma convecção forçada de calor. Nota-se que quanto maior a velocidade do vento, maior será a perda de calor por convecção forçada, e por consequência, menor será a temperatura do condutor.

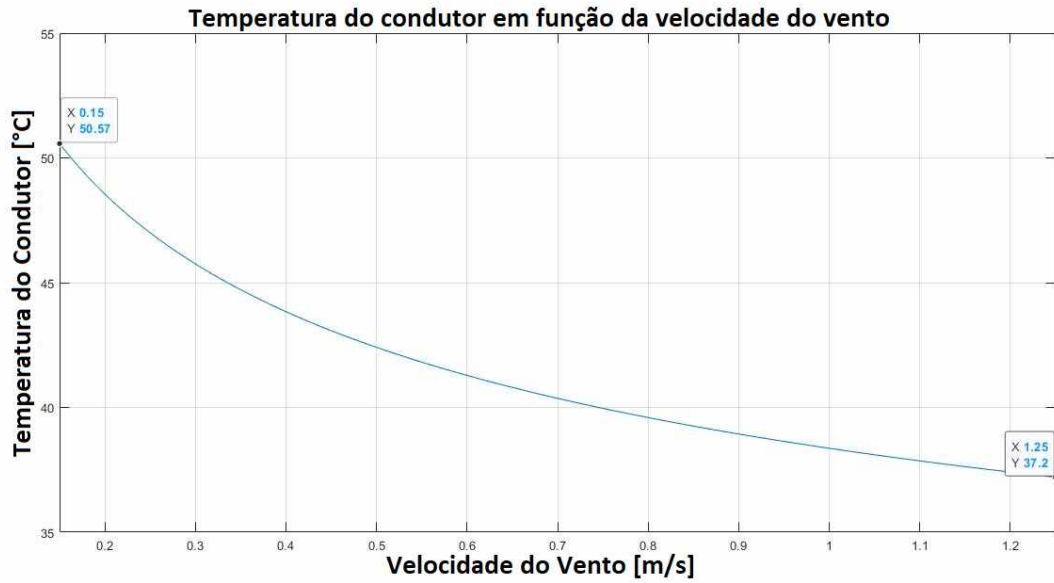
A essa temperatura, a resistência do condutor é calculada conforme a Equação 44.

$$R_{52,67\text{ }^{\circ}\text{C}} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (52,67 - 25)] = 8,0689 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (44)$$

Esse resultado representa um acréscimo de 4,24% ao valor base de resistência.

A seguir, fez-se a mesma análise para uma condição de ventos leves. Nessa situação, a faixa de variação da velocidade do vento foi de $V_w = 0,15\text{ m/s}$ a $V_w = 1,25\text{ m/s}$. Logicamente, quanto mais intenso o vento, menos quente será a superfície do cabo condutor, então a temperatura do cabo condutor varia à uma proporção inversa da velocidade dos ventos.

Os valores obtidos na simulação, conforme a Figura 14, foram de $T_s = 50,57\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_s = 37,20\text{ }^{\circ}\text{C}$, para as condições de $V_w = 0,15\text{ m/s}$ e $V_w = 1,25\text{ m/s}$, respectivamente. Nota-se que uma pequena variação de V_w provocou uma grande variação em T_s .

Figura 14: Curva $T_s \times V_w$ - Ventos Leves

Fonte: O autor

Novamente, tal variação de temperatura modifica a resistência do condutor da seguinte maneira:

$$R_{50,57\text{ °C}} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (50,57 - 25)] = 8,0092 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (45)$$

$$R_{37,20\text{ °C}} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (37,20 - 25)] = 7,6295 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (46)$$

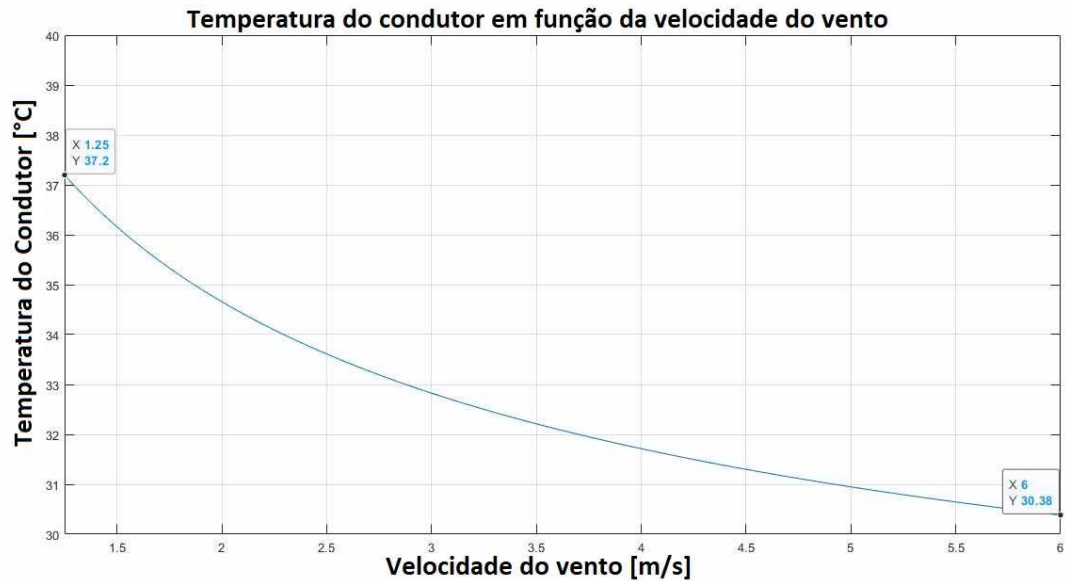
Os valores obtidos representam, respectivamente, um acréscimo de 3,47% e um decréscimo de 1,43% ao valor base de resistência calculado na Equação 39.

Finalmente, tem-se a situação de ventos intensos, que estão na faixa de $V_w > 1,25\text{ m/s}$. Agora, a variação de V_w foi muito mais brusca que a da situação retratada na Figura 14, entretanto, a variação de T_s foi pouco expressiva. De acordo com a Figura 15, V_w foi variado de $1,25\text{ m/s}$ à $6,00\text{ m/s}$, enquanto a temperatura T_s foi apenas de $37,20\text{ °C}$ a $30,38\text{ °C}$.

A resistência equivalente para cada uma dessas situações é de:

$$R_{37,20\text{ °C}} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (37,20 - 25)] = 7,6295 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (47)$$

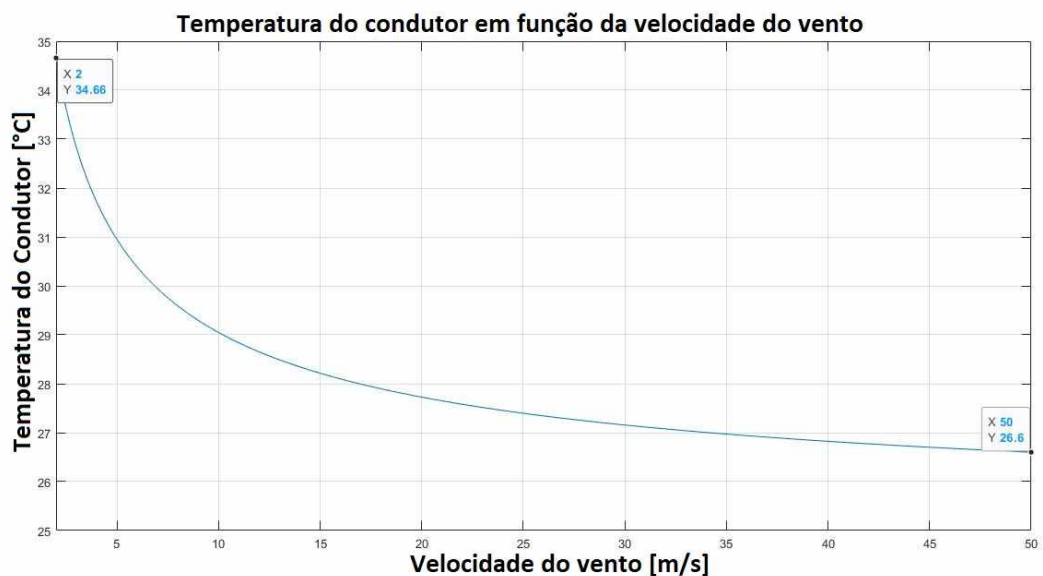
$$R_{30,38\text{ °C}} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (30,38 - 25)] = 7,4358 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (48)$$

Figura 15: Curva $T_s \times V_w$ - Ventos Intensos

Fonte: O autor

Comparando tais resultados ao cenário base, tem-se um decréscimo na resistência de 1,43% no primeiro caso, e um decréscimo de resistência de 3,93% no segundo caso.

Nota-se a condição $T_s = T_a$ é assintótica, ou seja, não importa quão intenso seja V_w , T_s tenderá ao valor de 25 °C. Isso pode ser comprovado na Figura 16, onde utilizou-se uma variação absurda de V_w para calcular T_s .

Figura 16: Curva $T_s \times V_w$ - Situação Extrapolada

Fonte: O autor

Para essa situação absurda, a velocidade do vento foi variada de $2m/s$ até $50m/s$, ou seja, houve um acréscimo de cerca de 250% na variável V_w . Contudo, a variação percebida na temperatura T_s foi irrisória, passando de $34,60^\circ C$ para $26,60^\circ C$ (um decréscimo de aproximadamente 23%). Dessa forma, infere-se que a partir de determinado valor para V_w , qualquer elevação de magnitude dessa variável causará um efeito pífio na variação da temperatura (T_s).

