

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS ITUMBIARA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

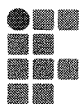


Poliana Caldeira dos Santos

Modelo Reduzido de Linha de Transmissão para Fins Didáticos

Itumbiara, GO

2023



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Poliana Caldeira dos Santos

Matrícula: 20151040070115

Título do Trabalho: Modelo Reduzido de Linha de Transmissão para Fins Didáticos

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 23 / 02 / 2023.
Local Data

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Poliana Caldeira dos Santos

Modelo Reduzido de Linha de Transmissão para Fins Didáticos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Escobar de Oliveira.

Coorientador: Prof. Dr. Olívio Carlos Nascimento Souto

Itumbiara-GO

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S237m Santos, Poliana Caldeira dos
Modelo reduzido de linha de transmissão para fins
didáticos. / Poliana Caldeira dos Santos. -- Itumbiara, 2023.
85p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia
Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Escobar de Oliveira.

Coorientador: Prof. Dr. Olívio Carlos Nascimento Souto.

1. Engenharia elétrica. 2. Linha de transmissão 3.
Material didático. I. Título. II. Oliveira, Marcelo Escobar de.
III. Souto, Olívio Carlos Nascimento. IV. Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.319

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecária: Rosiane Gonçalves de Lima CRB1/1684



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Termo de Aprovação

Poliana Caldeira dos Santos

Modelo Reduzido de Linha de Transmissão para Fins Didáticos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 14 de Fevereiro de 2023, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Escobar de Oliveira - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Olívio Carlos Nascimento Souto - Co-Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Cláudio Roberto Pacheco - Membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Itumbiara – GO

2023

Documento assinado eletronicamente por:

- **Claudio Roberto Pacheco**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 24/02/2023 18:15:34.
- **Olivio Carlos Nascimento Souto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 24/02/2023 15:57:58.
- **Marcelo Escobar de Oliveira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 24/02/2023 15:33:09.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 14/02/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 374341

Código de Autenticação: 69f4f4af2e



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

Agradecimentos

Agradeço a Deus por todas as oportunidades e privilégios que tenho.

Aos meus pais por todo o apoio e esforço em todos os momentos da minha vida, sem eles não teria conseguido.

Ao meu orientador Marcelo Escobar de Oliveira por todo o empenho

Ao meu coorientador Olívio Carlos Nascimento Souto pela disponibilidade em me ajudar.

E aos professores Josemar Alves dos Santos Junior, Ghunter Paulo Viajante, Marcos Antônio Arantes de Freitas e Nayara Santana de Paula que mesmo não envolvidos diretamente no meu trabalho me ajudaram em várias etapas.

Resumo

Os diversos estudos e teorias e a modelagem matemática desenvolvida juntamente com os modelos de simulação de linha de transmissão disponíveis permitem o desenvolvimento de uma bancada para simular os efeitos da linha de transmissão e desenvolver estudos sobre o seu comportamento. Assim, com o uso da modelagem de linha artificial através do modelo pi e o auxílio do ATPDraw foi desenvolvida uma linha de transmissão em escala reduzida para simulação de linha de transmissão com base nos parâmetros de uma linha de transmissão real de 235km de extensão onde foram ser desenvolvidos estudos práticos para uma análise abrangente sobre o comportamento, desempenho e resultados de uma linha de transmissão. O trabalho teve como foco desenvolver uma linha de transmissão em escala reduzida, que também pode ser chamada de bancada, onde os alunos da disciplina de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica pudessem simular os fenômenos descritos nas bibliografias sobre o assunto.

Palavras-chave: bancada, linha de transmissão, modelo pi, linha artificial.

Abstract

The various studies and theories and the mathematical modeling developed along with the available transmission line simulation models allow the development of a bench to simulate the effects of the transmission line and develop studies on its behavior. Thus, with the use of artificial line modeling through the pi model and the aid of ATPDraw, a reduced-scale transmission line was developed for transmission line simulation based on the parameters of a real transmission line of 235km in length where practical studies can be developed for a comprehensive analysis of the behavior, performance and results of a transmission line. The work focused on developing a reduced-scale transmission line, which can also be called a workbench, where students of the Electrical Energy Transmission Systems discipline could simulate the phenomena described in the bibliographies on the subject.

Keywords: bench, transmission line, pi model, artificial line.

Lista de figuras

Figura 2.1 - Linha bifilar ideal.....	13
Figura 2.2 - Exemplos de torres de Linha de Transmissão.....	16
Figura 2.3 - Disposição dos condutores.....	17
Figura 2.4 - Distância entre condutores na mesma fase.....	18
Figura 2.5 - Circuito equivalente de uma linha ideal.....	21
Figura 2.6 - Propagação da tensão ao longo da linha no decorrer do tempo.....	22
Figura 2.7 - Circuito equivalente de um elemento Δx de uma linha real.....	26
Figura 2.8 - Circuito equivalente de uma linha curta.....	35
Figura 2.9 - Circuito Pi.....	36
Figura 2.10 - Quadripolo.....	38
Figura 2.11 - Circuito equivalente da linha artificial.....	41
Figura 2.12 - Cascata de quadripolos da linha artificial.....	41
Figura 2.13 - Circuito simplificado da linha trifásica.....	42
Figura 2.14 - Capacitor.....	44
Figura 2.15 - Gráfico da capacitância de um capacitor linear.....	45
Figura 2.16 - Indutor.....	47
Figura 2.17 - Gráfico da indutância de um indutor com núcleo de ar.....	48
Figura 2.18 - Aspectos gerais da bobina.....	50
Figura 3.1 - Fluxograma.....	54
Figura 3.2 - Mapa com a localização da subestação Bauru-SP.....	54
Figura 3.3 - Mapa com a localização da subestação Cabreúva-SP e LT Bauru-Cabreúva.....	55
Figura 3.4 - Linha artificial.....	55
Figura 3.5 - Foto da bobina com fio AWG 20.....	58
Figura 3.6 - Foto da bobina com fio AWG 18.....	59
Figura 3.7 - Dimensões das bobinas.....	60
Figura 3.8 - Foto das bobinas.....	61
Figura 3.9 - Foto da quantidade de material utilizada.....	62
Figura 3.10 - Foto da bobina com núcleo de ar.....	63
Figura 3.11 - Foto dos testes com as bobinas construídas.....	63
Figura 3.12 - Capacitor de cerâmica para 250V.....	64
Figura 3.13 - Detalhes da bancada.....	64
Figura 3.14 - Projeto das peças para montagem da bancada.....	65
Figura 3.15 - Foto da impressão das peças da bancada.....	65
Figura 3.16 - Foto da fixação das bobinas na bancada.....	66
Figura 3.17 - Foto da fixação das peças da bancada e instalação das bobinas.....	66
Figura 3.18 - Foto da instalação das células no painel da bancada.....	67
Figura 3.19 - Células Pi do painel da bancada.....	67

Figura 3.20 - Foto da montagem finalizada.....	68
Figura 4.1 - Foto do multímetro utilizado nos testes da bancada.....	69
Figura 4.2 - Foto do painel de cargas RLC utilizado.....	70
Figura 4.3 - Foto do painel de cargas indutivas utilizado.....	70
Figura 4.4 - Foto do Varivolt monofásico utilizado.....	71
Figura 4.5 - Foto do medidor LCR utilizado.....	71
Figura 4.6 - Foto do indutor com núcleo de ar utilizado.....	72
Figura 4.7 - Esquema de montagem dos testes na bancada.....	72
Figura 4.8 - Foto do teste de tensão e corrente sem carga na bancada.....	74
Figura 4.9 - Esquema ilustrativo do teste a vazio.....	75
Figura 4.10 - Esquema ilustrativo do teste com carga resistiva.....	75
Figura 4.11 - Esquema ilustrativo do teste com carga indutiva com núcleo ferromagnético.....	76
Figura 4.12 - Esquema ilustrativo do teste com carga indutiva com núcleo de ar.....	77
Figura 4.13 - Esquema ilustrativo do teste com carga capacitiva.....	77
Figura 4.14 - Circuito para simulação no ATPDraw.....	76
Figura 4.15 - Cálculo dos valores rms de tensão e corrente no Matlab.....	76
Figura 4.16 - Montagem do teste a vazio.....	81
Figura A.1 - Projeto da bancada no AutoCad.....	93
Figura A.2 - Projeto das peças da bancada no AutoCad.....	94
Figura B.1 - Circuito para simulação do teste sem carga no ATPDraw.....	95
Figura B.2 - Circuito para simulação do teste com carga resistiva no ATPDraw.....	95
Figura B.3 - Circuito para simulação do teste com carga indutiva no ATPDraw.....	96
Figura B.4 - Circuito para simulação do teste com carga puramente capacitiva no ATPDraw.....	96
Figura B.5 - Circuito para simulação do teste com carga capacitiva no ATPDraw.....	97
Figura C.1 - Foto do teste com carga indutiva com núcleo de ar.....	98
Figura C.2 - Foto do teste com carga indutiva com núcleo de material ferromagnético.....	98

Lista de tabelas

Tabela 2.1 -	Variáveis utilizadas nos cálculos dos indutores.....	49
Tabela 3.1 -	Parâmetros elétricos LT Bauru-Cabreuva.....	55
Tabela 3.2 -	Quantidade de células Pi para representação da LT de acordo com o comprimento da linha.....	56
Tabela 3.3 -	Componentes elétricos LT Bauru-Cabreuva.....	57
Tabela 3.4 -	Indutância e resistência espiras com fio AWG 14.....	61
Tabela 3.5 -	Indutância e resistência espiras com fio AWG 15.....	62
Tabela 4.1 -	Valores de cada componente das células da bancada.....	73
Tabela 4.2 -	Correntes de entrada e saída.....	82
Tabela 4.3	Comparação das tensões e correntes da bancada e dos cálculos.....	84

Sumário

Capítulo 1.....	9
INTRODUÇÃO.....	9
Capítulo 2.....	11
REVISÃO DE CONCEITOS.....	11
Representação das linhas de transmissão.....	11
Energização da linha de transmissão	19
Tensão e corrente com e sem carga.....	21
Modelagem de LTs curtas, médias e longas.....	23
Equações diferenciais da linha de transmissão	24
Solução das equações diferenciais no domínio da frequência.....	26
Interpretação das equações gerais das linhas de transmissão	28
Cálculo das tensões e correntes da linha de transmissão	30
Linhas curtas.....	32
Linhas médias	33
Linhas longas	35
Linhas de transmissão como quadripolos	36
Linhas artificiais.....	38
Modelos matemáticos de linhas trifásicas	39
Componentes da bancada	42
Cálculo dos componentes da linha artificial	47
Cálculo de indutores com núcleo de ar	48
Capítulo 3.....	51
PROJETO E CONSTRUÇÃO DA BANCADA.....	51
Linha de transmissão Bauru-Cabreúva.....	52
Modelagem da LT	53
Obtenção dos componentes	55
Construção da bancada	62
Capítulo 4.....	67
MEDIÇÕES NA BANCADA E SIMULAÇÕES.....	67
Equipamentos utilizados	67
Montagem dos testes práticos	70
Teste a vazio.....	72
Teste com cargas resistivas.....	73
Teste com carga indutiva com núcleo de material ferromagnético	74

Teste com carga indutiva com núcleo de ar	74
Teste com carga capacitiva.....	75
Software ATPDraw.....	76
Simulações.....	77
Cálculos de tensão e corrente a partir das equações gerais da LT	78
Resultados e discussão	79
Capítulo 5.....	83
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
Trabalhos futuros	83
Referências	84
Apêndice A.....	86
Apêndice B.....	90
Anexo A.....	91
Anexo B.....	93
Anexo C	96

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A energia elétrica teve seu grande impulso entre 1879 e 1880 com a invenção da lâmpada incandescente por Thomas A. Edson, responsável pela inauguração da central elétrica de Pearl a partir de 1882, fornecendo iluminação pública e energia elétrica para a cidade de Nova Iorque e dando início a comercialização de eletricidade em vários países. Assim, teve início também os problemas com o transporte e a distribuição de energia elétrica, gerada e consumida em corrente contínua. Os centros com maior potencial para geração de energia ficavam muito distantes dos grandes centros consumidores, e a energia era consumida na mesma tensão que era produzida.

Por volta de 1884 foi inventado o transformador, tornando possível elevar e abaixar a tensão quando necessário, desde que a energia fosse gerada em corrente alternada. Nesse período houve duas grandes realizações para a época: em 1886 a linha monofásica com 29,5 km na Itália; e em 1888 a linha de 11kV, trifásica, com 180km de extensão na Alemanha.

A crescente demanda por energia elétrica e as distâncias dos aproveitamentos hidrelétricos impulsionaram cada vez mais o aumento dos níveis de tensão de operação das linhas de transmissão e, por volta de 1922, entrou em operação a primeira linha de 230kV e, entre 1964 e 1967, no Canadá, foram projetadas e construídas as primeiras linhas de 735kV.

No Brasil, a primeira linha de transmissão de que se tem registro foi construída por volta de 1883 na cidade de Diamantina, Minas Gerais, que transportava a energia gerada em uma usina hidrelétrica formada por 2 rodas d'água e 2 dínamos Gramme, a uma distância de, aproximadamente, 2 km. A energia transportada acionava bombas hidráulicas em uma mina de diamantes.

Entre 1945 e 1947 foi construída a primeira linha de 230kV no Brasil com uma extensão de, aproximadamente, 330km destinada a interligar os sistemas Rio Light e São Paulo Light, operando inicialmente em 170kV, passando a operar com 230kV em 1950.

Atualmente, com a rápida expansão das indústrias e o crescente aumento de consumidores residenciais e comerciais muito mais exigentes, as linhas de transmissão precisam ser ainda mais eficientes, o que demanda um estudo ainda mais amplo nessa área.

O sistema de transmissão desempenha um papel importante não apenas no atendimento ao mercado, mas também na interligação de submercados de energia elétrica, o que permite o nivelamento dos preços da energia por meio da minimização dos estrangulamentos entre os submercados tornando propícia a transmissão de energia de diversos parques geradores. (EPE, 2017)

Já existem muitos estudos, softwares e diversos equacionamentos que abordam a modelagem matemática de linhas de transmissão adequados para o grau de precisão exigido em cada caso estudado que, inclusive, foram grandes aliados para a realização desse trabalho, porém poucos abordam o desenvolvimento de um circuito prático onde experimentos físicos possam simular os efeitos que ocorrem nas linhas de transmissão como é apresentado na teoria em diversas bibliografias existentes. Cabe citar aqui os trabalhos de Silva (2017) e Damasceno (2019) que são também uma boa referência para o desenvolvimento de uma bancada didática para simulação de linhas de transmissão, e ainda o software ATPDraw que é uma ótima base para simulações com linhas de transmissão e comparação de resultados. Cabe ainda ressaltar a importância de experimentos práticos na retenção de conhecimento e no desenvolvimento da aprendizagem dos alunos.

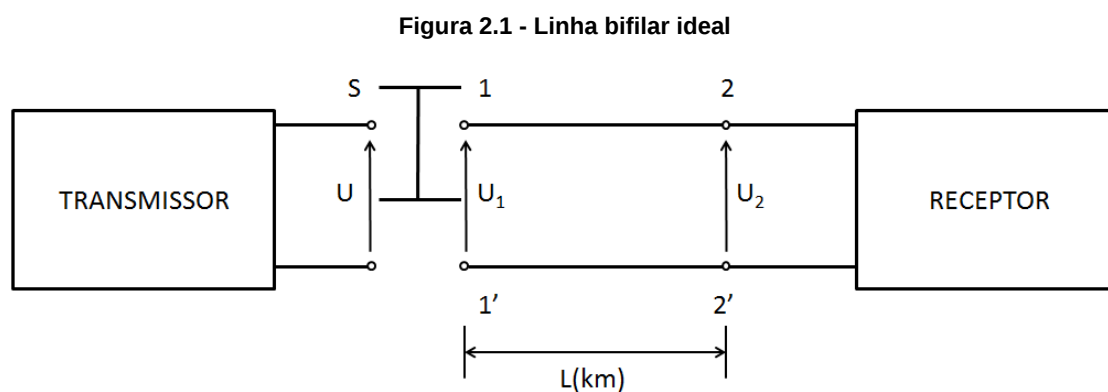
Visto a importância das linhas de transmissão para o fornecimento de energia, e os poucos estudos práticos realizados nessa área, o objetivo desse trabalho é de desenvolver uma bancada onde seja possível simular os fenômenos recorrentes nas linhas de transmissão muitas vezes estudados apenas na teoria.