Representando os valores obtidos em resistência elétrica, tem-se:

$$R_{34,60^\circ C} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (34,60 - 25)] = 7,5556 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (49)$$

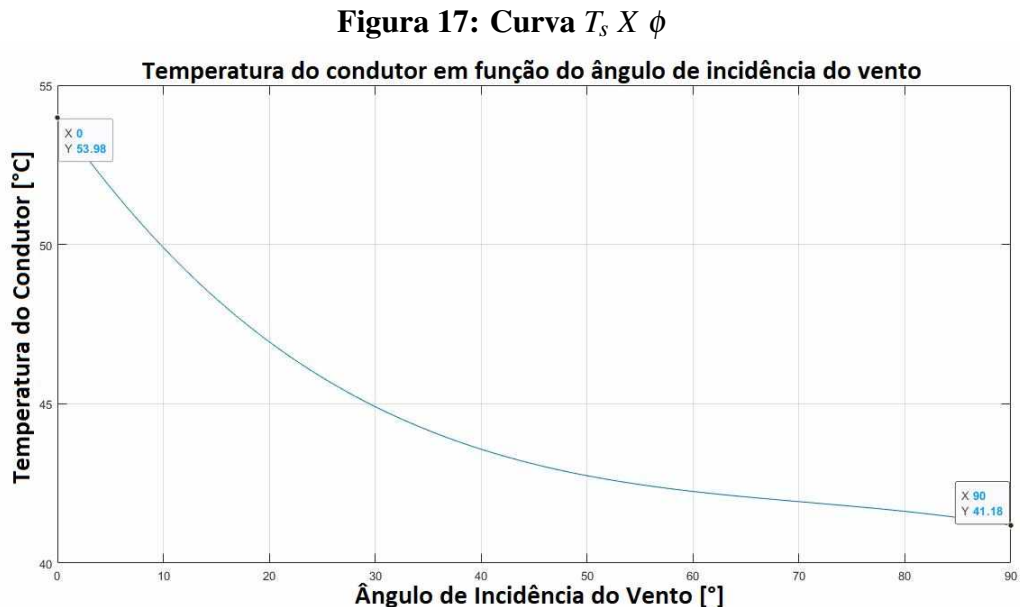
$$R_{26,60^\circ C} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (26,60 - 25)] = 7,3284 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (50)$$

Comparando tais resultados ao valor calculado no cenário base, tem-se, respectivamente, decréscimos de 2,38% e 5,32%.

4.3.4 PARÂMETRO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO

Analisa-se agora, a variação do ângulo de incidência do vento (ϕ) em relação ao eixo do cabo condutor. Essa variável influencia diretamente no cálculo do fator K_a . Por sua vez, esse fator é diretamente proporcional ao valor da perda de calor por convecção forçada (vide Equações 23, 24 e 25).

Conforme a Figura 17, variou-se o ângulo ϕ de 0° à 90° , e os valores de T_s obtidos foram, respectivamente, $53,9^\circ C$ e $41,1^\circ C$.



Fonte: O autor

O resultado obtido foi condizente com a realidade, uma vez que a temperatura T_s mínima obtida foi para a situação em que o vento incide perpendicularmente ao eixo do cabo condutor. Por sua vez, quando o vento incide paralelamente ao eixo do cabo condutor, a temperatura T_s atinge seu valor máximo. Tal fenômeno pode ser comprovado no cálculo do fator K_a , uma vez que valores de ϕ próximo a 0° resultam um baixo valor desse fator.

De acordo com a Equação 25, um ângulo $\phi = 0^\circ$ resulta num fator $K_a = 0,388$, e um ângulo $\phi = 90^\circ$ resulta num fator $K_a = 1$. De acordo com as Equações 23 e 24, quanto maior o valor de K_a , maior é o valor de q_c , ou seja, maior a perda de calor por convecção forçada, e, por consequência, menor será a temperatura do condutor T_s .

As resistências equivalentes estão dispostas nas Equações 51 e 52.

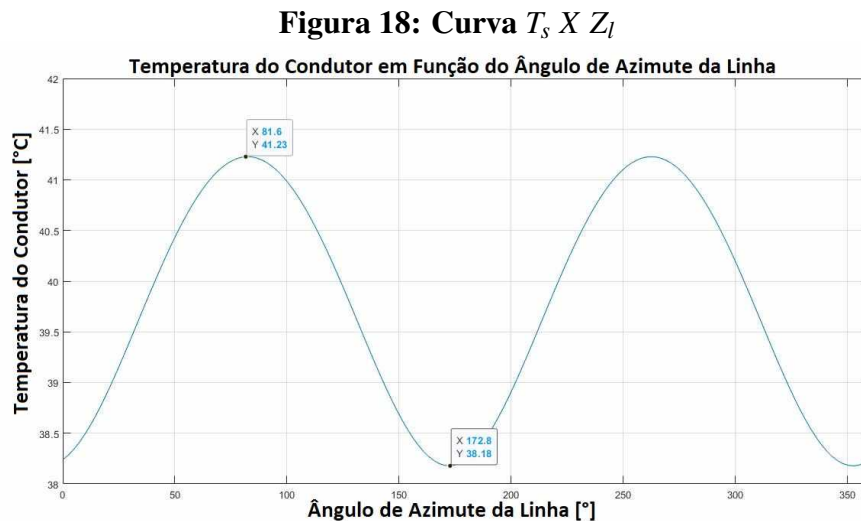
$$R_{53,90} \text{ } ^\circ\text{C} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (53,90 - 25)] = 8,1038 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (51)$$

$$R_{41,1} \text{ } ^\circ\text{C} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (41,1 - 25)] = 7,7403 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (52)$$

Ao se comparar os resultados obtidos com o valor de resistência no cenário base, tem-se: um acréscimo de 4,69% no primeiro caso, e no segundo caso o resultado obtido é exatamente o mesmo do cenário base, uma vez que $\phi = 90^\circ$ é um valor padrão fixado na Tabela 9.

4.3.5 PARÂMETRO ÂNGULO DE AZIMUTE DA LINHA

O ângulo de azimuth da linha influencia diretamente no cálculo de q_s , como pode ser observado nas Equações 15 e 16. A seguir, alterou-se a variável Z_l de 0° à 360° , ocasionando uma variação máxima de 3°C na temperatura do condutor, uma oscilação de temperatura de aproximadamente 7,4%. Conforme a Figura 18, a temperatura máxima foi de $T_s = 41,23^\circ\text{C}$ e a mínima $T_s = 38,18^\circ\text{C}$.



Fonte: O autor

As resistências equivalentes estão dispostas nas Equações 53 e 54.

$$R_{41,23}^{\circ\text{C}} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (41,23 - 25)] = 7,7439 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (53)$$

$$R_{38,18}^{\circ\text{C}} = 7,283 \times 10^{-5} \times [1 + 0,0039 \times (38,18 - 25)] = 7,6573 \times 10^{-5} \Omega/m \quad (54)$$

Os resultados obtidos representam, respectivamente, um acréscimo de 0,04% e um decréscimo de 1,07% ao valor base de resistência calculado na Equação 39.

Diante de todos efeitos térmicos expostos, faz-se necessário a implementação de um sistema que corrige a impedância da linha de transmissão utilizando os parâmetros supracitados como dados de entrada. O Capítulo 5 explica melhor o modo de operação do modelo desenvolvido.

5 MODELAGEM NO SIMULINK

A fim de verificar tais fenômenos na proteção, mais especificamente no funcionamento do relé de distância, fez-se uma modelagem na ferramenta *SIMULINK* do *software Matlab*. Todos os parâmetros e eventos estudados anteriormente foram postos em prática em diversas situações hipotéticas, das quais foi possível verificar a alteração da resistência da linha de transmissão, bem como a variação da precisão do relé de impedância. O modelo é comentado em sequência.

5.1 EXPLICAÇÃO GERAL DO MODELO

O modelo a seguir foi implementado com o objetivo de simular a lógica de atuação de um relé de distância.

Inicialmente, faz-se algumas importantes observações: optou-se por manter unitário os valores da Relação de Transformação de Potencial (RTP) e Relação de Transformação de Corrente (RTC), uma vez que tais parâmetros não influenciam na problemática proposta neste trabalho. Entretanto, como pode-se observar na Figura 19, o sistema foi projetado levando em consideração os possíveis valores de RTP e RTC, sendo assim, a escolha de se manter tais valores fixados em 1 foi devida à maior facilidade de compreensão dos resultados obtidos.

Para simular a ocorrência de uma falta, criou-se um bloco denominado "TESTE FALTA" que contém um valor numérico, representando a impedância da falta. O bloco "Tempo-Falta" é do tipo *time-step*, e, após dois segundos de simulação, ele envia um sinal para a chave comutadora, fazendo com que o bloco " Z_{falta} " assuma o valor contido em "TESTE FALTA".

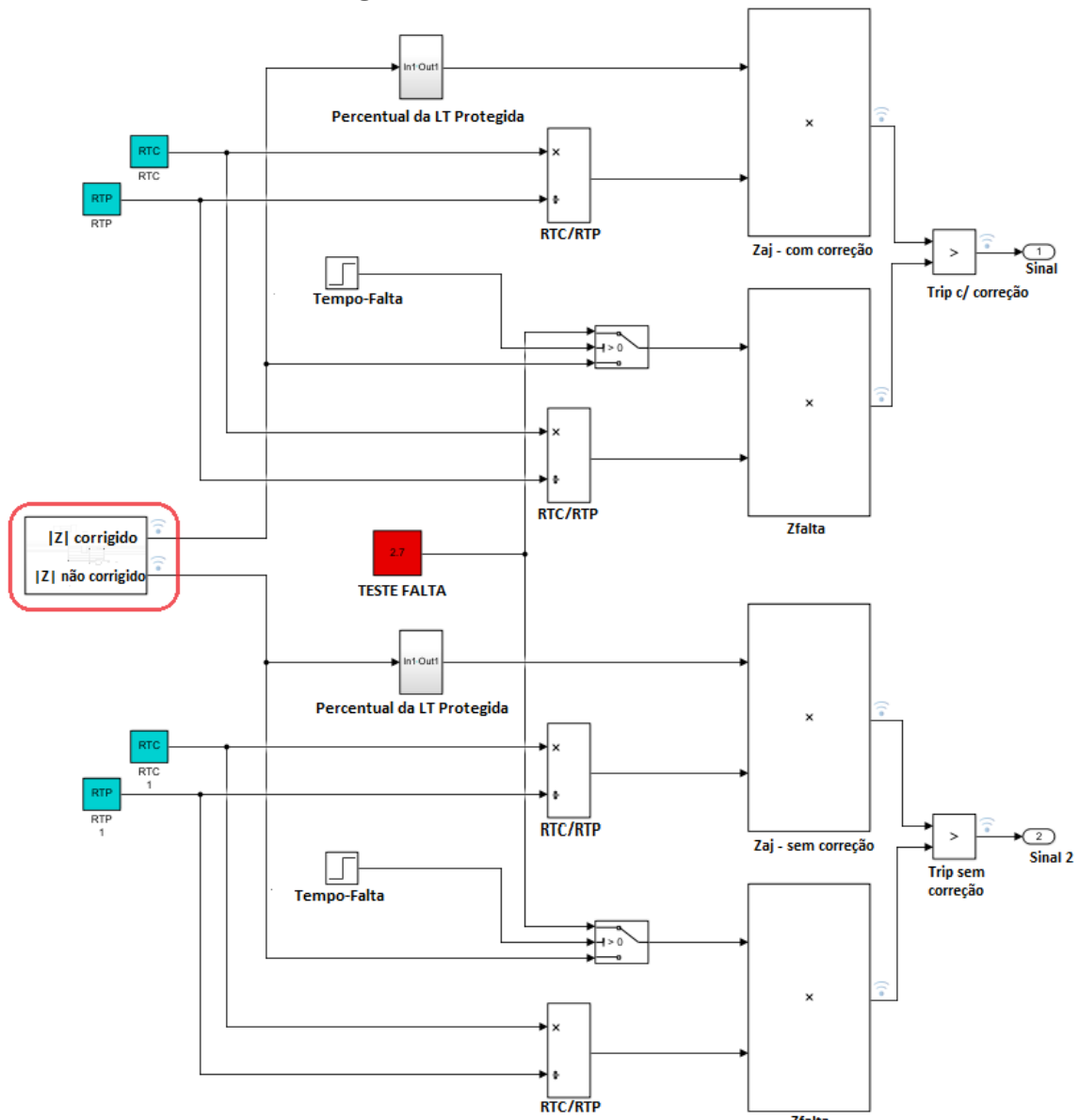
Então, o bloco " Z_{falta} " é comparado aos blocos " Z_{aj} — com correção" e " Z_{aj} — sem correção", esses blocos recebem os valores de impedância de ajuste, sendo o primeiro corrigido e o segundo original. Os responsáveis por fazer tais comparações são os blocos "Trip com correção" e "Trip sem correção", respectivamente. Em ambos os casos, caso o valor de " Z_{falta} " seja menor que " Z_{aj} — com correção" ou " Z_{aj} — sem correção", será enviado um sinal de *trip*.