Capítulo 2

REVISÃO DE CONCEITOS

De modo geral, a energia elétrica é estabelecida a partir da diferença de potencial aplicada entre dois pontos de um condutor. Em uma rede elétrica, existe uma tensão gerada pela diferença de potencial entre as usinas e as cargas consumidoras que promove a transmissão de energia elétrica, o que é realizado através de linhas de transmissão (LTs). (DIEFENTHÄLER, 2019)

Para a simplificação da modelagem das LTs as fontes geradoras de energia serão chamadas de transmissor e as fontes consumidoras de receptor, como é ilustrado na figura 2.1.



Fonte: Elaborado pela própria autora

Representação das linhas de transmissão

Para a representação das linhas de transmissão através de um circuito elétrico é necessário definir os parâmetros elétricos que representem as propriedades elétricas da linha de transmissão que são elas condutância, indutância, capacitância e resistência.

A indutância (L), medida em Henry (H), e a capacitância (C), medida em Farad (F), são causadas pelos efeitos dos campos magnéticos e elétricos em torno do condutor, respectivamente; a condutância (G) indica a facilidade com que uma corrente elétrica flui por um condutor, e está relacionada às fugas de corrente que ocorrem nos isoladores e no ar ionizado (chamado efeito corona);

e a resistência (R), medida em ohm (Ω), consiste na limitação da passagem de corrente elétrica em um circuito.

A resistência total do condutor é resultante da soma de 3 parcelas de resistência, de acordo com a equação 2.1: aquela que o condutor apresenta a passagem da corrente contínua (R_{cc}); a resistência aparente provocada pela existência de fluxos magnéticos no interior dos condutores (R_{fm}); e a resistência aparente adicional (R_{ad}).

$$R_{T_{condutor}} = R_{cc} + R_{fm} + R_{ad} \quad (2.1)$$

A resistência a corrente contínua depende da resistividade do material (ρ) e das dimensões comprimento e área da seção transversal do condutor. A resistividade depende ainda da temperatura, t $\hat{e}$ mpera (consist $\hat{e}$ ncia) e pureza do material. Quanto à resistência a corrente alternada, destaca-se o efeito pelicular, quando o condutor é percorrido por uma corrente alternada e há um aumento na resistência efetiva do fio devido a maior concentração de corrente na superfície do condutor. A resistência aparente adicional, por sua vez, está relacionada às perdas por correntes parasitas e às perdas por histerese que contribuem para o aumento da resistência aparente do condutor.

Dessa forma, a determinação da resistência exata de um condutor é bastante complexa visto que depende de vários fatores. Portanto, costuma-se usar valores catalogados que oferecem boa precisão. Geralmente, a resistência dos condutores de linhas de transmissão aéreas é considerada à temperatura de 75 °C para compensar o efeito do aumento de temperatura provocado pelo sol e pelo efeito Joule das correntes. (FUCHS, 1977)

Quanto à condutância, seu valor representa as perdas proporcionais à tensão da linha. Essas perdas estão relacionadas ao efeito Corona, que é a ionização do ar em volta de um condutor elétrico, e as perdas nos isoladores, e são consideradas distribuídas ao longo da linha, pois, apesar das perdas nos isoladores se concentrarem neles mesmo, a distância entre estruturas-suporte é pequena em comparação ao tamanho da linha. Como estas correntes apresentam valores muito baixos em comparação à corrente que circula na linha de transmissão, este parâmetro geralmente é desconsiderado na modelagem matemática.

A indutância (L) e a capacitância (C), principais parâmetros utilizados para modelar a linha de transmissão de energia, dependem ainda da geometria da linha e do meio no qual se encontram os condutores.

Geometria da linha de transmissão

A geometria da linha de transmissão é determinada pela forma como os condutores em cada fase são dispostos. É definida pelas suas características físicas e o desempenho da linha depende quase exclusivamente da sua geometria, que determina seu comportamento em regime normal de operação definindo seus parâmetros elétricos, como também quando submetida à sobretensões de qualquer natureza. (FUCHS, 1977)

Cabos condutores

Os cabos condutores constituem os elementos ativos da linha de transmissão e, por isso, seu dimensionamento tem fundamental importância para um bom funcionamento da linha. De forma universal são utilizados cabos de ligas de cobre ou de alumínio, pois são os que possuem o maior número de propriedades adequadas para as linhas aéreas como, por exemplo, alta condutibilidade elétrica e boa resistência mecânica. E devido ao menor custo quando comparado aos cabos de cobre, os cabos de ligas de alumínio são os mais utilizados. No Brasil, os cabos tanto de liga de cobre, quanto os de alumínio têm suas seções padronizadas pela ABNT que baseia-se na padronização norte-americana AWG (American Wire Gauge).

Condutores múltiplos

De modo geral, todas as linhas de transmissão em tensões acima de 300kV são construídas com condutores múltiplos com o objetivo de reduzir o gradiente de potencial (taxa de variação do potencial elétrico) nas superfícies dos condutores. Assim, o número de subcondutores por condutor múltiplo, os diâmetros dos subcondutores e o espaçamento entre eles devem ser cuidadosamente determinados, porque um número elevado de subcondutores por feixe tende a ter um desempenho melhor do que um número menor de subcondutores para uma mesma capacidade térmica de transporte, porém há um aumento do custo do equipamento e nas despesas de instalação,

favorecendo um uso de um número menor de subcondutores por condutor múltiplo. O espaçamento entre o subcondutores também é importante no desempenho das linhas. Dessa forma, a quantidade de subcondutores e o espaçamento entre eles devem ser definidos de acordo com as classes de tensão.

Estruturas das linhas de transmissão

As estruturas da linha de transmissão são os elementos que sustentam os cabos condutores e suas dimensões dependem de diversos fatores, entre eles a disposição dos condutores e a distância entre eles.

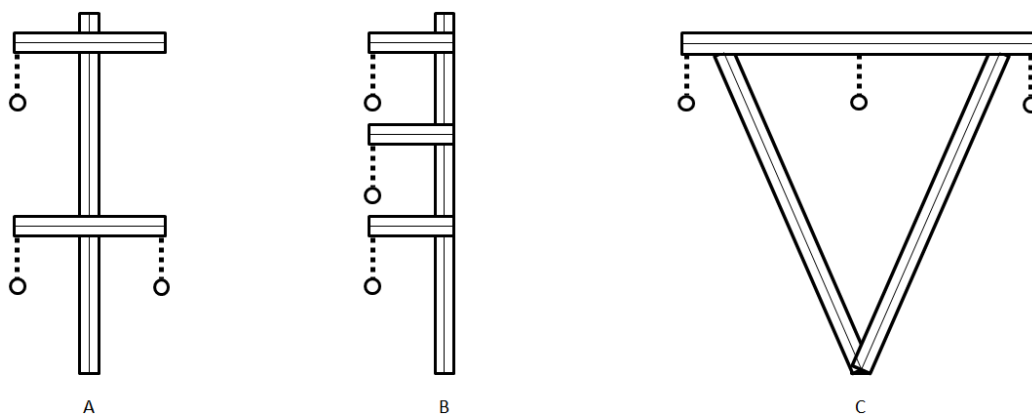
De forma geral, nas linhas trifásicas são empregadas três disposições de condutores:

- Triangular: os condutores são dispostos formando os vértices de um triângulo;
- Horizontal: os condutores são fixados em um mesmo plano horizontal e é muito utilizada para linhas a circuito simples.
- Vertical: os condutores são montados de forma linear em um plano vertical.

Para linhas a circuitos duplos em que as fases são compostas por dois condutores, as disposições triangulares e verticais são as mais usadas. A configuração horizontal para essas linhas exigiria estruturas muito largas ou causaria a sobreposição dos circuitos.

Na figura 2.2 estão ilustradas algumas geometrias de linha de transmissão em diferentes estruturas.

Figura 2.2 – Exemplos de torres de Linha de Transmissão: A- triangular; B-vertical; C-horizontal



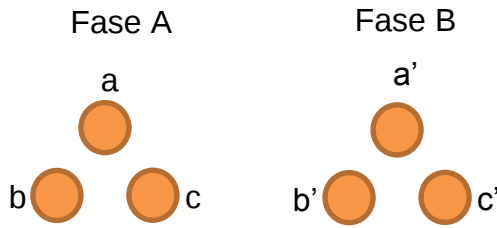
Fonte: Elaborado pela própria autora

Distância Média Geométrica e Raio Médio Geométrico dos cabos condutores

Os condutores usados nas linhas de transmissão são construídos com uma quantidade variável de cabos cilíndricos maciços e as linhas, por sua vez, são constituídas de condutores múltiplos. Por isso, é necessário calcular um coeficiente de campo próprio dos cabos condutores definidos como Distância Média Geométrica (DMG) e Raio Médio Geométrico (RMG).

A Distância Média Geométrica (DMG) é calculada a partir da distância entre cada um dos filamentos de um condutor e os filamentos do outro condutor de acordo com a equação 2.2, onde m é o número de condutores da fase A e n é o número de condutores da fase B. Na figura 2.3 é ilustrada a disposição dos condutores em cada fase.

Figura 2.3 - Disposição dos condutores



Fonte: Elaborado pela própria autora

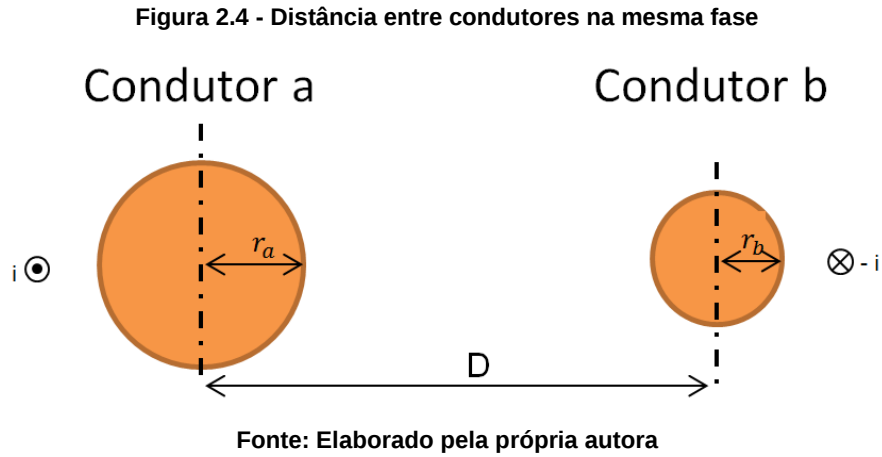
$$DMG = \sqrt[mn]{(D_{aa'}D_{ab'} \cdots D_{am})(D_{ba'}D_{bb'} \cdots D_{bm}) \cdots (D_{na'}D_{nb'} \cdots D_{nm})} \quad (2.2)$$

O parâmetro Raio Médio Geométrico (RMG) é calculado de acordo com a equação 2.3, onde n é o número de condutores da fase.

$$RMG = \sqrt[n^2]{(D_{aa}D_{ab} \cdots D_{an})(D_{ba}D_{bb} \cdots D_{bn}) \cdots (D_{na}D_{nb} \cdots D_{nn})} \quad (2.3)$$

Cálculo do RMG devido ao efeito pelicular

Para o cálculo do raio médio geométrico (RMG) considerar dois condutores na mesma fase, conforme é ilustrado na figura 2.4.



Hipótese simplificadora:

$$r_a \ll D$$

$$r_b \ll D$$

Admitir $D \gg r_a, r_b \rightarrow (D - r_a) \approx (D - r_b) \approx D$;

Na figura 2.4, considerar condutor b como um ponto localizado a uma distância D do centro do condutor a.

Então as indutâncias externas produzidas pelos condutores a e b são, respectivamente, dadas pelas equações 2.4 e 2.5.

$$L_{a_{ext}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{D}{r_a} \quad (2.4)$$

$$L_{b_{ext}} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{D}{r_b} \quad (2.5)$$

Nas indutâncias internas, cada condutor enxerga o outro como um ponto.

O fluxo externo de um condutor não afetará o fluxo interno do outro. Então, temos as indutâncias internas calculadas pelas equações 2.6 e 2.7.

$$L_{a_{int}} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} [H/m] \quad (2.6)$$

$$L_{b_{int}} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} [H/m] \quad (2.7)$$

A indutância total devido ao condutor a é calculada de acordo com as equações 2.8 e 2.9.

$$L_a = L_{a_{int}} + L_{a_{ext}} \quad (2.8)$$

$$L_a = \frac{\mu_0}{8\pi} + \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{D}{r_a} \quad (2.9)$$

Considerando $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [H/m]$, a indutância do condutor a é dada pela equação 2.11.

$$L_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{4} + \ln \left(\frac{D}{r_a} \right) \right] \quad (2.10)$$

$$L_a = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left(\frac{D}{r'_a} \right) \quad (2.11)$$

E, o raio médio geométrico do condutor a é, finalmente, dado pela equação 2.12.

$$r'_a = r_a \cdot e^{-\frac{1}{4}} = 0,7788 \cdot r_a \quad (2.12)$$

Assim, a geometria da linha de transmissão, definida pela forma como estão dispostos os condutores de cada fase nas estruturas da rede de

transmissão (torre), é representada no cálculo de L e C pela distância média geométrica (DMG) e o raio médio geométrico (RMG).

O meio onde estão os condutores, por sua vez, é representado pelas constantes de permeabilidade (μ), no caso da indutância, e pela permissividade do meio (ϵ), no caso da capacitância.

Com os parâmetros RMG e DMG os valores de indutância e capacitância de qualquer uma das fases são calculados de acordo com as equações 2.13 e 2.14, respectivamente.

$$L_X = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi} \ln \frac{DMG_{3\phi}}{RMG_X} \quad [H/m] \quad (2.13)$$

$$C_X = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln (DMG_{3\phi}/RMG_X)} \quad [F/m] \quad (2.14)$$

Nas equações 2.13 e 2.14 é possível perceber apenas a influência da geometria da rede e do meio no qual estão os condutores no cálculo dos dois parâmetros, indutância e capacitância.

A partir da definição do valor da indutância, é possível determinar a reatância indutiva da linha (X), calculada de acordo com a equação 2.15, onde f é a frequência da corrente alternada em hertz (Hz), e então definir a impedância série da linha de transmissão (Z_{LT}), composta pela resistência (R) e pela reatância indutiva (X), de acordo com a equação 2.16.

$$X = 2\pi f L \quad (2.15)$$

$$Z_{LT} = R + jX \quad (2.16)$$

A partir do valor da capacitância da linha, é determinado o valor da susceptância (B), calculado de acordo com a equação 2.17. Os parâmetros condutância (G) e susceptância (B) representam os elementos em derivação entre fase e neutro na linha de transmissão e compõem a admitância em derivação da linha de transmissão (Y_{LT}), de acordo com a equação 2.18.