Sendo assim, apenas para fins de comparação, dois sinais de *trip* serão enviados. Um do sistema corrigido, e outro do sistema original. Por esse motivo, na Subseção 5.2 é possível comparar a eficácia de atuação de um sistema corrigido frente à de um sistema não corrigido. Em uma situação real, apenas o sinal de *trip* corrigido seria enviado.

Os valores contidos em " Z_{aj} — com correção" e " Z_{aj} — sem correção", por sua vez, são provenientes do produto entre o bloco em destaque da Figura 19 e o bloco "Percentual da LT Protegida".

Para melhor compreensão do sistema descrito, tem-se a seguir Figura 19, com todos os blocos mencionados anteriormente.

Figura 19: Parte Geral do Modelo



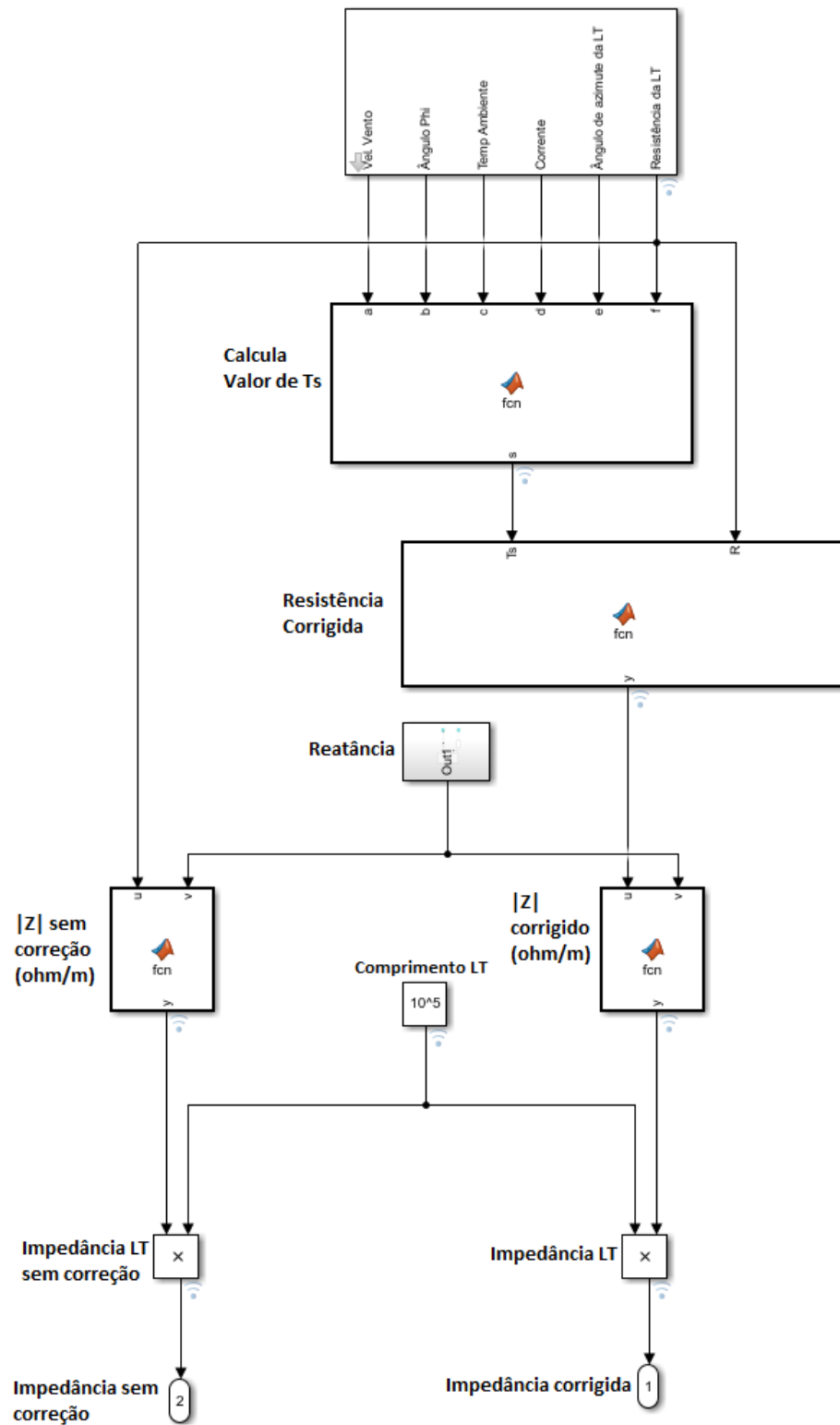
Fonte: O autor

Nota-se que o bloco em destaque é um subsistema responsável por enviar adiante os valores de impedância corrigido, bem como seu valor sem correção.

Os blocos "Percentual da LT Protegida" recebem os valores do módulo da impedância corrigido e sem correção. Neste bloco, esses valores são multiplicados pelo percentual da linha protegido.

Na Figura 20, tem-se o detalhamento do subsistema destacado na Figura 19.

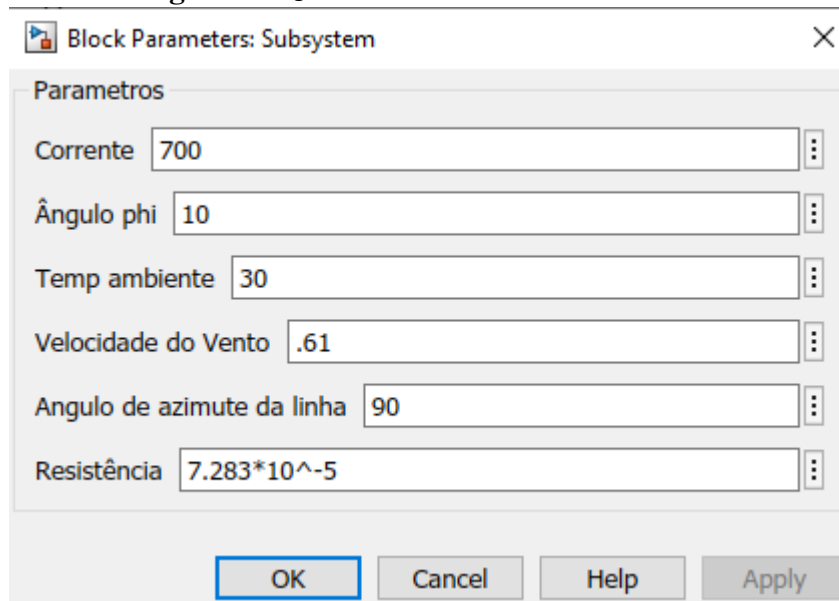
Figura 20: Subsistema Responsável Pela Correção



Fonte: O autor

Em relação à Figura 20, tem-se o *function block* denominado "Calcula Valor de T_S " que tem seis parâmetros de entrada — velocidade do vento, ângulo ϕ , temperatura ambiente, corrente elétrica, ângulo de azimute e resistência da linha de transmissão —, e um parâmetro de saída, a temperatura do condutor. O bloco utiliza o equacionamento previsto no Capítulo 4 para calcular tal temperatura. Os parâmetros de entrada são inseridos pelo operador, através de uma *mask* (Figura 21) desenvolvida no próprio ambiente *SIMULINK*.

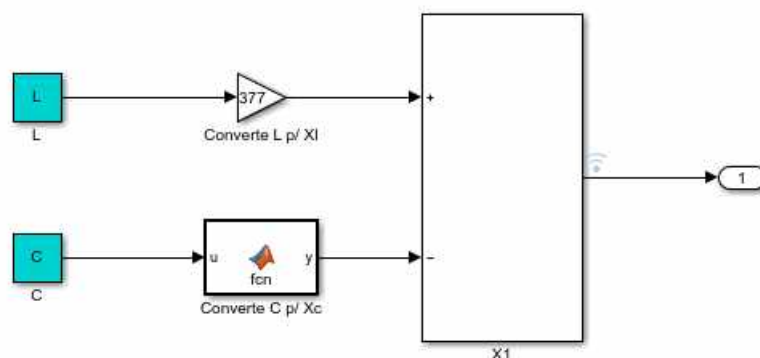
Figura 21: Janela Para Entrada de Valores



Fonte: O autor

Em seguida, tem-se o *function block* "Resistência Corrigida", que possui dois parâmetros de entrada: a temperatura do condutor, calculada no bloco anterior, e a resistência da linha de transmissão, dado inserido pelo operador. Seu parâmetro de saída é a resistência elétrica corrigida. Também na Figura 20, pode-se notar o subsistema "Reatância", que é melhor detalhado na Figura 22.

Figura 22: Subsistema Reatância



Fonte: O autor

Esse subsistema calcula a reatância indutiva e a reatância capacitiva através dos blocos "Converte L para X_L " e "Converte C para X_C ", respectivamente; e insere tais resultados no bloco "X1", que faz a soma vetorial entre as reatâncias.

Consequentemente, tem-se os *function blocks* " $|Z|$ sem correção (ohm/m)" e " $|Z|$ corrigido (ohm/m)".

O sinal de saída do subsistema "Reatância" serve como parâmetro de entrada para ambos, entretanto, o que os difere é justamente o outro parâmetro de entrada. Enquanto o primeiro bloco recebe o valor de resistência inserido pelo operador na *mask* (Figura 21), o segundo bloco recebe o valor de resistência calculado pelo *function block* "Resistência Corrigida".