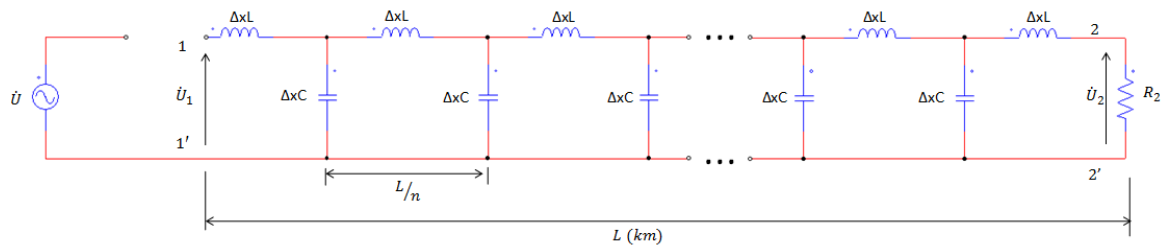
$$B = 2\pi fC \quad (2.17)$$

$$Y_{LT} = G + jB \quad (2.18)$$

Energização da linha de transmissão

Considerando uma linha de transmissão ideal formada por dois condutores metálicos, retílineos e completamente isolados, e de comprimento qualquer, a resistência elétrica dos condutores é considerada nula e o dielétrico entre os condutores é considerado perfeito, de forma que não haja perda de energia considerável. Entre dois condutores separados por dielétricos são definidas uma capacitância C [F/km] e uma indutância L [H/km]. E considera-se ainda que junto ao receptor haja um dissipador de energia representado por R_2 . Um circuito equivalente é representado na figura 2.5.

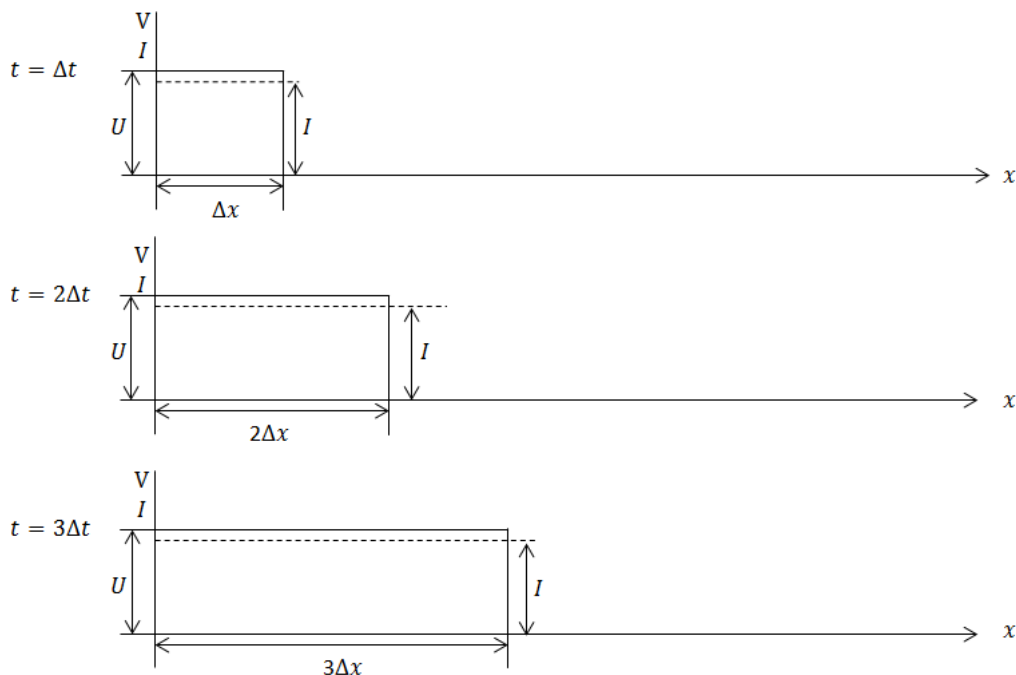
Figura 2.5 - Circuito equivalente de uma linha ideal



Fonte: Elaborado pela própria autora

Aplicando uma diferença de potencial U [volts] nos terminais 1 e 1' no instante $t=0$ a tensão U só poderá aparecer nos terminais da capacitância após decorridos Δt [segundos], pois a corrente através de ΔxL não pode atingir instantaneamente o seu valor I_0 [amperes]. Levará outro intervalo de tempo Δt para que o capacitor do trecho Δx seguinte atinja o valor U como é ilustrado na figura 2.6, e assim sucessivamente até que a corrente fornecida pela fonte, uma vez atingido o valor I_0 se mantém constante. É a corrente de carga da linha. Portanto, existe um intervalo de tempo para que o receptor atinja a tensão aplicada no transmissor.

Figura 2.6 - Propagação da tensão ao longo da linha no decorrer do tempo



Fonte: Elaborado pela própria autora

A presença das cargas elétricas é responsável pela existência dos campos elétricos e o seu movimento do transmissor para o receptor é responsável pelo campo magnético. Esse movimento das cargas é chamado de propagação e sua velocidade para uma linha de comprimento l [km] pode ser calculada de acordo com a equação 2.19.

$$v = \frac{l}{t} \text{ [km/s]} \quad (2.19)$$

Onde t [s] é o tempo necessário para que a tensão no receptor atinja o valor U [V].

Após o momento em que a tensão é aplicada, começa a fluir na linha uma corrente com intensidade que independe do comprimento da linha e que é suprida pela fonte de tensão enquanto seu valor permanecer inalterado. Assim, podemos determinar uma impedância de entrada da linha de acordo com a equação 2.20.

$$Z_0 = \frac{U}{I_0} \text{ [\Omega]} \quad (2.20)$$

O valor de Z_0 também pode ser definido de acordo com a equação 2.21, demonstrando que depende apenas do meio que se encontra e, conseqüentemente da geometria da linha.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega] \quad (2.21)$$

Portanto, Z_0 é constante para cada linha e é considerada uma grandeza característica chamada de impedância natural da linha ou impedância de surto.

A velocidade de propagação dos campos elétricos e magnéticos da linha também pode ser calculada em função da indutância e capacitância, de acordo com a equação 2.22.

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} [km/s] \quad (2.22)$$

Assim, a corrente de carga de uma linha energizada com uma fonte de tensão não depende do seu comprimento, pois é definida de acordo com a equação 2.23.

$$I_0 = \frac{U}{Z_0} [A] \quad (2.23)$$

Tensão e corrente com e sem carga

De acordo com Fuchs (1977), em cada intervalo de tempo Δt necessário para energizar um trecho de comprimento Δx da LT, a fonte fornece à linha uma quantidade de energia dada por $UI_0\Delta t$. Em uma linha ideal, essa energia é toda armazenada nos campos elétrico e magnético e pode ser calculada, respectivamente, pelas equações 2.24 e 2.25.

$$\Delta E_e = \frac{U^2 C \Delta x}{2} \quad (2.24)$$

$$\Delta E_m = \frac{I_0^2 L \Delta x}{2} \quad (2.25)$$

Portanto, a energia fornecida pela fonte pode ser expressa pela equação 2.26.

$$UI_0 \Delta t = \frac{U^2 C \Delta x}{2} + \frac{I_0^2 L \Delta x}{2} \quad (2.26)$$

Sabe-se que $U = I_0 Z_0 = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}$. Substituindo os termos na equação 2.24, chega-se à equação 2.27.

$$\Delta E_e = \left(I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \right)^2 \frac{C \Delta x}{2} = \frac{I_0^2 L \Delta x}{2} \quad (2.27)$$

A equação 2.27 mostra que a quantidade de energia armazenada pelo campo elétrico é exatamente igual à quantidade armazenada no campo magnético. Isso significa que cada um dos campos armazena metade da energia fornecida pela fonte. O que altera essa distribuição de energia entre os dois campos é a forma como a linha é terminada. Depende, portanto, do seu receptor.

Supondo uma linha de comprimento l [m] e que na extremidade receptora tenha uma carga $|R_2| = |Z_0|$, terem-se que $U = I_0 Z_0 = I_0 R_2$. Portanto,

$$I_0 = \frac{U}{Z_0} = \frac{U}{R_2} \quad (2.28)$$

E como no receptor não há campos magnéticos e elétricos armazenando energia, toda a energia fornecida pela fonte será dissipada em R_2 . Assim, tem-se a expressão dada na equação 2.29.

$$UI_0 \Delta t = I_0^2 R_2 \Delta t \quad (2.29)$$

E a corrente I_0 continuará com a mesma intensidade inicial como se a linha fosse de comprimento infinito, independente do valor de l [m]. Uma linha assim é denominada linha de comprimento infinito.

Se, por outro lado, a resistência na unidade receptora (R_2) for maior que a impedância Z_0 , a corrente através da resistência R_2 será menor que a corrente inicial do transmissor, conseqüentemente a potência dissipada no receptor também será menor. Assim, a redução da corrente na linha leva também a uma redução da energia armazenada no campo magnético, que por sua vez, cede energia ao campo elétrico causando uma elevação da tensão no receptor.

Avaliando o caso extremo, em que a linha está aberta junto ao receptor, a corrente se reduz a zero progressivamente do transmissor ao receptor e o campo elétrico tem que armazenar toda a energia da fonte. Em uma linha ideal aberta a tensão no receptor cresce ao dobro do valor da tensão aplicada. Esse fenômeno em que ocorre a elevação da tensão no transmissor em relação ao receptor é chamado de Efeito Ferranti.

Caso a resistência na unidade receptora (R_2) seja menor que a impedância Z_0 , a corrente que circula pelo receptor será maior que a originada pela fonte e conseqüentemente a potência dissipada no receptor será maior. Dessa forma, o campo magnético passa a armazenar maior quantidade de energia cedida pelo campo elétrico. Haverá, portanto uma redução da tensão no receptor.

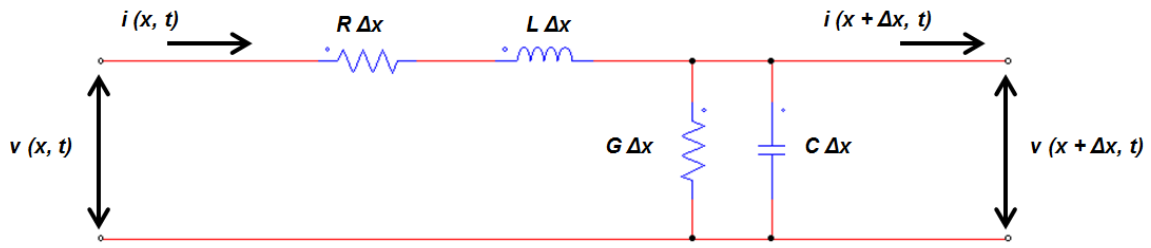
Considerando o caso extremo de um curto-circuito no receptor, a tensão será nula e haverá um aumento no valor da corrente, pois toda a energia será armazenada no campo magnético. Portanto, em uma linha em curto-circuito, a corrente crescerá, no receptor, ao dobro do seu valor.

Modelagem de LTs curtas, médias e longas

O comportamento das LTs pode ser equacionado e solucionado a partir de diferentes métodos, o que dá origem a uma variedade de modelos matemáticos de LTs apresentados na literatura técnica.

Uma linha real pode ser representada com suas perdas nos condutores r [ohm/km] e perdas nos dielétricos g [siemens/km] por um circuito equivalente de um elemento de comprimento Δx da linha. Considerando a linha com seus parâmetros elétricos uniformemente distribuídos são deduzidas as equações gerais das linhas de transmissão através de equações diferenciais a partir do circuito da figura 2.7.

Figura 2.7 - Circuito equivalente de um elemento Δx de uma linha real



Fonte: Elaborado pela própria autora

Equações diferenciais da linha de transmissão

Entre o início e o fim do elemento infinitesimal de linha há uma diferença de potencial calculada de acordo com a equação 2.30. O sinal negativo indica que os valores de tensão decrescem com valores positivos de corrente.

$$-\frac{\partial u}{\partial x} \Delta x = (\Delta x r) i + (\Delta x L) \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.30)$$

Dividindo os termos da equação por Δx obtem-se a equação 2.31.

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = r i + L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.31)$$

Tem-se a equação diferencial 2.32 para a corrente.

$$-\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = (\Delta x g) u + (\Delta x C) \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.32)$$

Dividindo por Δx obtem-se a equação 2.33.

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = g u + C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.33)$$

Derivando a equação 2.31 em relação a x e a equação 2.33 em relação a t , obtem-se as equações 2.34 e 2.35, respectivamente.

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = r \frac{\partial i}{\partial x} + L \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} \quad (2.34)$$

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = g \frac{\partial u}{\partial t} + C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.35)$$

E derivando a equação 2.31 em relação a t e a equação 2.33 em relação a x , obtem-se as equações 2.36 e 2.37 respectivamente.

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = r \frac{\partial i}{\partial t} + L \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2.36)$$

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = g \frac{\partial u}{\partial x} + C \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} \quad (2.37)$$

Sabe-se que $\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = \frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x}$ e que $\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x}$

Obtem-se as equações 2.38 e 2.39.

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = r g u + (r C + L g) \frac{\partial u}{\partial t} + L C \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.38)$$

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = r g i + (r C + L g) \frac{\partial i}{\partial t} + L C \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2.39)$$

As equações 2.38 e 2.39 são as equações diferenciais gerais da linha de transmissão.

Solução das equações diferenciais no domínio da frequência

Considerando a linha de transmissão em regime permanente alimentada por corrente alternada de frequência constante, pode-se definir a tensão u e a corrente i como funções senoidais do tempo, de acordo com as equações 2.40 e 2.41.

$$u = U_x \sin \omega t \quad (2.40)$$

$$i = I_x \sin(\omega t + \phi) \quad (2.41)$$

Definindo as funções senoidais como fasores $\dot{U}$ e $\dot{I}$, respectivamente, pode-se reescrever as equações gerais das linhas de transmissão, equações 2.42 e 2.43.

$$-\frac{\partial^2 \dot{U}_x}{\partial x^2} = rg\dot{U}_x + (rC + Lg)\frac{\partial \dot{U}_x}{\partial t} + LC\frac{\partial^2 \dot{U}_x}{\partial t^2} \quad (2.42)$$

$$-\frac{\partial^2 \dot{I}_x}{\partial x^2} = rg\dot{I}_x + (rC + Lg)\frac{\partial \dot{I}_x}{\partial t} + LC\frac{\partial^2 \dot{I}_x}{\partial t^2} \quad (2.43)$$

Em notação operacional, obtém-se 2.44 e 2.45.

$$-\frac{\partial^2 \dot{U}_x}{\partial x^2} = rg\dot{U}_x + (rC + Lg)p\dot{U}_x + LCp^2\dot{U}_x \quad (2.44)$$

$$-\frac{\partial^2 \dot{I}_x}{\partial x^2} = rg\dot{I}_x + (rC + Lg)p\dot{I}_x + LCp^2\dot{I}_x \quad (2.45)$$

Sendo $p = j\omega$, obtém-se as equações 2.46 e 2.47.

$$-\frac{\partial^2 \dot{U}_x}{\partial x^2} = rg\dot{U}_x + (rC + Lg)j\omega\dot{U}_x + LC(j\omega)^2\dot{U}_x \quad (2.46)$$

$$-\frac{\partial^2 \dot{I}_x}{\partial x^2} = r g \dot{I}_x + (rC + Lg)j\omega \dot{I}_x + LC(j\omega)^2 \dot{I}_x \quad (2.47)$$

Que podem ser transformadas em 2.48 e 2.49.

$$\frac{\partial^2 \dot{U}_x}{\partial x^2} (r + j\omega L) (g + j\omega C) \dot{U}_x = \dot{z} \dot{y} \dot{U}_x \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{I}_x}{\partial x^2} (r + j\omega L) (g + j\omega C) \dot{I}_x = \dot{z} \dot{y} \dot{I}_x \quad (2.49)$$

Seja a equação 2.50 uma solução admissível para a equação 2.48.

$$\dot{U}_x = \dot{A}_1 e^{x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}} + \dot{A}_2 e^{-x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}} \quad [V] \quad (2.50)$$

Derivando duas vezes em relação a x , obtém-se a equação 2.51.

$$\frac{\partial^2 \dot{U}_x}{\partial x^2} = \dot{z} \dot{y} (\dot{A}_1 e^{x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}} + \dot{A}_2 e^{-x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}}) = \dot{z} \dot{y} \dot{U}_x \quad (2.51)$$

Seguindo o mesmo raciocínio para a equação das correntes, obtém-se 2.52.

$$\dot{I}_x = \frac{1}{\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}} (\dot{A}_1 e^{x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}} - \dot{A}_2 e^{-x\sqrt{\dot{z}\dot{y}}}) \quad [A] \quad (2.52)$$

Como as condições do receptor determinam o comportamento da linha, pegamos o receptor como referência, de forma que se $x = 0$, tem-se $\dot{U}_x = \dot{U}_2$ e $\dot{I}_x = \dot{I}_2$. Assim, obtém-se as equações 2.53 e 2.54 a partir das equações 2.48 e 2.49.

$$\dot{U}_2 = \dot{A}_1 + \dot{A}_2 \quad [V] \quad (2.53)$$

$$i_2 = \frac{1}{\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}} (\dot{A}_1 - \dot{A}_2) \quad (2.54)$$

De onde suas soluções simultâneas resultam nas equações 2.55 e 2.56.

$$\dot{A}_1 = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2} \quad (2.55)$$

$$\dot{A}_2 = \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2} \quad (2.56)$$

Aplicando as equações 2.55 e 2.56 nas equações 2.50 e 2.52, obtém-se as equações 2.57 e 2.58, respectivamente.

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2} e^{x\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2} e^{-x\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}} [V] \quad (2.57)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}} e^{x\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}} - \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}{2\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}} e^{-x\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}} [A] \quad (2.58)$$

Dessa forma, chega-se às equações gerais das linhas de transmissão de corrente alternada senoidal em regime permanente que a partir das quais podemos calcular os valores de tensão e corrente em qualquer ponto da LT em função das condições existentes no receptor. De acordo com Fuchs, 1977, são equações exatas que servem de base para a derivação de processos de cálculo simplificados que são utilizados na prática e sua validade pode ser verificada por meio da interpretação do significado dos termos que as compõem.

Interpretação das equações gerais das linhas de transmissão

Analisando as equações gerais da linha de transmissão observa-se que ambas têm em comum os termos $e^{\pm x\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}}$ e $\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}$. Denominando $\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}$ de $\dot{\gamma}$, e desenvolvendo os fasores, obtém-se a equação 2.59.

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{z}\dot{y}} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} = \sqrt{(r + jx_L)(g + jb)} \quad (2.59)$$

Elevando os membros ao quadrado e separando os termos reais e imaginários, obtém-se as equações 2.60 e 2.61.

$$\alpha = \text{Re}\{\dot{\gamma}\} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(rg - \omega^2 LC) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L)(g^2 + \omega^2 C^2)} \right]} \quad (2.60)$$

$$\beta = \text{Im}\{\dot{\gamma}\} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\omega^2 LC - rg) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L)(g^2 + \omega^2 C^2)} \right]} \quad (2.61)$$

Dessa forma, pode-se chegar à expressão da equação 2.62.

$$e^{\pm x \sqrt{\dot{z}\dot{y}}} = e^{\pm \dot{\gamma} x} = e^{\pm \alpha x} e^{\pm \beta x} \quad (2.62)$$

Lembrando que funções exponenciais aplicadas a fasores modulam as funções senoidais que representam, tem-se que a função senoidal com a exponencial complexa da equação 2.61 sofre um amortecimento causado por $e^{\pm \alpha x}$ em que o sinal negativo ou positivo provoca a diminuição ou o aumento das amplitudes das ondas senoidais de forma exponencial à medida que a distância x do receptor ao ponto considerado aumenta ao mesmo tempo em que ocorre um avanço de $\pm \beta x$ na fase da onda a qual é aplicado. (Fuchs, 1977)

Portanto, $\dot{\gamma}$ determina a forma que as tensões e correntes se propagam ao longo da linha, e, por isso, recebe o nome de função de propagação. Nas linhas de transmissão de energia elétrica em regime permanente em que a frequência é constante, $\dot{\gamma}$ é chamado de constante de propagação, pois, nesse caso, ela realmente é uma constante.

A constante de propagação, como foi visto, é formada por uma parte real (α), responsável pelo amortecimento ou atenuação, que recebe o nome de função de atenuação e está relacionada com as perdas de energia na linha; e por uma parte imaginária (β) que recebe o nome de função de fase ou

constante de fase, pois indica a forma como as fases da tensão e da corrente variam ao longo da linha.

Desenvolvendo o termo $\sqrt{\dot{z}/\dot{y}}$, obtém-se a equação 2.63, de onde calcula-se a impedância característica da linha de transmissão.

$$\sqrt{\dot{z}/\dot{y}} = \frac{\sqrt{r + j\omega L}}{\sqrt{g + j\omega C}} = \dot{Z}_c \quad [ohm] \quad (2.63)$$

Fazendo $r = g = 0$ obtém-se a mesma expressão para calcular a impedância natural da linha, Z_0 . E como nas linhas reais geralmente os valores de r e g são pequenos quando comparados com L e C , seu valor absoluto não é muito diferente do valor da impedância natural. Por isso, a maioria dos autores não diferenciam os valores de Z_0 e $\dot{Z}_c$ e denominam as duas grandezas de impedância natural da linha.

Cálculo das tensões e correntes da linha de transmissão

A partir do desenvolvimento das equações diferenciais baseado no circuito da figura 2.6 são obtidas as equações gerais das linhas de transmissão com parâmetros distribuídos, equações 2.64 e 2.65, que relacionam as tensões e correntes da linha.

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \left(\frac{e^{\dot{\gamma}l} + e^{-\dot{\gamma}l}}{2} \right) + \dot{I}_2 \dot{Z}_c \left(\frac{e^{\dot{\gamma}l} - e^{-\dot{\gamma}l}}{2} \right) [V] \quad (2.64)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \left(\frac{e^{\dot{\gamma}l} + e^{-\dot{\gamma}l}}{2} \right) + \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_c} \left(\frac{e^{\dot{\gamma}l} - e^{-\dot{\gamma}l}}{2} \right) [A] \quad (2.65)$$

As funções exponenciais das equações 2.64 e 2.65 podem ser escritas na sua forma hiperbólica, de acordo com as equações 2.66 e 2.67.

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cosh \dot{\gamma}l + \dot{I}_2 \dot{Z}_c \sinh \dot{\gamma}l [V] \quad (2.66)$$

$$I_1 = I_2 \cosh \gamma l + \frac{U_2}{Z_c} \sinh \gamma l [A] \quad (2.67)$$

Fazendo a expansão em série das funções hiperbólicas, são obtidas as equações 2.68 e 2.69.

$$\cosh \gamma l = 1 + \frac{(\sqrt{ZY})^2}{2!} + \frac{(\sqrt{ZY})^4}{4!} + \frac{(\sqrt{ZY})^6}{6!} + \dots \quad (2.68)$$

$$\sinh \gamma l = \sqrt{ZY} + \frac{(\sqrt{ZY})^3}{3!} + \frac{(\sqrt{ZY})^5}{5!} + \frac{(\sqrt{ZY})^7}{7!} + \dots \quad (2.69)$$

De acordo com Fuchs (1977), as rápidas convergências das séries expressas em 2.68 e 2.69 permitem escrever as equações para tensão e corrente por métodos de cálculo simplificados e, assim, obter circuitos equivalentes em função do comprimento das linhas.

As equações gerais da linha com parâmetros uniformemente distribuídos não são consideradas rigorosamente exatas. O que determina a escolha do processo de cálculo é a relação entre o comprimento real da linha e o seu comprimento de onda, pois quanto maior essa relação, mais rigoroso deverá ser o processo de cálculo. (Fuchs, 1977)

O comprimento de onda (λ) de uma linha é definido como a distância entre dois pontos mais próximos da onda senoidal na direção da sua propagação cujas fases de oscilação estejam separadas de 2π . É calculada pela razão entre a velocidade de propagação do sinal (v) e a sua frequência (f), como é mostrado na equação 2.70.

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.70)$$

Assim, através de hipóteses simplificativas devidamente justificadas, foram desenvolvidos circuitos equivalentes que deram origem a modelos matemáticos que podem ser utilizados conforme comprimento da linha.

Linhas curtas

As linhas em que somente os primeiros termos de cada série tenham valor significativo devido ao valor absoluto de γl e, principalmente, ao seu comprimento l [km] são chamadas de linhas curtas.

Substituindo os $\cosh(\gamma l)$ e $\sinh(\gamma l)$ pelo primeiro termo da expansão em série 2.68 e 2.69, respectivamente, obtemos equações simplificadas para a expressão da tensão e da corrente, conforme 2.72 e 2.74.

Lembrando que $\dot{Z}_c = \frac{\sqrt{\dot{Z}}}{\sqrt{\dot{Y}}}$.

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \dot{Z}_c \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}} = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \sqrt{\frac{\dot{Z}}{\dot{Y}}} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}} \quad (2.71)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \dot{Z} [V] \quad (2.72)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_c} \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}} = \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \sqrt{\frac{\dot{Y}}{\dot{Z}}} \cdot \sqrt{\dot{Z} \dot{Y}} \quad (2.73)$$

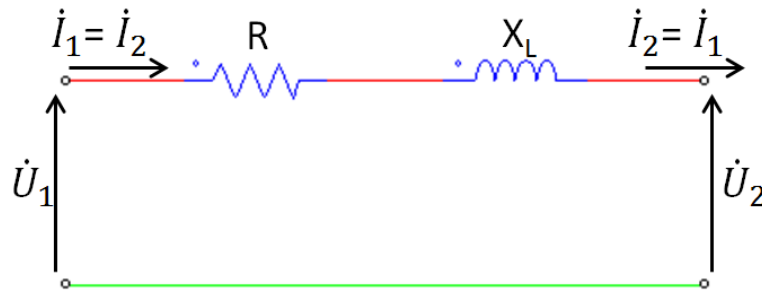
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \dot{Y} [A] \quad (2.74)$$

Como no caso das linhas curtas, o produto $\dot{U}_2 \dot{Y}$ é muito pequeno quando comparado com o valor de $\dot{I}_2$, ele pode ser desprezado, fazendo $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$.

Dessa forma, pode-se desenvolver a equação 2.72, chegando a equação 2.75 que representa um circuito série, de acordo com a figura 2.8.

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2}{\dot{Z}} [A] \quad (2.75)$$

Figura 2.8 - Circuito equivalente de uma linha curta



Fonte: Elaborada pela própria autora

Assim, representa-se os parâmetros da linha de forma concentrada desprezando inteiramente os efeitos da condutibilidade G e da capacitância C .

De acordo com Fuchs (1977), podem ser classificados como linhas curtas:

- Linhas até 150 kV, com comprimento máximo de 80km;
- Linhas com tensões maiores ou iguais 150kV, porém menores que 400kV, com comprimento máximo de 40km;
- Linhas em tensões iguais ou maiores do que 400kV, com comprimento máximo de 20 km.

Linhas médias

Linhas com limites maiores do que os estabelecidos na seção anterior devem incluir em seu equacionamento dois ou mais termos da expansão em série do $\cosh(\gamma l)$ e $\sinh(\gamma l)$, pois como dependem do comprimento, nesse caso os termos terão valores mais significativos.

De acordo com Fuchs (1977), quando o segundo termo da série não for insignificante perante o primeiro termo, mas se o terceiro for, a linha pode ser classificada como linha média.

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \left(1 + \frac{(\sqrt{\dot{Z}\dot{Y}})^2}{2!} \right) + \dot{I}_2 \dot{Z}_c \left(\sqrt{\dot{Z}\dot{Y}} + \frac{(\sqrt{\dot{Z}\dot{Y}})^3}{3!} \right) \quad (2.76)$$

$$i_1 = i_2 \left(1 + \frac{(\sqrt{\dot{Z}\dot{Y}})^2}{2!} \right) + \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_c} \left(\sqrt{\dot{Z}\dot{Y}} + \frac{(\sqrt{\dot{Z}\dot{Y}})^3}{3!} \right) \quad (2.77)$$

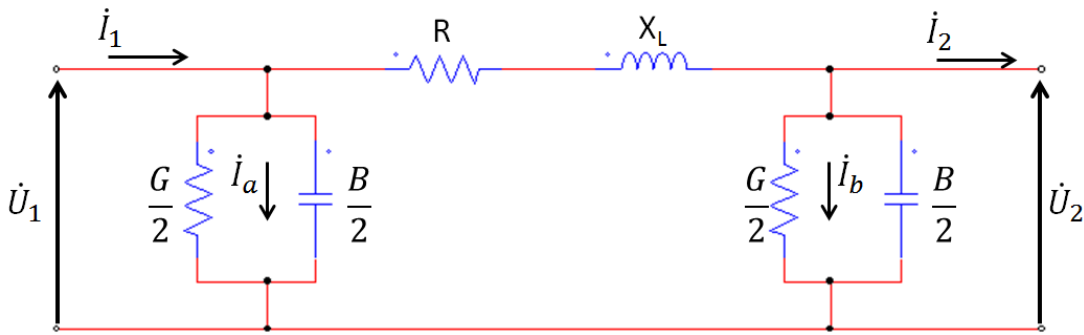
Assim, são obtidas as equações 2.78 e 2.79.

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \right) + i_2 \dot{Z} \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{6} \right) [V] \quad (2.78)$$

$$i_1 = i_2 \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \right) + \dot{U}_2 \dot{Y} \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{6} \right) [A] \quad (2.79)$$

O circuito equivalente utilizado para representar linhas médias é o circuito Pi, figura 2.9.

Figura 2.9 - Circuito Pi



Fonte: Elaborado pela própria autora

As equações 2.80 e 2.81 são utilizadas para representar o circuito Pi e têm grande semelhança com as equações 2.78 e 2.79, principalmente considerando que $\dot{Z}\dot{Y}$ tem valor muito pequeno.

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \right) + i_2 \dot{Z} [V] \quad (2.80)$$

$$i_1 = i_2 \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \right) + \dot{U}_2 \dot{Y} \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4} \right) [A] \quad (2.81)$$

Todos os parâmetros elétricos são representados de forma concentrada sendo desnecessário considerar os efeitos de sua distribuição. Na maioria dos

casos práticos, a condutância de dispersão G é suficientemente pequena para poder ser desprezada. (Fuchs, 1977)

São classificadas como linhas médias:

- Linhas entre 150kV e 400kV com comprimento até 200km;
- Linhas acima de 400kV e comprimentos inferiores a 100km.

Linhas longas

As linhas longas exigem maior precisão nos cálculos não sendo suficientes os métodos utilizados para linhas curtas e médias. Nesse caso, são usadas as equações em forma exponencial ou hiperbólica e é utilizado um circuito Pi na sua representação desde que sejam aplicadas as correções necessárias para ter em conta o efeito da sua distribuição ao longo da linha.

Dessa forma, na representação da linha longa em regime permanente é utilizado um circuito Pi com os parâmetros elétricos $\dot{Z}$ e $\dot{Y}/2$ corrigidos para $\dot{Z}'$ e $\dot{Y}'/2$, de acordo com as equações 2.82 e 2.83 para retratar a condição de parâmetros distribuídos.

$$\dot{Z}' = \dot{Z} \frac{\sinh \dot{\gamma} l}{\dot{\gamma} l} \text{ [ohm]} \quad (2.82)$$

$$\frac{\dot{Y}'}{2} = \frac{\dot{Y}}{2} \frac{\tanh \frac{\dot{\gamma} l}{2}}{\frac{\dot{\gamma} l}{2}} \text{ [siemens]} \quad (2.83)$$

Os fatores de correção se tornam unitários para valores pequenos de $\dot{\gamma} l$.

Os circuitos com parâmetros corrigidos recebem o nome de circuitos Pi equivalentes ou circuitos Pi nominais.

Na prática, se tratando de linhas bem dimensionadas, nas quais o valor da condutância de dispersão G é insignificante, esse parâmetro também pode ser desprezado no caso de linhas longas. (Fuchs, 1977)

Linhas de transmissão como quadripolos

Uma linha de transmissão trifásica pode ser representada por um circuito consistindo em dois terminais onde a energia elétrica penetra na linha, chamados de transmissor, e por dois terminais onde a energia deixa a linha, chamados de receptor. Devido as suas características, os circuitos que representam a linha podem ser classificados como quadripolos, como é ilustrado na figura 2.10.