Por fim, a saída do bloco "Comprimento LT" serve como parâmetro de entrada para os blocos "Impedância da LT sem correção" e "Impedância da LT", que também recebem como entrada, respectivamente, os parâmetros de saída dos blocos " $|Z|$ sem correção (ohm/m)" e " $|Z|$ corrigido (ohm/m)".

Sendo assim, após todas explicações, ao analisar-se a Figura 20, fica evidente como o subsistema destacado na Figura 19, consegue fornecer os valores de impedância corrigida da linha de transmissão, bem como o valor sem a devida correção.

Além disso, após todas as explicações contidas nesta subseção, ao apreciar-se novamente a Figura 19, é perfeitamente possível compreender como o modelo funciona, bem como as funções de cada um dos blocos utilizados na simulação.

Salienta-se que todos os códigos implementados nas *function blocks* deste sistema estão disponíveis no Apêndice B, ao final deste trabalho.

Na Subseção 5.2 será mostrado como o sistema se comportaria quando exposto à situações diversas. Essas diferentes circunstâncias advêm da gama de possibilidades de inserção de valores na *mask* da Figura 21.

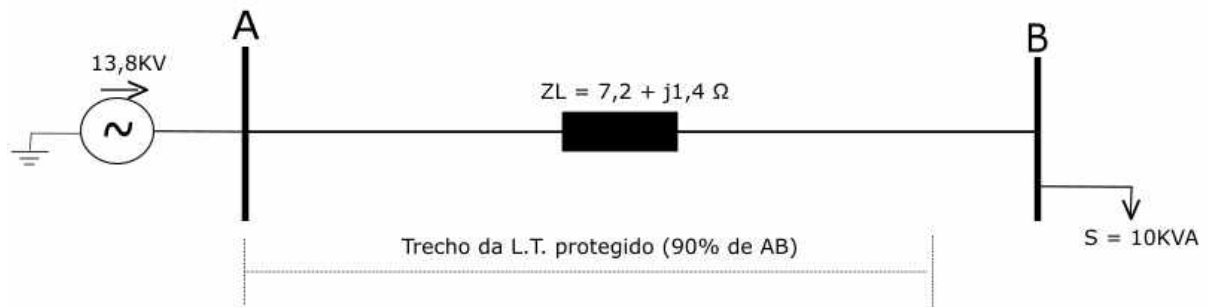
5.2 SIMULAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os parâmetros iniciais e fixos são:

- Resistência (R) = $7,283 \times 10^{-5} \text{ ohm/m}$;
- Reatância Indutiva (X_L) = $1,4 \times 10^{-5} \text{ ohm/m}$;
- Comprimento da Linha de Transmissão = 100 km ;
- Percentual da Linha de Transmissão protegido = 90% e;
- Ângulo de Azimute da Linha de Transmissão (Z_L) = 90° .

O diagrama unifilar do sistema analisado está representado na Figura 23.

Figura 23: Diagrama Unifilar



Fonte: O autor

A partir disso, foi possível analisar diferentes cenários ao variar-se parâmetros como velocidade do vento (V_w), temperatura ambiente (T_a), corrente elétrica (I), e ângulo de incidência dos ventos (ϕ). Como demonstrado no Capítulo 4, o aumento da magnitude da corrente elétrica e da temperatura ambiente são diretamente proporcionais ao aumento da temperatura do condutor, ou seja, ao se propor uma situação com uma elevada corrente elétrica e uma elevada temperatura ambiente, espera-se também um alto valor de temperatura do condutor. Por consequência, o aumento da temperatura do condutor provocaria também um aumento na resistência elétrica (vide Subseções 4.2 e 4.3).

Por outro lado, grandezas como velocidade do vento e ângulo de incidência dos ventos são inversamente proporcionais à temperatura do condutor, ou seja, uma situação com fortes ventos incidindo perpendicularmente provocaria uma diminuição na temperatura do condutor, e, conseqüentemente, uma redução na sua resistência elétrica.

Portanto, simulou-se diferentes situações, a fim de analisar a variação da impedância da linha de transmissão, bem como a precisão de atuação do relé de impedância.

5.2.1 PRIMEIRA SITUAÇÃO

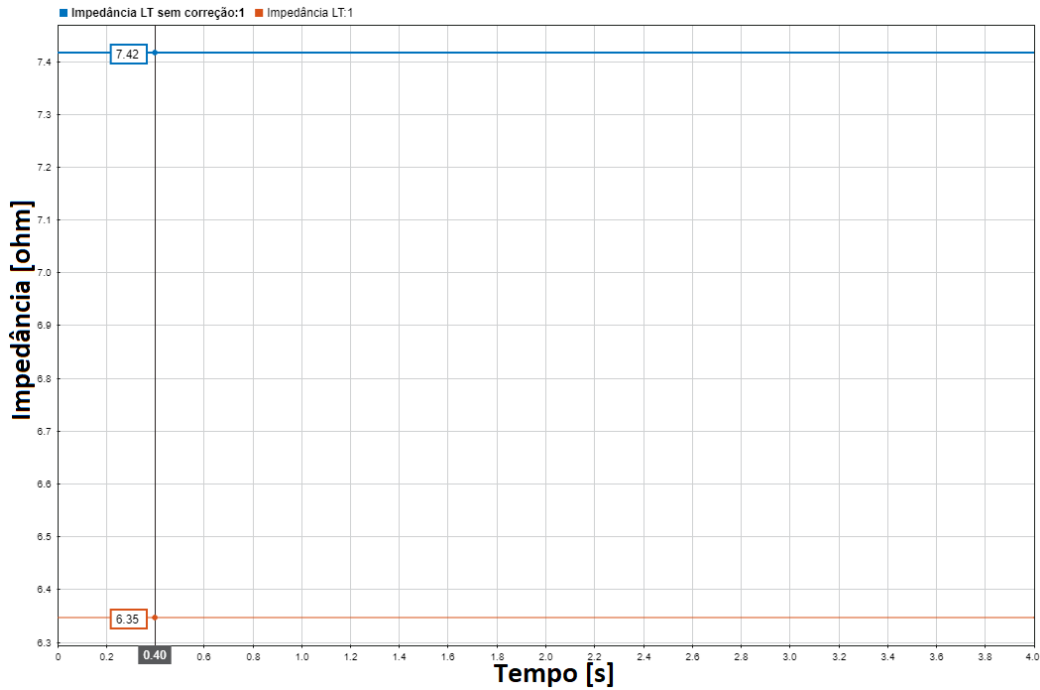
Os parâmetros adotados nessa situação foram escolhidos com a finalidade de diminuir a temperatura do cabo condutor, fazendo com que assim a impedância corrigida da linha de transmissão seja menor que a real. A seguir, tem-se a relação de todos os parâmetros e seus respectivos valores.

- Corrente elétrica (I) = 100A;
- Temperatura Ambiente (T_a) = -20°C ;
- Velocidade média dos ventos (V_w) = 3 m/s e;
- Ângulo de incidência dos ventos (ϕ) = 90° .

Com todos esses dados de entrada, calculou-se o valor da temperatura do condutor (T_s) com o mesmo equacionamento desenvolvido na Subseção 4.1, e a partir desse valor, foi possível verificar a nova resistência da linha de transmissão, conforme visto na Subseção 4.2. Feito isso, calculou-se o valor total da impedância corrigida da linha de transmissão, bem como seu valor inicial para a devida comparação. Como exposto na Figura 24, a impedância da linha sem correção foi de $Z = 7,42 \, \Omega$, ao passo que a impedância devidamente corrigida foi de $Z_{corrigido} = 6,35 \, \Omega$.

Nota-se que houve uma redução considerável no valor da impedância da linha de transmissão — cerca de 15% de redução.

Figura 24: Valores de Impedância Para o Primeiro Cenário



Fonte: O autor.

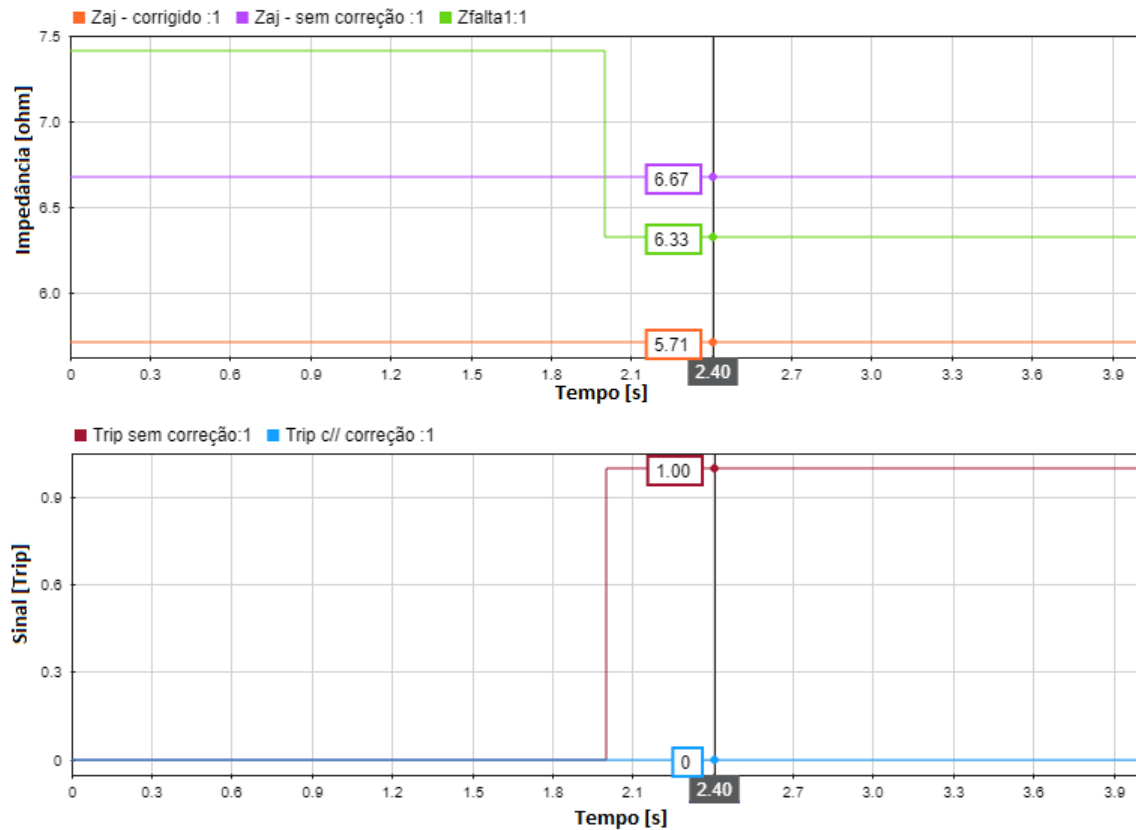
O ajuste de proteção é fixado para cobrir 90% da linha de transmissão (vide Subseção 5.2), sendo assim, os respectivos ajustes serão:

$$Z_{aj1} = 7,42 \times 0,90 = 6,67\Omega \quad (55)$$

$$Z_{aj2} = 6,35 \times 0,90 = 5,71\Omega \quad (56)$$

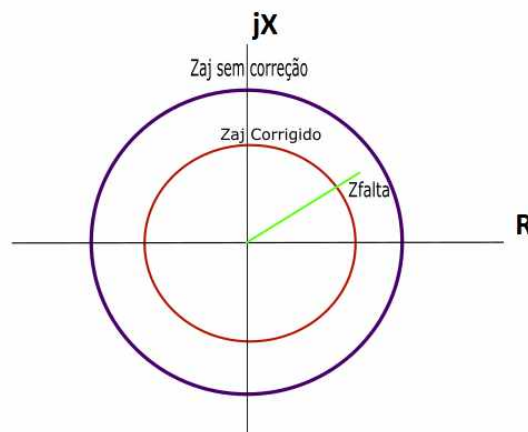
onde Z_{aj1} representa o ajuste da impedância sem correção, enquanto Z_{aj2} representa o ajuste da impedância com correção.

Dessa forma, fica evidente que se ocorrer uma falta com $Z_{aj2} < Z_{falta} < Z_{aj1}$, o relé de uma linha de transmissão sem correção atuará, quando na verdade seria uma situação de não atuação. Tal ocorrência pode ser apreciada na Figura 25.

Figura 25: Impedâncias de Ajuste e Sinal de *Trip* Para o Primeiro Cenário

Fonte: O autor

Nota-se que para uma falta com impedância $Z_F = 6,33\Omega$, o sistema não corrigido sensibilizou o relé de distância ($Trip = 1$), desconectando assim toda a linha de transmissão. Enquanto isso, o sistema corrigido não foi sensibilizado, em vista que o *trip* de atuação do relé continuou no estado inicial ($Trip = 0$). A Figura 26 retrata esse cenário no plano R-X.

Figura 26: Representação do Primeiro Cenário no Plano R-X

Fonte: O autor

A impedância de falta $Z_F = 6,33\Omega$ não foi escolhida ao acaso, pois esse valor representa aproximadamente 100% do trecho protegido pelo relé – note que $\frac{Z_{aj2}}{90\%}$ é aproximadamente $6,33\Omega$.

Sendo assim, na prática, essa situação representaria uma falta ocorrida no barramento ao final da linha de transmissão, e não na linha propriamente dita. Nessas situações, o relé instalado no próprio barramento da falta fica responsável pela proteção, enquanto isso, o relé do barramento anterior atua de maneira secundária, e não primária.

Essa situação pode ser prejudicial, pois desconectaria um trecho de linha de transmissão que não está na área de abrangência da falta ocorrida.

5.2.2 SEGUNDA SITUAÇÃO

Agora, os parâmetros adotados causam uma elevação na temperatura do condutor, ocasionando assim um aumento na impedância da linha de transmissão. Tais parâmetros foram:

- Corrente elétrica (I) = 700 A;
- Temperatura Ambiente (T_a) = 30°C;
- Velocidade média dos ventos (V_w) = 0,61 m/s e;
- Ângulo de incidência dos ventos (ϕ) = 10°.

Com a elevação de temperatura, tem-se a nova impedância corrigida, representada na Figura 27.

Novamente, tem-se uma expressiva alteração na impedância da linha de transmissão. A nova impedância corrigida foi de $Z_{corrigido} = 8,85\Omega$, enquanto a impedância original se manteve em $Z = 7,42\Omega$. Em termos percentuais, nota-se um aumento de cerca de 20% no valor da impedância.

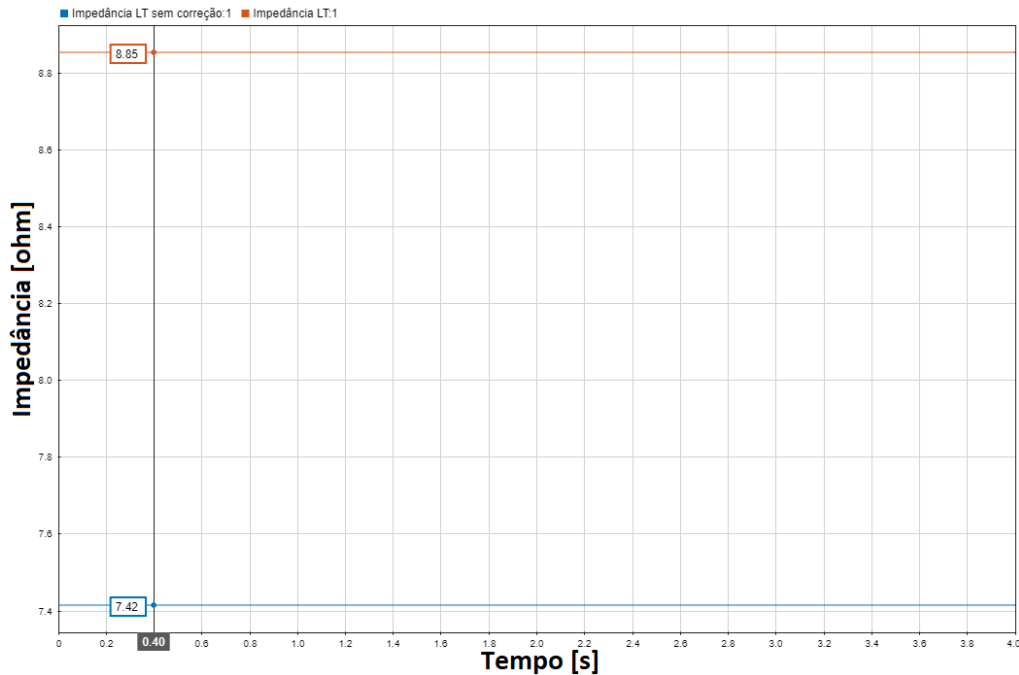
Conforme visto na Subseção 5.2, o percentual de linha protegido é fixado em 90%, sendo assim, as impedâncias de ajustes dos relés são calculadas da seguinte forma:

$$Z_{aj1} = 7,42 \times 0,90 = 6,67\Omega \quad (57)$$

$$Z_{aj2} = 8,85 \times 0,90 = 7,96\Omega \quad (58)$$

Onde Z_{aj1} representa o ajuste da impedância sem correção e Z_{aj2} representa o ajuste da impedância com correção.

No entanto, caso ocorra uma falta com $Z_{aj1} < Z_{falta} < Z_{aj2}$, o relé de uma linha de transmissão sem correção não se sensibilizaria, quando na verdade seria uma situação de atuação instantânea. Tal situação pode ser analisada na Figura 28.

Figura 27: Valores de Impedância Para o Segundo Cenário

Fonte: O autor

Nota-se que, caso ocorra uma falta com impedância $Z_F = 7,2\Omega$, o sistema corrigido sensibilizaria o relé de impedância instantaneamente, desarmando assim a linha de transmissão e protegendo o sistema da falta de maneira correta.

Enquanto isso, o sistema original não seria sensibilizado, em vista que o *trip* de atuação do relé continuou no estado inicial (0). Nesse caso, a proteção da linha de transmissão ficaria a cargo da sua atuação nas zonas subsequentes, perdurando no tempo a ocorrência da falta.

A representação desse cenário no plano R-X está exposto na Figura 29.

Tal situação pode ser bastante danosa, uma vez que determinadas faltas requerem uma atuação instantânea do relé de impedância.

5.2.3 TERCEIRA SITUAÇÃO

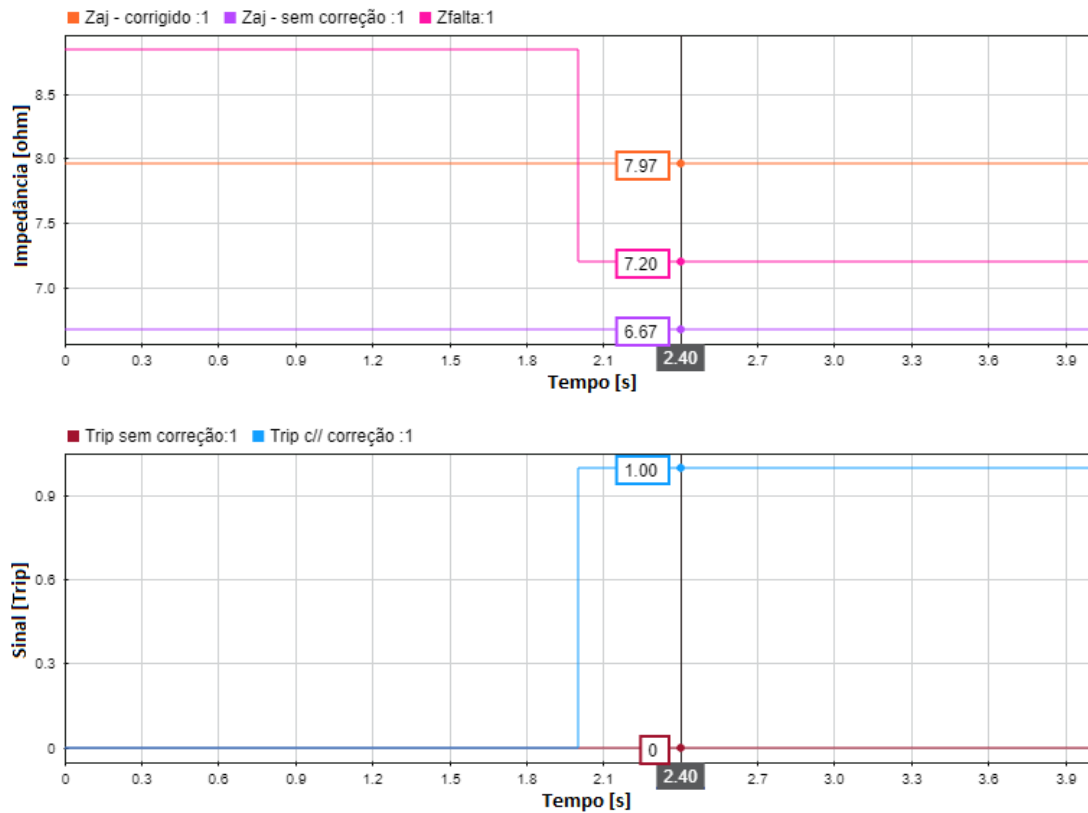
Como visto no Capítulo 3, por conta da relação linear entre comprimento de linha e impedância, o relé de distância tem a capacidade de informar o local exato da ocorrência da falta.