Figura 2.10 – Quadripolo



Fonte: Elaborado pela própria autora

Assim, se $\dot{U}_2$ e $\dot{I}_2$ do quadripolo da figura 2.10 forem variáveis independentes, $\dot{U}_1$ e $\dot{I}_1$ serão suas variáveis dependentes relacionados com $\dot{U}_2$ e $\dot{I}_2$ através da impedância $\dot{Z}$ e da admitância $\dot{Y}$ do circuito, que escrevendo na forma matricial, temos a equação 2.84.

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

Por outro lado, se $\dot{U}_2$ e $\dot{I}_2$ forem variáveis dependentes, $\dot{U}_1$ e $\dot{I}_1$ serão as variáveis independentes que podem ser escritas na forma matricial, apresentada na equação 2.85.

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{D} & -\dot{B} \\ -\dot{C} & \dot{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

Lembrando que em circuitos simétricos, temos sempre que $\dot{A} = \dot{D}$. Além disso, outra propriedade dos quadripolos é que vale sempre o exposto na equação 2.86.

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C} = 1 \quad (2.86)$$

Dessa forma, as linhas de transmissão atendem aos requisitos para representação por meio de quadripolos e seu modelo matemático é definido pelas equações 2.84 e 2.85, onde as características da linha de transmissão são determinadas pelas constantes $\dot{A}$, $\dot{B}$, $\dot{C}$ e $\dot{D}$, que recebem o nome de constantes generalizadas da linha de transmissão.

No caso de linhas curtas, tem-se as constantes $\dot{A} = 1$, $\dot{B} = \dot{Z}$, $\dot{C} = 0$ e $\dot{D} = 1$, resultando na matriz 2.87.

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

Em linhas médias representadas pelo circuito Pi, as constantes generalizadas têm seu valor obtido de acordo com as equações 2.88, 2.89, 2.90 e 2.91.

$$\dot{A} = 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \quad (2.88)$$

$$\dot{B} = \dot{Z} \quad (2.89)$$

$$\dot{C} = \dot{Y} \left(1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{4} \right) \quad (2.90)$$

$$\dot{D} = 1 + \frac{\dot{Z}\dot{Y}}{2} \quad (2.91)$$

Em linhas longas as constantes generalizadas são obtidas com as funções hiperbólicas, de acordo com as equações 2.92 a 2.95, resultando na forma matricial expressa na equação 2.96.

$$\dot{A} = \cosh \dot{\gamma} l \quad (2.92)$$

$$\dot{B} = \dot{Z}_c \sinh \dot{\gamma} l \quad (2.93)$$

$$\dot{C} = \frac{1}{\dot{Z}_c} \sinh \dot{\gamma} l \quad (2.94)$$

$$\dot{D} = \cosh \dot{\gamma} l \quad (2.95)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \dot{\gamma} l & \dot{Z}_c \sinh \dot{\gamma} l \\ \frac{1}{\dot{Z}_c} \sinh \dot{\gamma} l & \cosh \dot{\gamma} l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.96)$$

Linhas artificiais

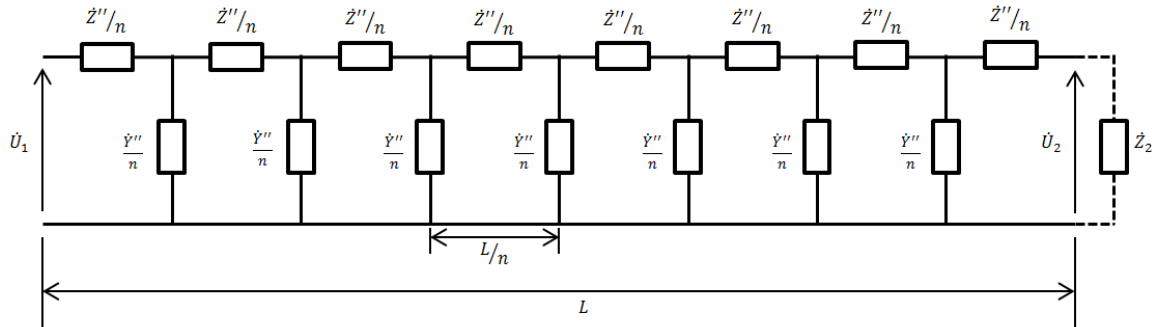
“Quando se deseja analisar fenômenos transitórios através de modelos elétricos, os circuitos Pi equivalentes são inapropriados, pois, neste caso, o efeito real da distribuição dos parâmetros ao longo da linha é importante. Recorre-se então às chamadas linhas artificiais, compostas de um número relativamente grande de células, ligadas em série. Cada célula poderá representar o circuito Pi nominal de um trecho de comprimento determinado.” (Fuchs, 1977)

As equações 2.97 e 2.98, onde n representa o número de células Pi, são utilizadas para calcular a impedância e a admitância de cada célula, que no caso de linhas artificiais, representarão de 20 a 25 km de linha.

$$\dot{Z}_i = \frac{\dot{Z}}{n} \quad (2.97)$$

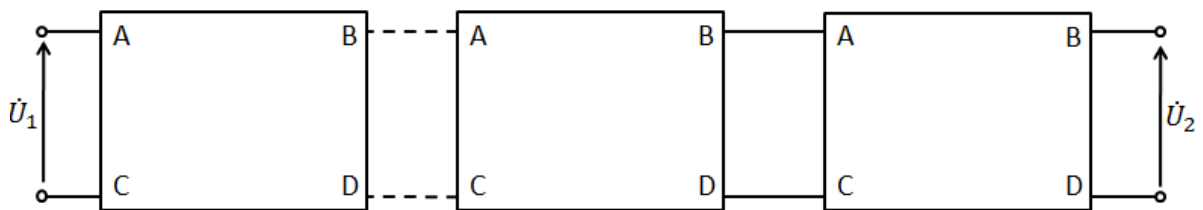
$$\dot{Y}_i = \frac{\dot{Y}}{n} \quad (2.98)$$

Figura 2.11 - Circuito equivalente da linha artificial



Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 2.12 - Cascata de quadripolos da linha artificial



Fonte: Elaborado pela própria autora

De acordo com Fuchs (1977), o modelo matemático conveniente para as linhas artificiais pode ser derivado pela associação em cascata de n quadripolos parciais iguais, cada qual representando L/n quilômetros de linha. Neste caso, cada quadripolo parcial poderá representar um circuito Pi nominal também de 20 a 25 km de linha.

Modelos matemáticos de linhas trifásicas

Os modelos matemáticos de linhas trifásicas são utilizados quando a configuração trifásica da linha precisa ser evidenciada, como acontece nos casos em que são analisados fenômenos relacionados com o desequilíbrio elétrico e magnético existente ao longo da linha.

O par de matrizes de ordem 3x3, matriz das impedâncias e matriz das admitâncias, define os parâmetros elétricos e magnéticos das linhas de um sistema de vários condutores.

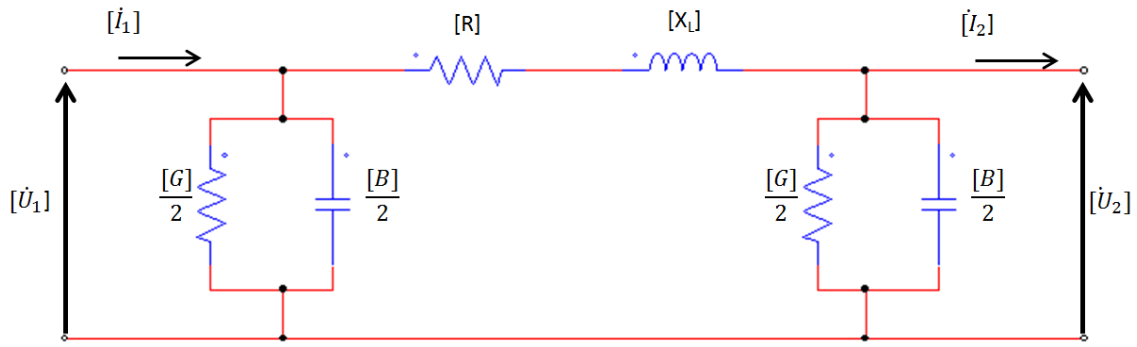
As matrizes das impedâncias $[\dot{Z}]$ e das admitâncias $[\dot{Y}]$ são representadas pelas equações 2.99 e 2.100, respectivamente.

$$[\dot{Z}] = [r] + j[x_L] \text{ e } [\dot{Z}] = [R] + j[X_L] \quad (2.99)$$

$$[\dot{Y}] = [g] + j[b] \text{ e } [\dot{Y}] = [G] + j[B] \quad (2.100)$$

Assim, pode-se, por exemplo, representar uma linha média por seu circuito Pi nominal, como é ilustrado na figura 2.13.

Figura 2.13 - Circuito simplificado da linha trifásica



Fonte: Elaborado pela própria autora

Utilizando os recursos da álgebra matricial, pode-se obter as equações de forma convencional a partir do modelo matemático correspondente, equações 2.101 e 2.102.

$$[\dot{U}_1] = \left\{ [1] + [\dot{Z}] \left[\frac{\dot{Y}}{2} \right] \right\} [\dot{U}_2] + [\dot{Z}] [\dot{I}_2] \quad (2.101)$$

$$[\dot{I}_1] = \left[\frac{\dot{Y}}{2} \right] + \left[\frac{\dot{Y}}{2} \right] \left\{ [1] + [\dot{Z}] \left[\frac{\dot{Y}}{2} \right] \right\} [\dot{U}_2] + \left\{ [1] + \left[\frac{\dot{Y}}{2} \right] [\dot{Z}] \right\} [\dot{I}_2] \quad (2.102)$$

E as constantes generalizadas da linha serão, nesse caso, matrizes de constantes. O modelo matemático da linha trifásica em termos das constantes generalizadas é dado por 2.103 e 2.104.

$$[\dot{U}_1] = [\dot{A}][\dot{U}_2] + [\dot{B}][\dot{I}_2] \quad (2.103)$$

$$[\dot{I}_1] = [\dot{C}][\dot{U}_2] + [\dot{D}][\dot{I}_2] \quad (2.104)$$

Ou

$$\begin{bmatrix} [\dot{U}_1] \\ [\dot{I}_1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\dot{A}] & [\dot{B}] \\ [\dot{C}] & [\dot{D}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\dot{U}_2] \\ [\dot{I}_2] \end{bmatrix} \quad (2.105)$$

Onde $[\dot{A}]$, $[\dot{B}]$, $[\dot{C}]$ e $[\dot{D}]$ são matrizes 3x3 e $[\dot{U}_1]$, $[\dot{U}_2]$, $[\dot{I}_1]$ e $[\dot{I}_2]$ são vetores. Para o circuito Pi as constantes generalizadas são dadas pelas equações 2.106 a 2.109.

$$[\dot{A}] = [1] + [\dot{Z}] \left[\frac{\dot{Y}}{2} \right] \quad (2.106)$$

$$[\dot{B}] = [\dot{Z}] \quad (2.107)$$

$$[\dot{C}] = \left[\frac{\dot{Y}}{2} \right] + \left[\frac{\dot{Y}}{2} \right] \left\{ [1] + [\dot{Z}] \left[\frac{\dot{Y}}{2} \right] \right\} \quad (2.108)$$

$$[\dot{D}] = [1] + \left[\frac{\dot{Y}}{2} \right] [\dot{Z}] \quad (2.109)$$

Nos casos de modelagem matemática de linhas longas, as dificuldades matemáticas encontradas para determinar as matrizes das constantes generalizadas tornariam os cálculos muito extensos. Portanto, nessas condições, o uso do modelo de linha artificial trifásica se mostra mais prático com elementos de 20 a 25 km de comprimento.

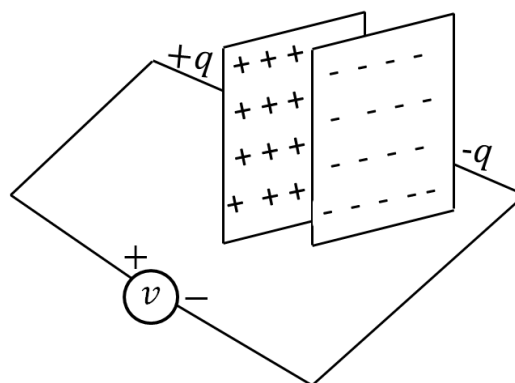
Componentes da bancada

A partir da definição do modelo da linha são definidos os componentes físicos da bancada que poderão representar os efeitos da linha de transmissão real escolhida como referência de acordo com a quantidade de células.

Capacitores

Os capacitores são elementos passivos projetados para armazenar energia em seu campo elétrico. Um capacitor é composto por duas placas condutoras separadas por um isolante chamado de dielétrico, de acordo com a ilustração da figura 2.14. Geralmente as placas são constituídas de alumínio, e o dielétrico, por sua vez, pode ser composto por ar, cerâmica, papel ou mica.

Figura 2.14 - Capacitor



Fonte: Elaborado pela própria autora

Quando é aplicada uma tensão v ao capacitor, as cargas $+q$ são depositadas em uma placa e $-q$ na outra, conforme ilustrado na figura 2.14. Assim, o capacitor armazena a carga elétrica cuja quantidade é representada por q , que por sua vez, é diretamente proporcional à tensão v aplicada, de acordo com a equação 2.110, onde C é a capacitância do capacitor.

$$q = Cv \quad (2.110)$$

A partir da equação 2.110 temos que a capacitância é a razão entre a quantidade de carga e a tensão aplicada. Porém, a capacitância não depende desses valores, e sim das dimensões físicas do capacitor. Em um capacitor de placas paralelas, por exemplo, a capacitância pode ser calculada de acordo com a equação 2.111.

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.111)$$

Onde A é a área de cada placa, d é a distância entre as placas e ϵ é a permissividade do material dielétrico entre as placas.

Os valores comerciais dos capacitores disponíveis no mercado estão na casa de picofarads (pF) a microfarads (μF) e são descritos pelo material utilizado em seu dielétrico e pela tensão suportada.

Os capacitores de poliéster, por exemplo, têm peso leve, são estáveis e sua variação com a temperatura é previsível. Pode ser usado também como dielétrico a mica e o poliestireno. Os capacitores de filme são enrolados em filmes plásticos ou metálicos. Existem também os capacitores eletrolíticos, que produzem uma capacitância extremamente elevada e, além disso, possuem polo negativo e positivo definidos.

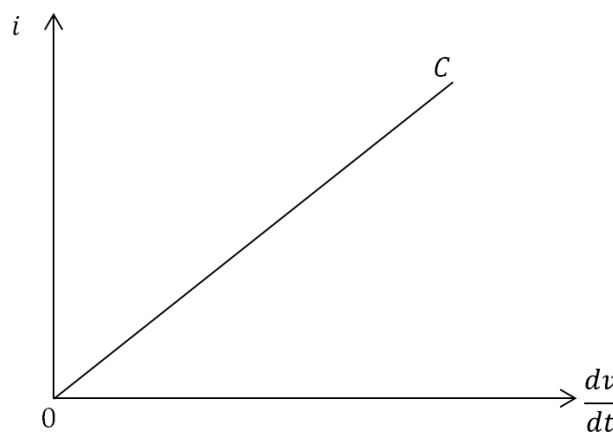
A partir da derivação da equação 2.111, obtém-se a relação entre tensão e corrente do capacitor. Lembrando que $\frac{dq}{dt} = i$, obtém-se a equação 2.112.

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (2.112)$$

Os capacitores que podem ser descritos pela equação 2.112 são chamados de capacitores lineares, e aqueles que não se aplicam a essa equação são chamados de não lineares. Porém a maioria dos capacitores é linear e, portanto, seguem a equação 2.112. (Sadiku, 2013)

O gráfico da figura 2.15 ilustra a capacitância de um capacitor linear.