Visto isso, o objetivo dessa simulação agora é avaliar a precisão do relé ao desempenhar essa função de indicar o local de ocorrência de falta.

Os parâmetros adotados são idênticos aos da Subseção 5.2.2, em face disso, a elevação de temperatura, bem como a impedância corrigida, também são idênticas às expostas na Subseção 5.2.2.

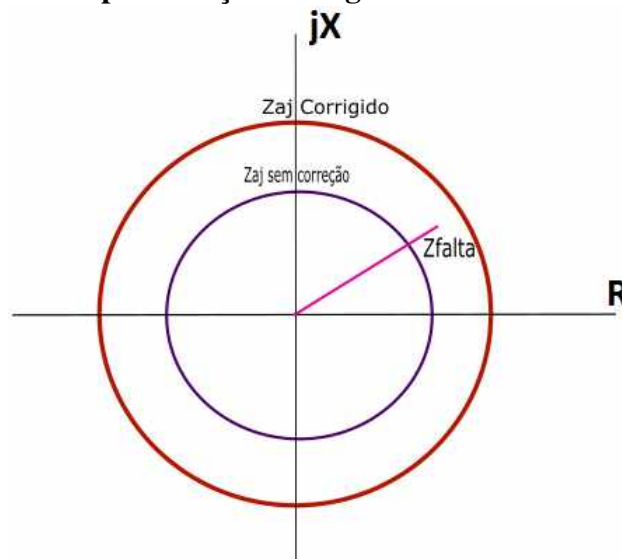
Como visto na Figura 30, a falta simulada é de magnitude $Z_F = 2,7\Omega$. Nota-se que tanto o relé do sistema corrigido, quanto o relé do sistema original foram sensibilizados, uma vez que $Z_F < Z_{aj1} < Z_{aj2}$, onde Z_{aj1} é o ajuste original do relé e o Z_{aj2} é o ajuste do relé com correção.

Figura 28: Impedâncias de Ajuste e Sinal de *Trip* Para o Segundo Cenário



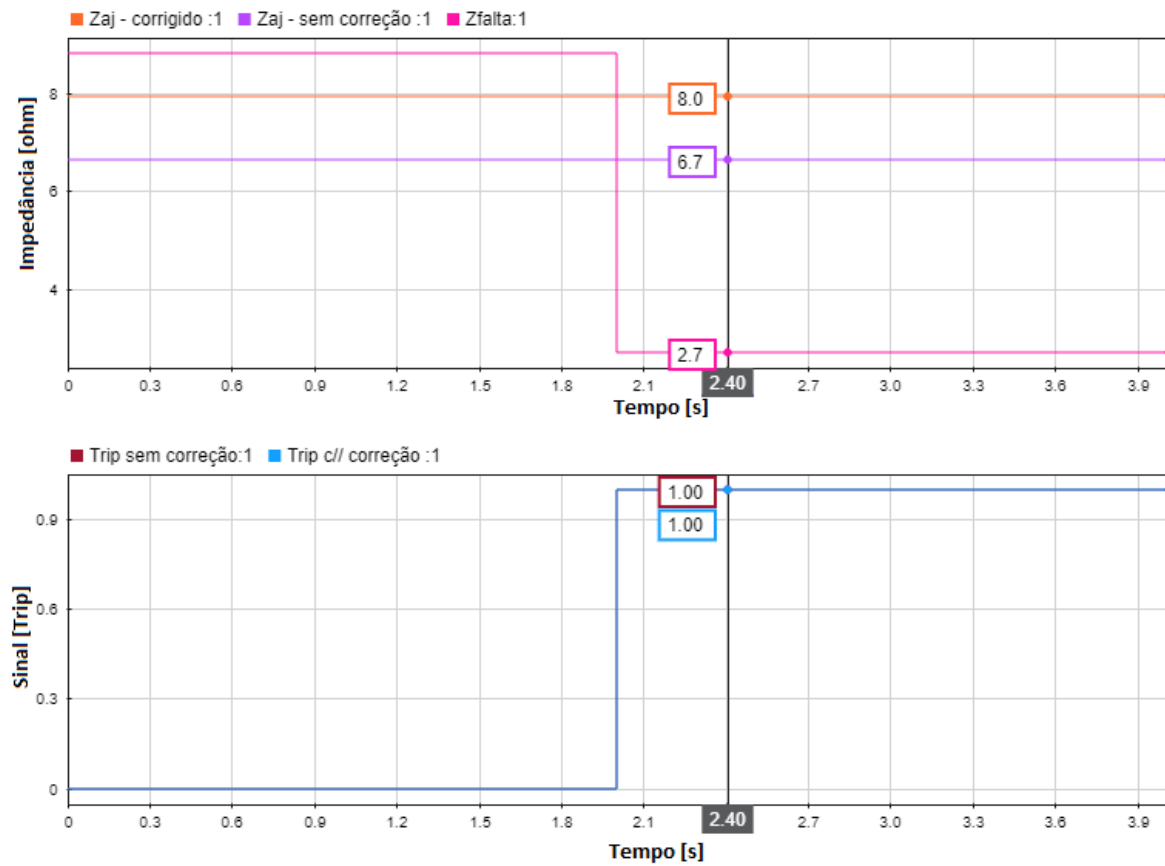
Fonte: O autor

Figura 29: Representação do Segundo Cenário no Plano R-X



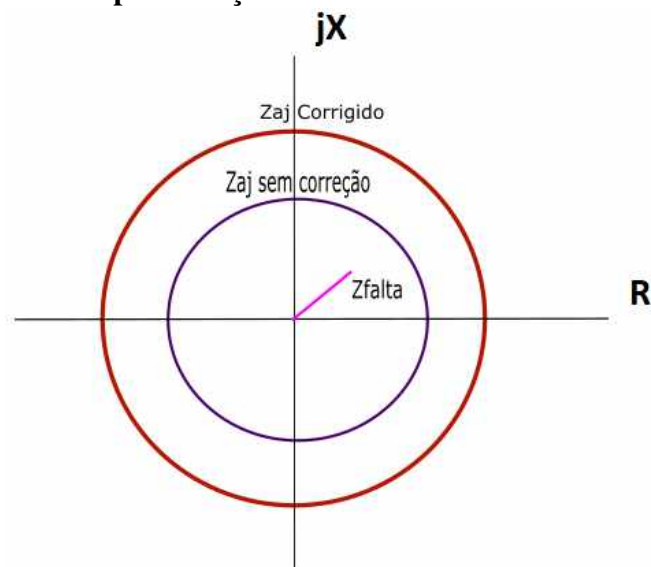
Fonte: O autor

Entretanto, como exposto anteriormente, o objetivo principal dessa subseção não é avaliar a atuação do relé, e sim a sua precisão em indicar o local exato da ocorrência da falta.

Figura 30: Impedâncias de Ajuste e Sinal de Trip Para o Terceiro Cenário

Fonte: O autor

Tal situação pode ser representada no plano R-X, conforme expõe a Figura 31.

Figura 31: Representação do Terceiro Cenário no Plano R-X

Fonte: O autor

Conforme visto no início desse capítulo, o comprimento da linha de transmissão é de 100 *km* e o ajuste da proteção é fixado em 90% da linha.

Assim, o cálculo feito pelo relé para indicar a distância da falta, medida a partir do seu ponto de origem, é o seguinte:

$$D = \frac{Z_F \times 90\%}{Z_{aj}} \times 100 \quad (59)$$

Como se pode observar na Figura 30, o ajuste original é de $Z_{aj1} = 6,7\Omega$. Substituindo esse valor na Equação 59, tem-se o resultado $D = 36,2 \text{ km}$. Também extrai-se da Figura 30 que o valor do ajuste corrigido é de $Z_{aj2} = 8,0\Omega$. Novamente, substituindo-se esse valor na Equação 59, tem-se o resultado $D = 30,3 \text{ km}$. Nota-se a diferença de precisão de aproximadamente 6 *km* entre a indicação do local da falta feita pelo relé corrigido e o original. Como a linha de transmissão fictícia é de 100 *km* de comprimento, tal variação representaria uma imprecisão de aproximadamente 6%.

5.2.4 QUARTA SITUAÇÃO

Assim como na Subseção 5.2.3, o objetivo principal dessa subseção é verificar a precisão do relé de impedância ao indicar o local de ocorrência da falta. Para isso, adotou-se os mesmos parâmetros da Subseção 5.2.1, sendo assim, a diminuição de temperatura do cabo condutor e a diminuição de sua impedância foram as mesmas obtidas na Subseção 5.2.1.

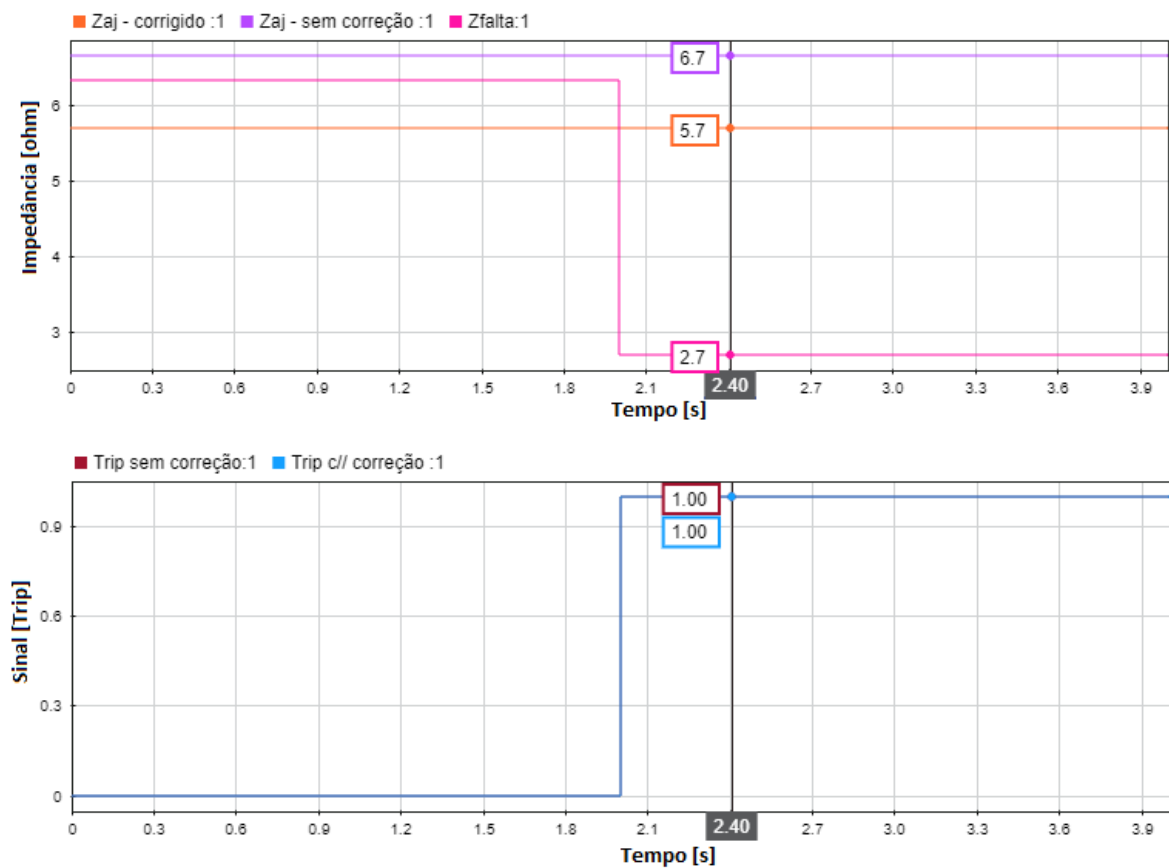
- Corrente elétrica (I) = 100 A;
- Temperatura Ambiente (T_a) = -20°C ;
- Velocidade média dos ventos (V_w) = 3 m/s e;
- Ângulo de incidência dos ventos (ϕ) = 90° .

Então, analisa-se o comportamento do sistema para uma falta de $Z_F = 2,7\Omega$. Como pode ser visto na Figura 32, o ajuste do relé original é de $Z_{aj1} = 6,7\Omega$, enquanto o ajuste do relé corrigido é de $Z_{aj2} = 5,7\Omega$.

De maneira idêntica à executada na Subseção 5.2.3, analisa-se o cálculo da distância feito pelo relé para cada um dos ajustes.

Conforme a Equação 59, tem-se que para $Z_{aj1} = 6,7\Omega$, a distância calculada pelo relé é de $D = 36,2 \text{ km}$, e para $Z_{aj2} = 5,7\Omega$, a distância calculada pelo relé é de $D = 42,6 \text{ km}$.

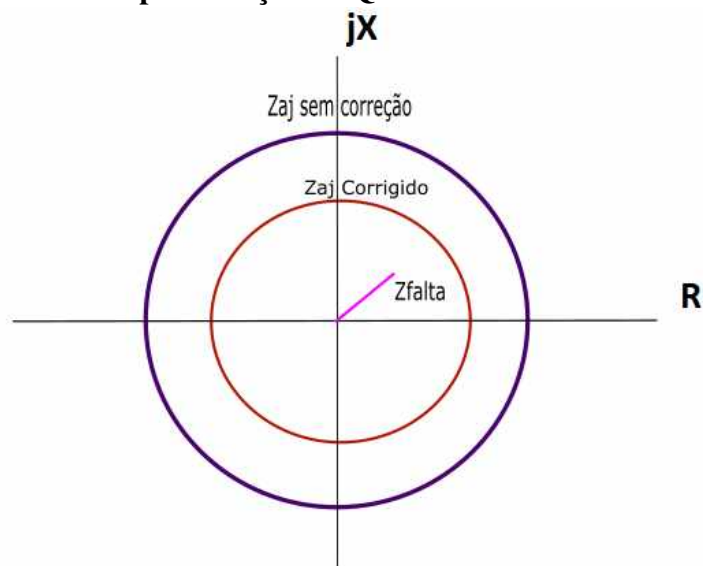
Dessa forma, nota-se uma variação de aproximadamente 6,4 *km* entre as duas medidas, o que em termos percentuais representa 6,4% de imprecisão.

Figura 32: Impedâncias de Ajuste e Sinal de *Trip* Para o Quarto Cenário

Fonte: O autor

Novamente, pode-se vislumbrar tal cenário no plano R-X, conforme a Figura 33.

Figura 33: Representação do Quarto Cenário no Plano R-X



Fonte: O autor

Sendo assim, fica evidente, mais uma vez, a importância do ajuste correto do relé de distância, visto que o ajuste incorreto, ainda que possa atuar de maneira certa em determinadas situações, nunca apresentará a localização exata e precisa da ocorrência da falta.

6 CONCLUSÃO

Como exposto no Capítulo 1, a proposta principal deste trabalho foi compreender como as condições ambientais alteram os parâmetros de uma linha de transmissão. A preocupação com essas alterações se justificaram, uma vez que no Capítulo 3 constatou-se que o ajuste correto do relé depende diretamente do valor exato da impedância da linha de transmissão. Em seguida, no Capítulo 4, explicitou-se exaustivamente como diversos fatores externos impactam na temperatura do condutor, e, por consequência, alteram a impedância da linha de transmissão. Por fim, toda teoria estudada foi posta em prática — na forma de simulações computacionais — e documentada integralmente no Capítulo 5, onde foi possível observar cenários de divergência de atuação entre um relé convencional e um relé corrigido pelo estudo desenvolvido até aqui.

Destaca-se quatro cenários peculiares trabalhados no Capítulo 5, sendo dois deles bastante prejudiciais ao funcionamento da linha de transmissão: ora o sistema de proteção era acionado indevidamente, ora deixava de atuar quando a situação o exigia. Além disso, as Subseções 5.2.3 e 5.2.4 provam que, por mais que o relé sem o devido ajuste possa atuar corretamente em algumas situações, sua precisão em indicar o local da falta seria inaceitável, uma vez que as simulações apresentaram erros na ordem de 6% quando este quesito é analisado.

Diante disso, pôde-se ter ciência da importância deste trabalho, pois o mesmo apresenta uma solução para problemas de atuação indevida nos sistemas de proteção de linhas de transmissão, garantindo uma maior confiabilidade ao sistema elétrico.

Ademais, convém relatar os principais óbices encontrados ao elaborar este trabalho. Primeiramente, ressalta-se que a Norma IEEE 738 — a qual este trabalho foi baseado — não é de fácil acesso. Além disso, algumas informações nela contidas ainda são nebulosas, a exemplo da velocidade V_w de convergência (detalhada na Equação 28), que foi deduzida pelo Autor, realizando uma interpretação extensiva. Quanto à utilização do *software MATLAB*: ocorreram alguns problemas quanto à compilação do código, como por exemplo: o desafio de extrair as raízes de funções de quarto grau.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A operação do sistema desenvolvido neste trabalho depende diretamente da inserção de diversos parâmetros de entrada — temperatura ambiente, velocidade dos ventos, ângulo de incidência dos ventos, ângulo de azimuth da linha de transmissão, entre outros. Mas, observa-se que todos esses parâmetros de entrada são inseridos manualmente pelo operador. É certo que alguns parâmetros, obrigatoriamente, terão de ser inseridos dessa forma, uma vez que é inviável obtê-los através de sensores, como por exemplo: o ângulo de azimuth da linha de transmissão.

Entretanto, outros parâmetros como velocidade dos ventos e temperatura ambiente podem ser obtidos automaticamente via termômetros e anemômetros (CARVALHO, 2015). Além disso, pode-se otimizar os resultados usando alguma técnica de otimização matemática (Inteligência Artificial) como exposto em Bottura et al. (2014) e Momesso, Bernardes e Asada (2018).

Sendo assim, sugere-se, para trabalhos futuros, que se desenvolva um sistema que seja capaz de captar tais sinais de entrada através de sensores, a fim de automatizar o processo e dirimir erros humanos. Dessa forma, será possível garantir ao sistema um grau de confiabilidade ainda maior.

Referências

- ABB. 2019. Disponível em: <<https://revistapotencia.com.br/produtos/abb-apresenta-disjuntor-de-alta-tensao-redutor-de-carbono/>>. Acesso em: 10 set. 2020.
- ARGO. 2020. Disponível em: <<http://www.argoenergia.com.br/mercado/>>. Acesso em: 14 mai. 2020.
- ASSOCIATION, A. et al. *Aluminum electrical conductor handbook*. [S.l.]: Aluminum Assoc., 1982.
- BAYLISS, C.; HARDY, B. *Transmission and Distribution Electrical Engineering*. 2. ed. [S.l.]: Newnes, 1999. 978 p.
- BERNARDES, W. M. S. *Algoritmo enxame de partículas discreto para coordenação de relés direcionais de sobrecorrente em sistemas elétricos de potência*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. doi:10.11606/D.18.2013.tde-14052013-094113.
- BERNARDES, W. M. S. *Análise da proteção de sistemas de energia elétrica utilizando técnicas modernas de otimização heurística*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. doi:10.11606/T.18.2018.tde-10122018-134438.
- BOCKARJOVA, M.; ANDERSSON, G. Transmission line conductor temperature impact on state estimation accuracy. In: *2007 IEEE Lausanne Power Tech*. Lausanne, Switzerland: [s.n.], 2007. p. 2–3.
- BOTTURA, F. B. et al. Coordination of directional overcurrent relays in meshed power systems using hybrid genetic algorithm optimization. In: *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014)*. Copenhagen, Denmark: [s.n.], 2014. p. 1–6.
- CARVALHO, H. *Avaliação dos efeitos de vento em linhas de transmissão*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- CSANY, E. Protection relay – ANSI standards. *Electrical Engineering Portal*, 2011. Disponível em: <<https://electrical-engineering-portal.com/protection-relay-ansi-standards>>. Acesso em: 13 mai. 2020.
- EISBERG, R. M.; LERNER, L. S. *Física – Fundamentos e Aplicações – Vol 3*. 1. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 1983. 597 p.
- FUCHS, R. D. *Transmissão de Energia Elétrica - Linhas Aéreas*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1979. 280 p.
- HOUSE, K. E.; TUTTLE, P. D. Current-carrying capacity of ACSR. *Electrical Engineering*, v. 77, n. 8, p. 719–719, 1958.
- IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. *IEEE Std 738-2012 (Revision of IEEE Std 738-2006 - Incorporates IEEE Std 738-2012 Cor 1-2013)*, p. 1–72, 2013.