Figura 2.15 – Gráfico da capacitância do capacitor linear



Fonte: Elaborado pela própria autora

Integrando a equação 2.112 obtemos a relação entre tensão e corrente de um capacitor linear, equação 2.113.

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau \quad (2.113)$$

Ou

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau + v(t_0) \quad (2.114)$$

Onde $v(t_0) = q(t_0) / C$ é a tensão no capacitor no instante t_0 .

A partir da equação 2.112 podemos observar que quando o capacitor está com uma tensão contínua aplicada, a corrente pelo capacitor é zero. Portanto, em um circuito em que a tensão não varia com o tempo, o capacitor se comporta como um circuito aberto. Entre outros aspectos, pode-se observar também que a tensão entre os terminais do capacitor não pode ser alterada abruptamente, uma vez que, seria necessária uma corrente infinita para uma mudança descontínua na tensão, o que é fisicamente impossível.

Indutores

Os indutores são elementos que armazenam energia em seu campo magnético. Consistem de uma bobina de fio condutor e são normalmente classificados pelo tipo de material contido em seu interior, chamado de núcleo, no qual a bobina é enrolada. O núcleo pode ser feito de materiais magnéticos como, por exemplo, ferro ou ferrite, ou de ar ou qualquer material não magnético. Indutores de núcleo não magnéticos são utilizados, geralmente, em rádios e televisores. Os indutores com núcleo de ferro, por sua vez, são utilizados em filtros e no fornecimento de energia e os de núcleo de ferrite são utilizados em aplicações de alta frequência. (Sadiku, 2013)

Historicamente, foi descoberto que um condutor conduzindo corrente produz um campo magnético. Em seguida, descobriu-se que o campo magnético e a corrente que o produziu são linearmente relacionados. E finalmente, foi mostrado que um campo magnético variante produz uma tensão

proporcional à taxa de mudança da corrente que produz o campo magnético, de acordo com a equação 2.115.

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.115)$$

Dessa forma, a indutância é a propriedade em que o indutor se opõe à mudança do fluxo de corrente através dele.

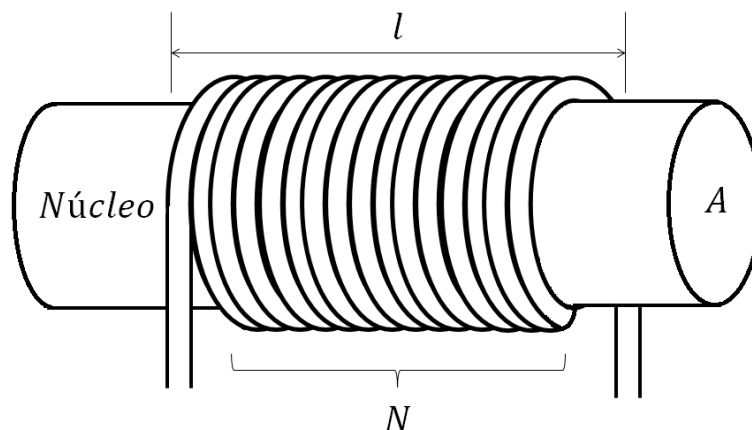
Como citado anteriormente, a indutância do indutor depende das suas dimensões físicas e da composição do núcleo. E a partir da construção do indutor e da teoria de eletromagnetismo, foram desenvolvidas equações para o cálculo da indutância a partir da sua forma. Para o indutor solenoide, por exemplo, o cálculo da indutância é realizado de acordo com a equação 2.116.

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (2.116)$$

Onde N é o número de espiras, l é o comprimento do enrolamento, A é a área da seção transversal e μ é a permeabilidade magnética do núcleo.

A forma típica de um indutor está ilustrada na figura 2.16.

Figura 2.16 - Indutor



Fonte: Elaborado pela própria autora

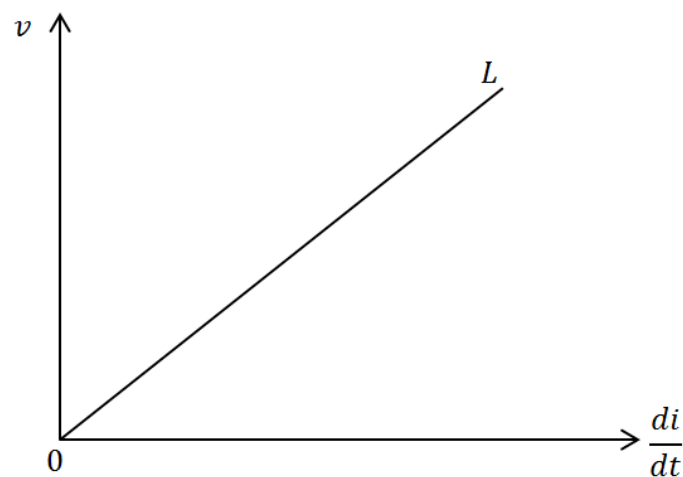
A partir da equação 2.116, pode-se observar que existem várias maneiras de aumentar a indutância do indutor. Pode-se aumentar o número de

espiras, usar no núcleo um material de maior permeabilidade, ampliar a área da seção transversal ou reduzir o comprimento da bobina.

Os indutores com núcleo de ar são indutores lineares, pois sua indutância é independente da corrente, diferente dos indutores com núcleo magnético que possuem comportamento não linear, já que o seu valor de L é calculado em função da corrente. (Sadiku, 2013)

O gráfico da figura 2.17 ilustra a indutância de um indutor com núcleo de ar.

Figura 2.17 – Gráfico da indutância de um indutor com núcleo de ar



Fonte: Elaborado pela própria autora

Desenvolvendo a equação 2.115, obtém-se que a expressão para a corrente em um indutor é dada pela equação 2.117.

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t v(x) dx \quad (2.117)$$

Que também pode ser escrita de acordo com a equação 2.118.

$$i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(x) dx \quad (2.118)$$

Assim como o resistor e o capacitor, o indutor é um elemento passivo que pode ser usado para armazenar energia. No entanto, um indutor prático não pode armazenar energia tão bem quanto um capacitor prático, pois sempre terá uma resistência no enrolamento da bobina que dissipa energia

rapidamente. Um indutor ideal somente armazena energia, não a dissipa. Porém, não é fisicamente realizável, uma vez que possui uma resistência no enrolamento de valor considerável e, portanto, deve ser modelado como um resistor em série com um indutor ideal.

Da equação 2.115, nota-se algumas propriedades dos indutores: se a corrente for constante, a tensão sobre o indutor será zero. Dessa forma, para corrente contínua o indutor se comporta como um curto-circuito. A equação também indica que uma mudança instantânea na corrente implicaria uma tensão infinita. Logo, não é possível mudar a corrente em um indutor instantaneamente.

Cálculo dos componentes da linha artificial

Através dos parâmetros de reatância (X) e susceptância (B) da linha de transmissão são calculados, por meio das equações 2.119 e 2.120, os valores dos indutores e capacitores necessários para compor a linha artificial.

$$L = \frac{X}{2\pi f} \quad (2.119)$$

$$C = \frac{B}{2\pi f} \quad (2.120)$$

A partir dos valores de indutância e capacitância calculados, são determinados os valores dos capacitores e indutores que serão utilizados no projeto e construção da bancada.

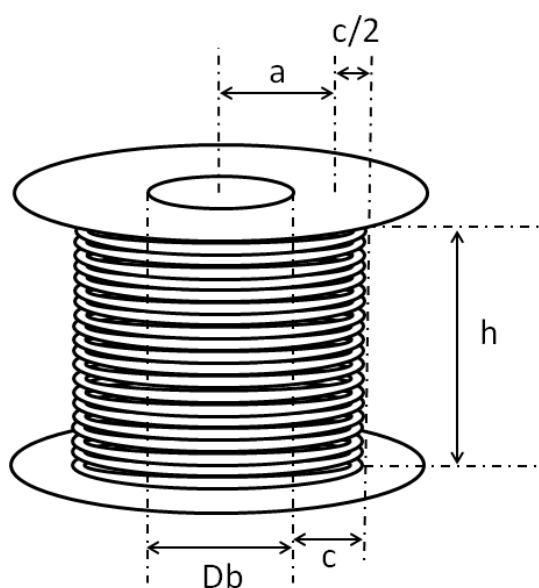
Como foi visto, os capacitores podem ser adquiridos facilmente devido sua ampla faixa de valores comerciais disponíveis no mercado. Os indutores, por sua vez, não são encontrados comercialmente com núcleo de ar e altos valores de indutância devido as suas grandes dimensões e, por isso, precisaram ser projetados e construídos com os parâmetros específicos do projeto. Para tanto, foi utilizado como referência o artigo de Homero Sette: Cálculo de indutores com núcleo de ar para determinar as dimensões das bobinas de fio de cobre necessárias para a obtenção da indutância especificada para o projeto.

Cálculo de indutores com núcleo de ar

De acordo com o trabalho de Homero Sette, pode-se calcular as dimensões ideais de uma bobina para a maior economia possível de cobre a partir dos valores de indutância (L) e resistência (R) desejadas. E a partir dos valores ideais, concilia-se com as dimensões possíveis de serem realizadas de acordo com a disponibilidade de tubos de pvc que são utilizados como formas para o enrolamento da bobina.

A figura 2.18 ilustra os aspectos gerais da bobina.

Figura 2.18 - Aspectos gerais da bobina



Fonte: Elaborado pela própria autora

Na tabela 2.1 são definidas as variáveis utilizadas nos cálculos com suas respectivas unidades.

Tabela 2.1 - Variáveis utilizadas nos cálculos dos indutores

Variável	Descrição	Un.	Variável	Descrição	Un.
a	Raio médio do enrolamento	mm	L/R	Constante de tempo da bobina	μs
h	Comprimento da bobina	mm	Df	Diâmetro do fio da bobina	mm
c	Diferença entre os raios externo e interno da bobina	mm	N	Número de espiras	-
L	Indutância da bobina	μH	Cf	Comprimento do fio	mm
R	Resistência da bobina	Ω	Pf	Peso do fio	g
N_{AWG}	Bitola AWG	-	Db	Diâmetro da forma da bobina	mm

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Cálculo em função da máxima economia de cobre

Conforme citado anteriormente, Sette, 2015, desenvolveu equações genéricas que podem ser aplicadas para o cálculo das dimensões ótimas para o mínimo peso de cobre a partir de valores fixos de L e R (2.121 a 2.129). A partir das dimensões ótimas, determina-se valores possíveis de serem realizados de acordo com as medidas do fio de cobre e do tubo de pvc disponíveis comercialmente.

$$a = 0,5276 \sqrt{\frac{L}{R}} \quad (2.121)$$

$$h = 0,3517 \sqrt{\frac{L}{R}} \quad (2.122)$$

$$c = 0,3166 \sqrt{\frac{L}{R}} \quad (2.123)$$

$$Db = \frac{7}{3} c \quad (2.124)$$

$$C_F = 193,94 \sqrt{L c} \quad (2.125)$$

$$N = 58,5 \sqrt{R c} \quad (2.126)$$

$$D_F = 0,1158 \sqrt{\sqrt{\frac{c^3}{R}}} \quad (2.127)$$

$$N_{AWG} = 36 - 39 \left(\frac{\log_{10} \left(\frac{200 D_F}{25,4} \right)}{\log_{10}(92)} \right) \quad (2.128)$$

$$P_F = 4,292 D_F^2 \sqrt{R c^3} \quad (2.129)$$

A partir das equações de Homero Sette (2015) foram realizados os cálculos para a confecção dos indutores e a construção da bancada.

Capítulo 3

PROJETO E CONSTRUÇÃO DA BANCADA

Primeiramente foi definida a linha de transmissão a ser usada como referência para a construção da bancada. A linha de transmissão utilizada interliga as subestações de Bauru e Cabreúva, municípios de São Paulo, possui 235km de extensão, e nível de tensão de 440kV. Foi escolhida para o trabalho por ser uma linha de transmissão longa e, por isso, ter maior abrangência do conteúdo estudado e possibilitar maior número de experimentos.

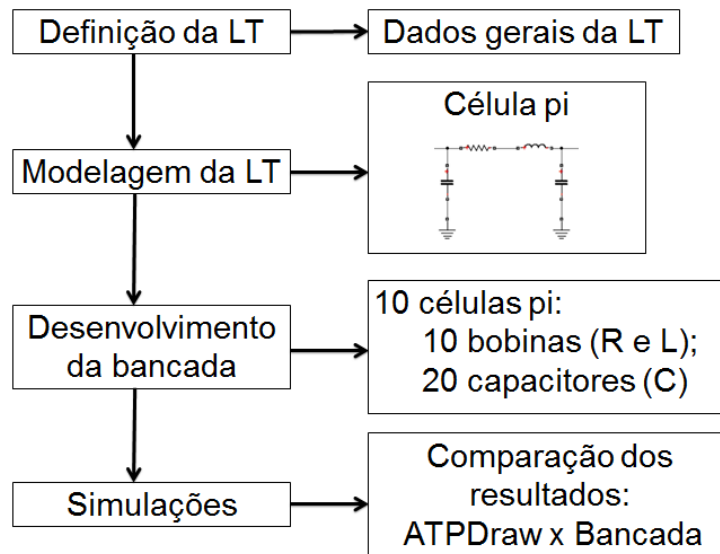
O próximo passo foi modelar a linha de transmissão. A modelagem através da linha artificial se mostrou mais adequada de acordo com o comprimento da linha e o conteúdo estudado no capítulo 2. Nesse passo, ficou definido que o mais correto seria utilizar 10 células Pi para representar a LT para que o comprimento representativo de cada célula e os valores de cada componente fossem os mais exatos possíveis. Assim, ficaram definidos os valores dos componentes que deveriam ser utilizados em cada célula e a quantidade necessária de cada componente para a bancada inteira.

Em seguida, foram construídos os carretéis em MDF para a produção das bobinas, enrolados os 10 indutores de indutância e resistência adequadas para o projeto e foram adquiridos 20 capacitores necessários para o projeto completo da bancada. Nesse passo, todas as peças da parte estrutural da bancada foram desenhadas no AutoCad para serem impressas também em MDF. A bancada foi toda construída de encaixe para que não fossem necessárias peças metálicas em sua montagem e foi construída em cima de um suporte de madeira com reforços na parte central para evitar futuros problemas com o MDF da base da mesa devido o peso das 10 bobinas e para dar sustentação a mesa em frente ao painel idealizada para que os estudantes tivessem um apoio para anotações durante a realização de testes na bancada.

Por último, foram realizados testes da tensão e corrente na entrada e saída da linha de transmissão e comparados com simulações no ATPDraw para consolidar o funcionamento do modelo.

O fluxograma da figura 3.1 resume as etapas de realização do trabalho.