- KINDERMANN, G. *Proteção de sistemas elétricos de potência*. 1. ed. Florianópolis: UFSC, 2008. 448 p.
- LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D. *Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão*. 2. ed. [S.l.]: Blucher, 1992. 548 p.
- MAMEDE, D. R.; FILHO, J. M. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. 1. ed. São Paulo: LTC, 2011. 620 p.
- MOMESSO, A. E. C.; BERNARDES, W. M. S.; ASADA, E. N. Fuzzy-based non-communicating adaptive overcurrent relay. *IFAC-PapersOnLine*, Japan, Tokyo, v. 51, n. 28, p. 315 – 320, 2018. ISSN 2405-8963. 10th IFAC Symposium on Control of Power and Energy Systems - CPES.
- MOURA, A. P.; ROCHA, E. P. *Engenharia de Sistemas de Potência: geração hidroelétrica e eolioelétrica*. 1. ed. Fortaleza: UFC, 2019. 294 p.
- NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. *Electric Circuits*. 10. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2014. 816 p.
- OLIVEIRA, L. T. S. *Modelagem e implementação de um relé de sobrecorrente em ambiente Matlab-Simulink para simulações de sistemas elétricos no domínio do tempo*. 52 p. Monografia (Graduação) — Faculdade de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
- PEREIRA, J.; CARVALHO, P.; SANTOS, H. *Termografia Infra-vermelha*. 2015. Disponível em: <<https://fdocumentos.tips/document/termografia-infravermelho-joao-pereira-paulo-carvalho-helder-santos.html>>. Acesso em: 18 set. 2020.
- POISL, R. C. *UFRGS*. 2008. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/eng04030/Aulas/teoria/cap/_03/efeitos.htm>. Acesso em: 16 mai. 2020.
- SANTOS, J. E. S. dos. *Resistividade (Tabela)*. 2020. Disponível em: <<http://academico.riogrande.ifrs.edu.br/~jose.eli/apostilas/fisica3/Resistividade>>. Acesso em: 16 mai. 2020.
- SEL. 751 - *Relé de Proteção do Alimentador*. 2020. Disponível em: <<https://selinc.com/pt/products/751/>>. Acesso em: 14 mai. 2020.
- TRANSMISSION Engineers. 2020. Disponível em: <<http://www.transmissionengineers.com/index.php?r=acsrCond/admin>>. Acesso em: 14 mai. 2020.
- VILLATE, J. E. *Física 2. Eletricidade e Magnetismo*. 1. ed. Porto: [s.n.], 2011. 232 p.
- YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *Física III – Eletromagnetismo*. 12. ed. [S.l.]: LTC, 2008. 448 p.

A CÓDIGOS IMPLEMENTADOS NO *MATLAB*

• Dados-base

```
%DADOS PADRÃO%
Ta = 25;
R = 7.283 * 10^-5;
I = 300;
Vw = 0.61;
epsilon = 0.8;
alpha = 0.8;
Do = 0.0281;
Zl = 90;
He = 0;
rhof = 1.029;
mif = 2.043*10^-5;
kf = 0.02945;
phi = 90;
kangle = 1.194 - cosd(phi) + 0.194*cosd(2*phi) + 0.368*sind(2*phi);
Qs = 1027;
Hc = 49;
Zc = 172.5;
theta = acosd(cosd(Hc)*cosd(Zc-Zl));
Nre = ((Do * rhof * Vw)/mif);

qj = R*I^2;
qs = alpha*Qs*sind(theta)*0.0281;
qr = @(y) 17.8*Do*epsilon*(((y+273)/100)^4-((Ta+273)/100)^4);
qcn = @(y) 3.645*rhof^(0.5)*Do^(0.75)*(y - Ta)^(1.25);
qc1 = @(y) kangle*(1.01+1.35*Nre^(0.52))*kf*(y-Ta);
qc2 = @(y) kangle*0.754*Nre^(0.6)*kf*(y-Ta);
display(qj)
display(qs)
display(qr)
display(qcn)
display(qc1)
display(qc2)
```

• **Código $I \times T_s$**

```
%TEMPERATURA FINAL EM FUNÇÃO DA CORRENTE%

g=@(I,Ts) I^2 * R + qs - kangle*(1.01+1.35*Nre^(0.52))*kf*(Ts-Ta)-
17.8*Do*epsilon*(((Ts+273)/100)^4-((Ta+273)/100)^4);
display(g);
fimplicit(g, [0 1000 30 80])
grid on;
title('Temperatura do Condutor em Função da Corrente Elétrica')
xlabel('Corrente Elétrica [A]')
ylabel('Temperatura do Condutor [°C]')
```

• **Código $T_a \times T_s$**

```
%TEMPERATURA FINAL EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE%

h=@(x,y) qj + qs - kangle*(1.01+1.35*Nre^(0.52))*kf*(y-x)
-17.8*Do*epsilon*(((y+273)/100)^4-((x+273)/100)^4);
display(h);
fimplicit(h, [-20 40 -5 60]);
grid on;
title('Temperatura do Condutor em Função da Temperatura Ambiente')
xlabel('Temperatura Ambiente [°C]')
ylabel('Temperatura do Condutor [°C]')
```

• Código $\phi \times T_s$

```
%TEMPERATURA FINAL EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DO VENTO%

i=@(x,y) qj + qs
- (1.194 - cosd(x) + 0.194*cosd(2*x) + 0.368*sind(2*x))
*(1.01+1.35*Nre^(0.52))*kf*(y-Ta)-
17.8*Do*epsilon*(((y+273)/100)^4-((Ta+273)/100)^4);
display(i);
fimplicit(i, [0 90 40 55]);
grid on;
title('Temperatura do Condutor em Função do Ângulo de Incidência')
xlabel('Ângulo de Incidência do Vento [°]')
ylabel('Temperatura do Condutor [°C]')
```

• Cálculo da Temperatura T_s no cenário base

```
%TEMPERATURA DO CONDUTOR NO CENÁRIO BASE%

fb=@(x,y) I^2 * R + qs - kangle*(1.01+1.35*Nre^(0.52))*kf*(y-Ta)
-17.8*Do*epsilon*(((y+273)/100)^4-((Ta+273)/100)^4);
display(fb);
fimplicit(fb, [0 1 40 42]);
grid on;
title('Temperatura do Condutor no Cenário Base')
ylabel('Temperatura do Condutor [°C]')
```

• Código $V_w \times T_s$

```
%TEMPERATURA FINAL EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO%

%VENTO PADRAO%

f=@(x,y) qj + qs -
kangle*(1.01+1.35*((Do * rhof * x)/mif)^(0.52))*kf*(y-Ta)
-17.8*Do*epsilon*(((y+273)/100)^4-((Ta+273)/100)^4);

%VENTO RÁPIDO%

f1=@(x,y) qj + qs -
kangle*0.754*((Do * rhof * x)/mif)^(0.6)*kf*(y-Ta)
-17.8*Do*epsilon*(((y+273)/100)^4-((Ta+273)/100)^4);

%SEM VENTO%

f0=@(x,y) qj + qs -
3.645*rhof^(0.5)*Do^(0.75)*(y - Ta)^(1.25)
-17.8*Do*epsilon*(((y+273)/100)^4-((Ta+273)/100)^4);
display(f)

fimplicit(f1, [1.25 6 30 40]);
grid on;
title('Temperatura do Condutor em Função da Velocidade do Vento')
xlabel('Velocidade do Vento [m/s]')
ylabel('Temperatura do Condutor [°C]')
```

• Código $Z_l \times T_s$

```
%TEMPERATURA FINAL EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE AZIMUTE DA LINHA%
%VENTO PADRAO%

e=@(x,y) qj + alpha*Qs*sind(acosd(cosd(Hc)*cosd(Zc-x)))*0.0281
-kangle*(1.01+1.35*Nre^(0.52))*kf*(y-Ta)
-17.8*Do*epsilon*(((y+273)/100)^4-((Ta+273)/100)^4);

%VENTO RÁPIDO%

e1=@(x,y) qj + alpha*Qs*sind(acosd(cosd(Hc)*cosd(Zc-x)))*0.0281
-kangle*0.754*(Nre)^(0.6)*kf*(y-Ta)
-17.8*Do*epsilon*(((y+273)/100)^4-((Ta+273)/100)^4);

%SEM VENTO%

e0=@(x,y) qj + alpha*Qs*sind(acosd(cosd(Hc)*cosd(Zc-x)))*0.0281
-3.645*rhof^(0.5)*Do^(0.75)*(y - Ta)^(1.25)
-17.8*Do*epsilon*(((y+273)/100)^4-((Ta+273)/100)^4);

display(e0);
display(e);
display(e1);
if Vw>0 && Vw<=1.25
    fimplicit(e, [0 360 38 42]);
    disp('plot e')
elseif Vw >1.25
    fimplicit(e1, [0 360 20 45]);
    disp('plot e1')
else
    fimplicit(e0, [0 360 45 60]);
    disp('plot e0')
end
grid on;
title('Temperatura do Condutor em Função do Azimute da Linha')
xlabel('Ângulo de Azimute da Linha [°]')
ylabel('Temperatura do Condutor [°C]')
```

B CÓDIGOS IMPLEMENTADOS NO *SIMULINK*

• *Function Block* "Cálculo de T_S "(Parte 1)

```
function s = fcn(a,b,c,d,e,f)

Vw=a;
phi=b;
Ta=c;
I=d;
Zl=e;
R=f;

kf=0.0295;
epsilon=0.8;
Do = 0.0281;
rhof=1.029;
alpha=0.8;
mif=2.043*10^-5;
Qs=1027;
Zc=172.5;
Hc=49;
theta = acosd(cosd(Hc)*cosd(Zc-Zl));
Nre = ((Do * rhof * Vw)/mif);
kangle = 1.194 - cosd(phi) + 0.194*cosd(2*phi) + 0.368*sind(2*phi);

qj=R*I^2;
qs = alpha*Qs*sind(theta)*0.0281;
B=17.8*Do*epsilon;

if Vw>1.25
    A=kangle*0.754*Nre.^(0.6)*kf;

else
    A=kangle*(1.01+1.35*Nre^(0.52))*kf;

end
```

• *Function Block "Cálculo de T_s "(Parte 2)*

```

p=[B/100000000 B*273/25000000 B*223587/50000000
(B*20346417+25000000*A)/25000000 ((B*5554571841/100000000)
-qj-qs-A*Ta-B*((Ta+273)/100).^4)];

r=roots(p);

if imag(r(1,1)) == 0

Ts=real(r(1,1));

elseif imag(r(2,1)) == 0

Ts=real(r(1,1));

elseif imag(r(2,1)) == 0

Ts=real(r(3,1));

else

Ts=real(r(4,1));

end

s=Ts;

```

• *Function Block "Resistência Corrigida"*

```

function y = fcn(Ts, R)

alpha=0.0039; %coeficiente de dilatação do aluminio

y = R*(1+alpha*(Ts-25));

```

- ***Function Block "Módulo da Impedância"***

```
function y = fcn(u,v)

y = sqrt((u^2)+(v^2));
```

- ***Function Block "Reatância Capacitiva"***

```
function y = fcn(u)

y = 1/(377*u);
```