Figura 3.1 - Fluxograma

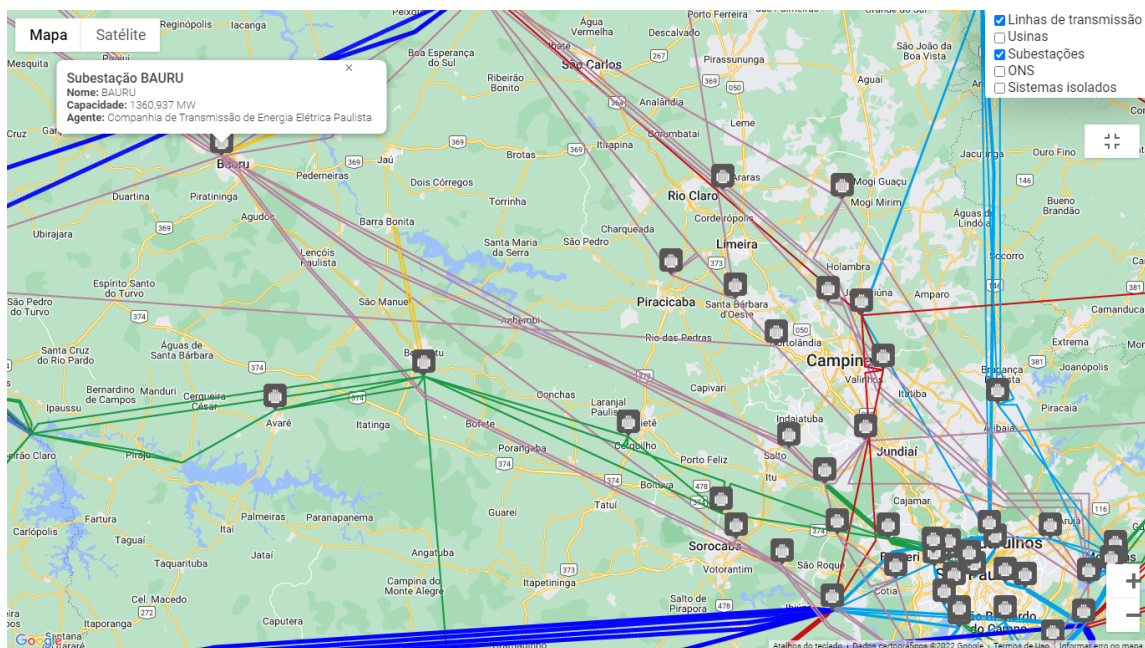


Fonte: Elaborado pela própria autora

Linha de transmissão Bauru-Cabreúva

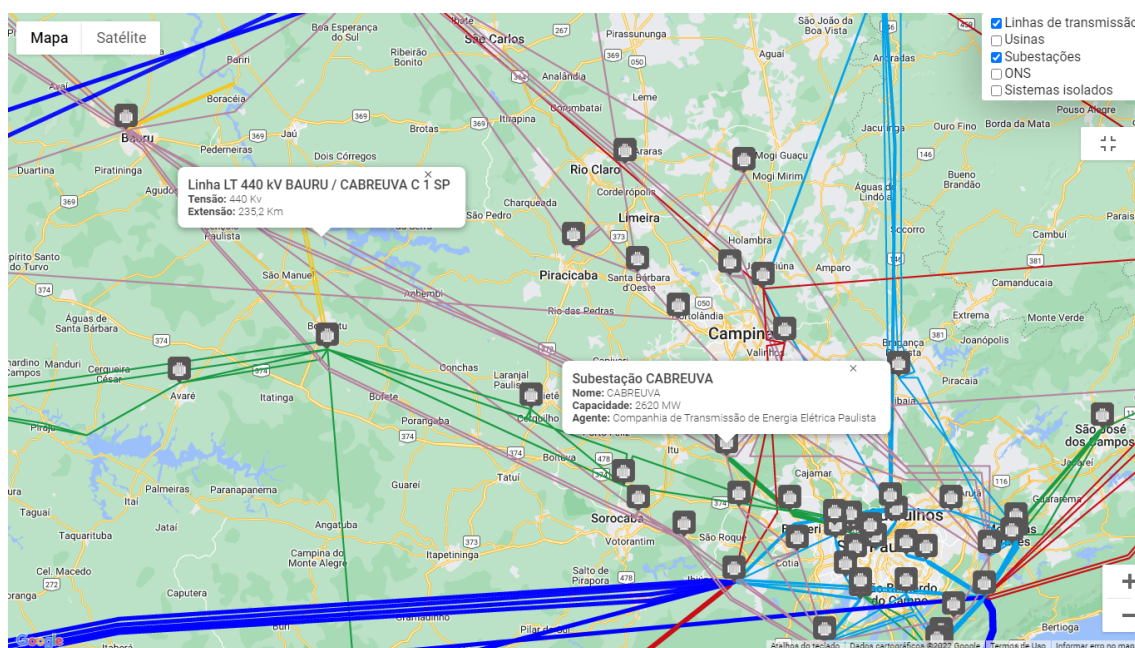
A linha de transmissão de 440kV situada entre Bauru e Cabreúva, municípios de São Paulo, possui 235km de extensão. As figuras 3.2 e 3.3 mostram a localização da linha e das 2 subestações, de Bauru e de Cabreúva, interligadas por ela. Seus dados de resistência (R), reatância (X) e susceptância (B) foram consolidados por Souza (2015).

Figura 3.2 – Mapa com localização da subestação Bauru-SP



Fonte: ONS (2023)

Figura 3.3 – Mapa com a localização da subestação Cabreúva-SP e da LT Bauru-Cabreúva



Fonte: ONS (2023)

Na tabela 3.1 são mostrados os parâmetros elétricos da linha de transmissão usada como referência nesse trabalho.

Tabela 3.1 - Parâmetros elétricos LT Bauru-Cabreúva

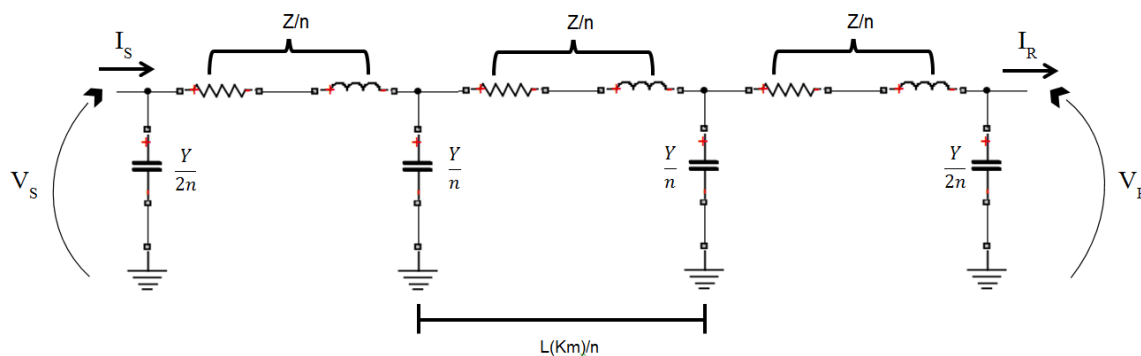
R (Ω)	X (Ω)	B (S)
28,7648	75,8856	0,0013

Fonte: SOUZA (2015)

Modelagem da LT

De acordo com os conceitos abordados no capítulo 2, a representação da linha de transmissão longa através de parâmetros distribuídos por meio da linha artificial ilustrada pela figura 3.4 se mostra mais adequada.

Figura 3.4 - Linha artificial



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A impedância e a admitância de cada célula P_i foram calculadas de acordo com as equações 3.1 e 3.2 em que Z e Y representam, respectivamente, a impedância e a admitância total da linha, e n a quantidade de células P_i que será utilizada.

$$Z_i = \frac{Z}{n} \quad (3.1)$$

$$Y_i = \frac{Y}{n} \quad (3.2)$$

De acordo com Fuchs (1977), como visto no capítulo 2, a representação de linhas longas de transmissão deve ser feita através de vários elementos de comprimento entre 20 e 25km. Desse modo, de acordo com a tabela 3.2, poderiam ser utilizadas entre 9 e 11 células p_i para a representação da linha de transmissão escolhida como referência. Assim, a impedância e a admitância de cada célula pode ser calculada de acordo com as equações 3.1 e 3.2, respectivamente. A equação 3.3 é usada para calcular o número de células de acordo com o comprimento da LT.

$$n = \frac{l}{l_i} \quad 3.3$$

Onde l é o comprimento total da linha e l_i é o comprimento que cada célula representa.

Tabela 3.2 - Quantidade de células p_i para representação da LT de acordo com o comprimento da linha

n (quantidade de células p_i)	l (comprimento total da linha em km)	l_i (comprimento que cada célula representa em km)
9	235	26
10		23
11		21

Fonte: Elaborado pela própria autora

Como visto no capítulo 2, cada célula pi da linha artificial, representa de 20 a 25km de linha. Assim, de acordo com o comprimento da LT real utilizada como referência, foram definidas 10 células pi para a representação adequada da LT Bauru-Cabreúva, sendo cada célula representações de 23,5 km da linha de transmissão real. Os valores dos componentes utilizados em cada célula são dados na tabela 3.3 e foram calculados de acordo com as equações 2.119 e 2.120 apresentadas no capítulo anterior. Os cálculos são apresentados nas equações 3.4 a 3.6.

$$R_i = \frac{28,7648}{10} \cong 2,87\Omega \quad (3.4)$$

$$L_i = \frac{75,8856}{2\pi 60} \div 10 \cong 20,13 \text{ mH} \quad (3.5)$$

$$C_i = \frac{0,0013}{2\pi 60} \div 10 \cong 0,34 \mu F \quad (3.6)$$

O valor total da capacitância de cada célula é de $0,34 \mu F$, mas como cada célula utiliza 2 capacitores, o valor de cada um deles será de, aproximadamente, $0,17 \mu F$.

Tabela 3.3 – Componentes elétricos LT Bauru-Cabreúva

R (Ω)	L (mH)	C/2 (μF)
2,9	20,1	0,2

Fonte: Elaborado pela própria autora

Obtenção dos componentes

Os indutores foram enrolados manualmente com base nos cálculos realizados a partir das equações do artigo de Homero Sette (2015) (equações 2.121 a 2.129) e realizados vários teste até a obtenção dos parâmetros adequados para o projeto da bancada.

Os cálculos foram desenvolvidos por meio do Matlab de acordo com o código disponível no apêndice A e os resultados das dimensões obtidas foram utilizados para a construção de 2 bobinas, figuras 3.5 e 3.6, como piloto para as medidas de indutância e resistência de acordo com as equações de Sette (2015). A bobina da figura 3.5 foi construída com fio de cobre esmaltado AWG 20, diâmetro interno de 50mm, comprimento de 20mm e 609 espiras. As medidas de indutância e resistência obtidas com ela, respectivamente, foram de 20,13mH e 5,985Ω.

Figura 3.5 – Foto da bobina com fio AWG 20



Fonte: Elaborado pela própria autora

A bobina da figura 3.6, por sua vez, foi construída com fio AWG 18, diâmetro interno de 60mm, comprimento de 30mm e 472 espiras. Nessa bobina, as medidas de indutância e resistência obtidas foram de 20,13mH e 4,332 Ω . Como cada célula Pi teria 1 bobina como componente de indutância, a resistência das bobinas não poderia ultrapassar o valor de resistência do projeto para cada célula Pi. Por isso, foi necessário enrolar novas bobinas com fio de maior espessura para que o valor da resistência fosse menor que o valor calculado para cada célula Pi. Assim, foi possível utilizar em cada célula 1 bobina como componente de indutância e resistência.

Figura 3.6 – Foto da bobina com fio AWG 18



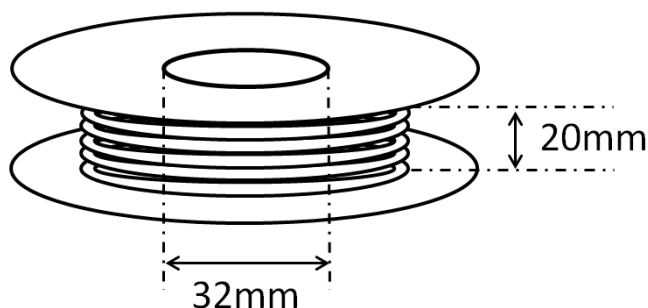
Fonte: Elaborado pela própria autora

Os valores encontrados para as dimensões das bobinas partindo das equações de Homero Sette (2015) serviram como referência para a construção de novas bobinas com valores de resistência menores. Como os cálculos realizados com as equações de Sette (2015) não apresentaram boa assertividade com relação a medida do fio adequada para a resistência de cada indutor, foi necessário encontrar a medida ideal do fio para o enrolamento das bobinas pelo método de tentativa e erro.

Assim, a espessura do fio utilizada e a quantidade de voltas da bobina precisaram ser encontradas de forma prática para se chegar aos valores de indutância e resistência projetados para cada célula Pi. Foram utilizados carretéis de madeira e de MDF com diâmetro de 32mm e comprimento de 20mm fabricados com as medidas específicas para o projeto da bancada e com núcleo de ar para não haver interferência na indutância das bobinas e para não ocorrer a saturação do núcleo. Os carretéis foram fixados com tarugos de fibra de vidro.

As dimensões das bobinas estão apresentadas na figura 3.7

Figura 3.7 - Dimensões das bobinas



Fonte: Elaborado pela própria autora

Na figura 3.8 é apresentada uma foto das bobinas.

Figura 3.8 - Foto das bobinas



Fonte: Elaborado pela própria autora

Nas tabelas 3.4 e 3.5 pode ser observada a variação da indutância e da resistência pela quantidade de espiras e pela espessura do fio de cobre utilizada.

Tabela 3.4 - Indutância e resistência espiras com fio AWG 14

Número de espiras	Indutância (mH)	Resistência (Ω)
350	8,6	1,1
400	12,3	1,2
450	16,5	1,6
492	20,1	1,6
500	21,6	1,8

Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela 3.5 - Indutância e resistência espiras com fio AWG 15

Número de espiras	Indutância (mH)	Resistência (Ω)
374	9,0	1,5
422	11,3	1,6
462	13,6	1,9
505	18,8	2,0
548	20,1	2,3

Fonte: Elaborado pela própria autora

Foram enroladas 9 bobinas com fio de cobre esmaltado AWG 15 e 1 com fio AWG 14 e gastos, aproximadamente, 14,7kg de fio de cobre esmaltado, figura 3.9.

Figura 3.9 – Foto da quantidade de material utilizada



Fonte: Elaborada pela própria autora

A figura 3.10 mostra a foto de uma das bobinas prontas.

Figura 3.10 – Foto da bobina com núcleo de ar



Fonte: Elaborado pela própria autora

Ao final da construção de cada bobina foi conferida a indutância, a resistência e realizados testes de continuidade, conforme figura 3.11.

Figura 3.11 – Foto dos testes com as bobinas construídas



Fonte: Elaborado pela própria autora

Foram utilizados 20 capacitores de 0,22uF de cerâmica para 250V em toda a instalação da bancada, conforme figura 3.12.

Figura 3.12 – Foto do capacitor de cerâmica para 250V

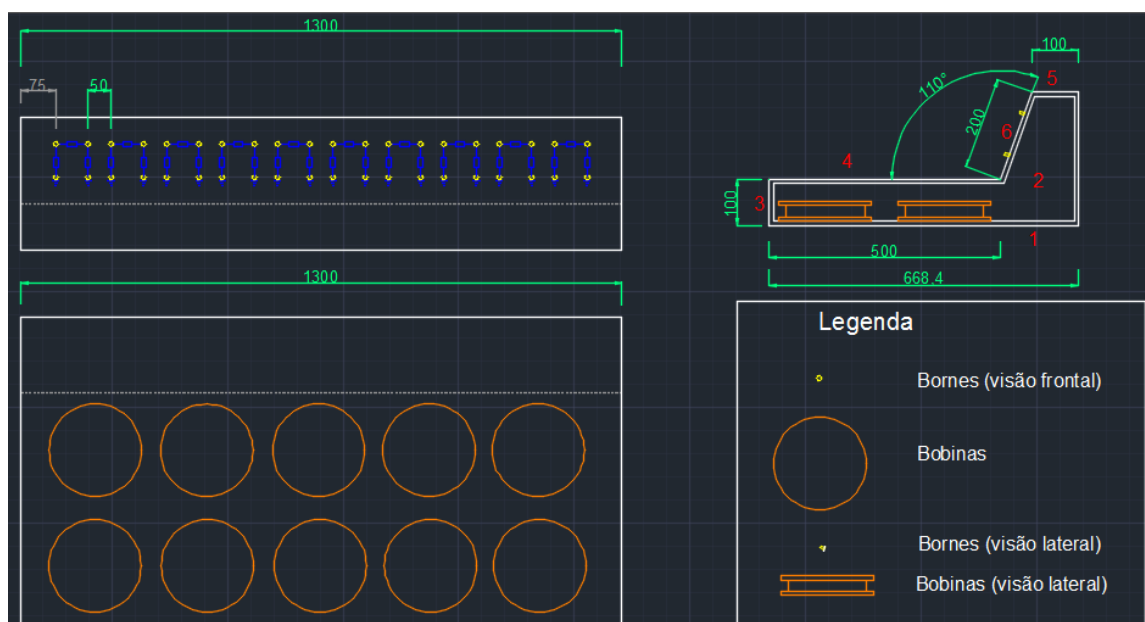


Fonte: Elaborado pela própria autora

Construção da bancada

O projeto da bancada com todos os detalhes de construção foi realizado no AutoCad. As peças foram desenhadas separadamente para impressão em MDF, todas com encaixe para que não fossem necessários materiais metálicos na montagem da bancada. O projeto com os detalhes de construção da bancada no AutoCad pode ser visto na figura 3.13. Todas as medidas estão em milímetros.

Figura 3.13 - Detalhes da bancada



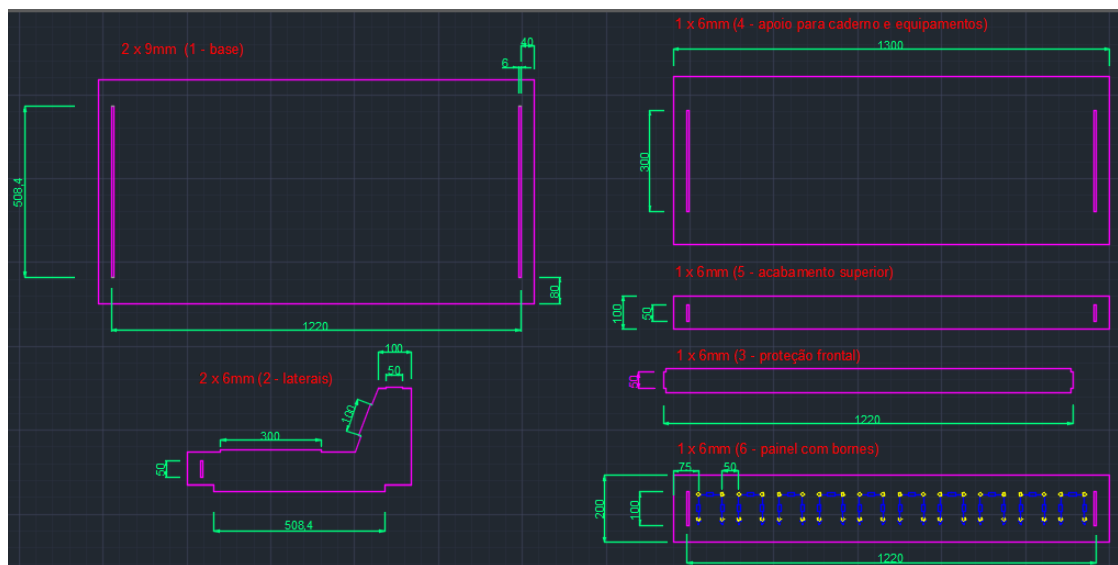
Fonte: Elaborado pela própria autora

Na figura 3.14 é mostrado o projeto das peças da bancada para impressão em MDF.

O projeto especifica a espessura da chapa de MDF utilizada em cada parte da mesa, a espessura e as distâncias dos recortes. As figuras A.1 e A.2 do anexo A mostram as imagens do projeto da bancada no AutoCad em tamanho maior para que possam ser vistos os detalhes do projeto.

Como dito anteriormente, todas as peças da bancada foram desenhadas com encaixe para que não fossem necessários parafusos ou pregos na fixação das partes.

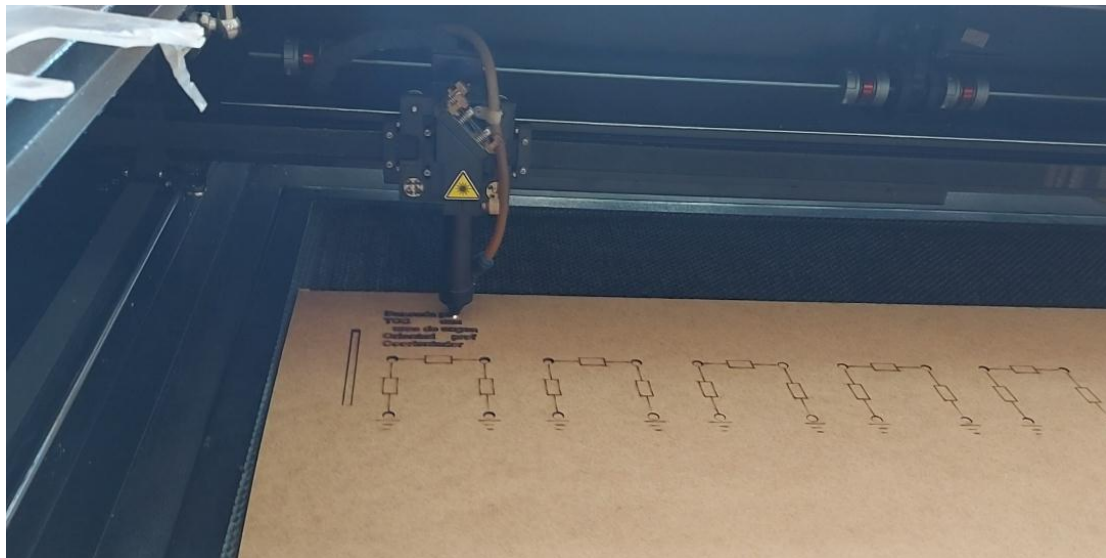
Figura 3.14 – Projeto das peças para montagem da bancada



Fonte: Elaborado pela própria autora

Na figura 3.15 é mostrada uma foto da máquina que realiza o processo de impressão das peças da bancada.

Figura 3.15 – Foto da impressão das peças da bancada



Fonte: Elaborado pela própria autora

A bancada foi montada em uma base reforçada toda de madeira e fixada com cola branca. As bobinas foram fixadas na base da bancada com fibra de vidro e foram colocados reforços no interior da mesa para melhor sustentação das peças, conforme é apresentado na figura 3.16.

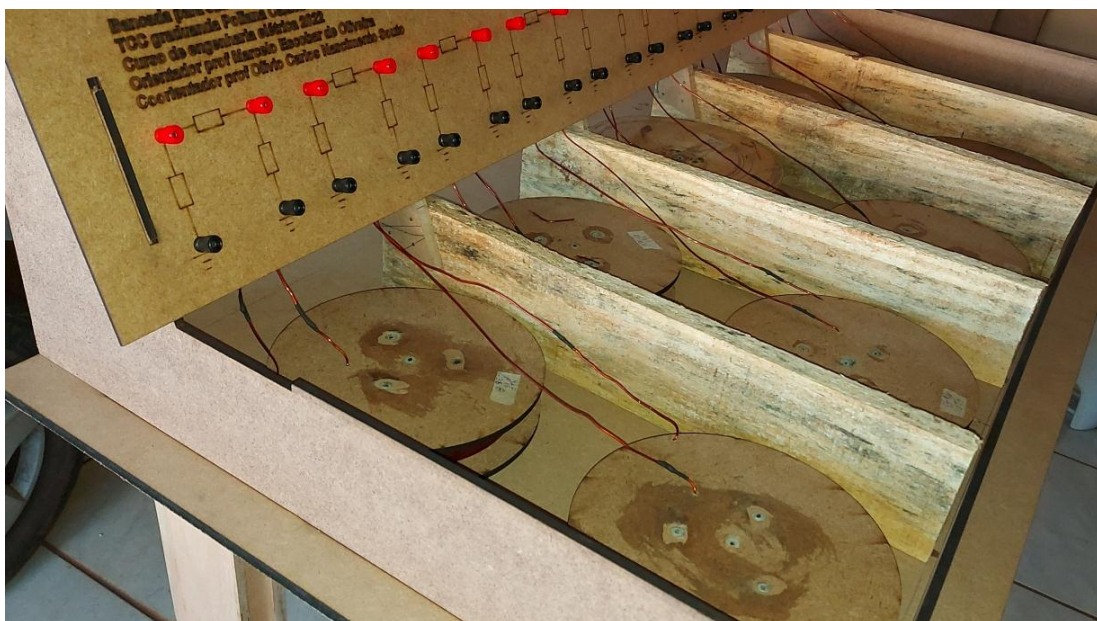
Figura 3.16 – Foto da fixação das bobinas na bancada



Fonte: Elaborado pela própria autora

Na figura 3.17 é mostrada a parte interna da bancada onde foram fixadas as bobinas e os reforços de apoio da mesa de anotações da bancada.

Figura 3.17 – Foto da fixação das peças da bancada e instalação das bobinas



Fonte: Elaborado pela própria autora

Os bornes foram fixados no painel da bancada e foram soldados os componentes, como pode ser visto na foto da parte traseira da bancada, conforme figura 3.18.

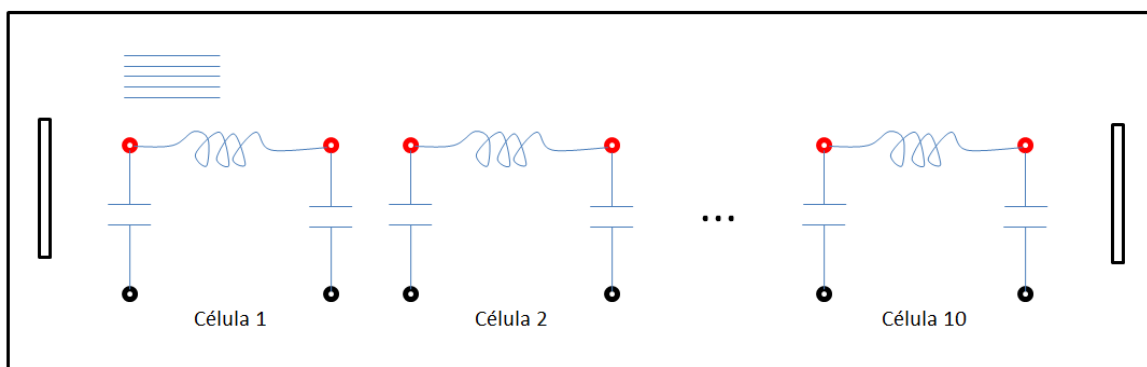
Figura 3.18 – Foto da instalação das células no painel da bancada



Fonte: Elaborado pela própria autora

Na figura 3.19 é ilustrada a montagem das células Pi no painel da bancada.

Figura 3.19 - Células Pi do painel da bancada

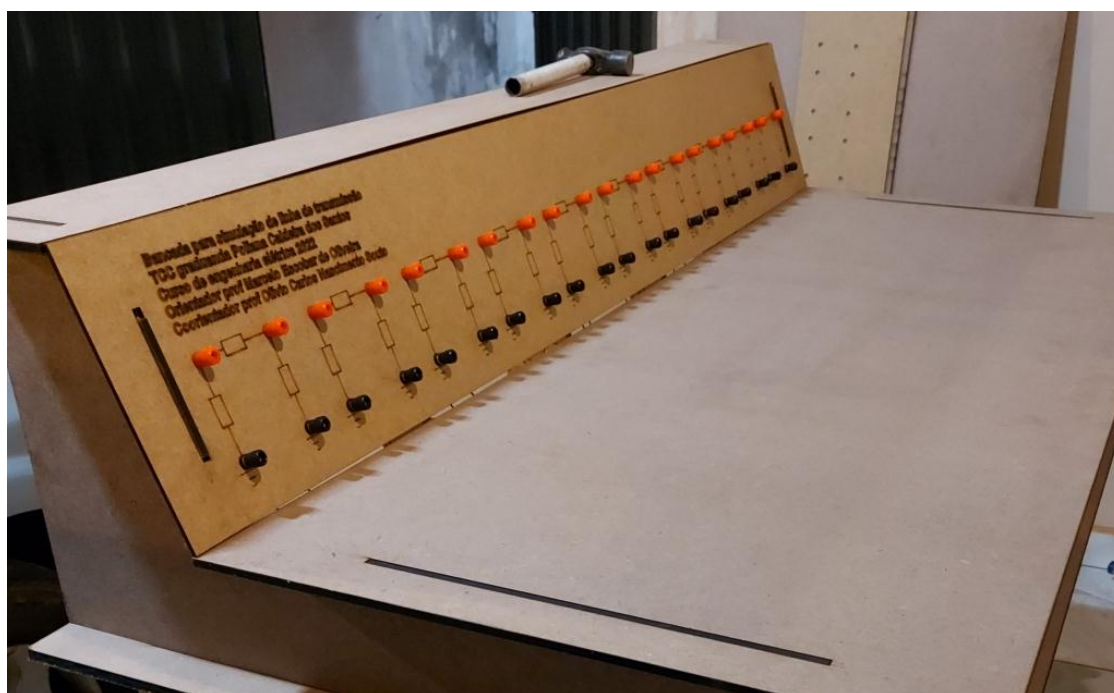


Fonte: Elaborado pela própria autora

Na figura 3.20 é mostrada a foto da bancada finalizada.

Como pode ser visto no esquema ilustrativo da figura 3.19 e na foto apresentada na figura 3.20 todas as 10 células foram montadas individualmente sendo que cada célula no painel da bancada é composta de 2 bornes vermelhos, 1 em cada extremidade do indutor, e 2 pretos onde é feito o aterramento de cada célula.

Figura 3.20 – Foto da montagem finalizada



Fonte: Elaborado pela própria autora

Optou-se por individualizar os bornes de cada célula para facilitar a realização de testes com elementos ao longo da linha, como, por exemplo, banco de capacitores e indutores.

Capítulo 4

MEDIÇÕES NA BANCADA E SIMULAÇÕES

Foram medidos tensão e corrente ao longo da linha com o objetivo de analisar o seu comportamento a vazio e com cargas resistiva, indutiva e capacitiva e comparar com a teoria sobre linhas de transmissão.

Equipamentos utilizados

- 4 multímetros;
- Varivolt monofásico;
- Painel de cargas;
- Medidor LCR;
- Indutor com núcleo de ar;
- Cabos com conector banana.

Nas figuras 4.1 a 4.6 são apresentadas fotos dos equipamentos utilizados nos testes.

Figura 4.1 – Foto do multímetro utilizado nos testes da bancada



Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 4.2 - Foto do painel de cargas RLC utilizado



Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 4.3 - Foto do painel de cargas indutivas utilizado



Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 4.4 - Foto do varivolt monofásico utilizado



Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 4.5 - Foto do medidor LCR utilizado



Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 4.6 - Foto do indutor com núcleo de ar utilizado

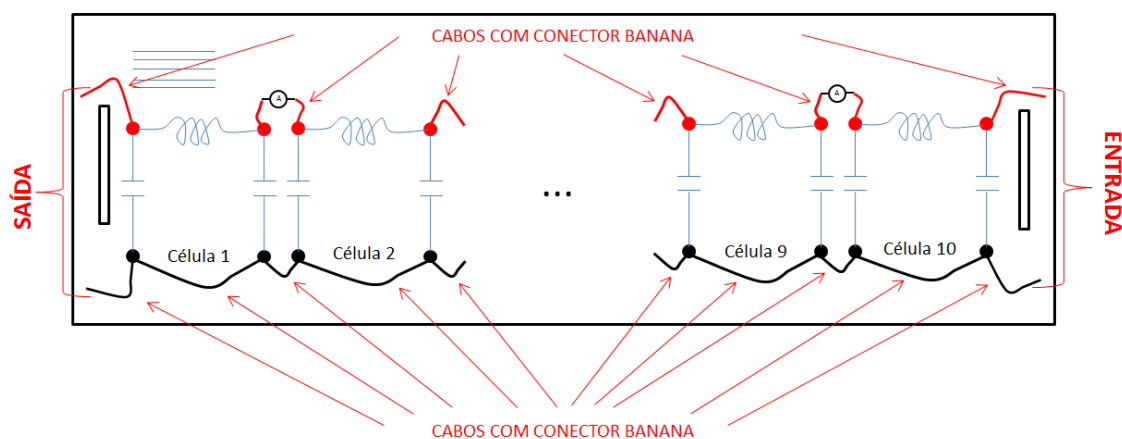


Fonte: Elaborado pela própria autora

Montagem dos testes práticos

Na figura 4.7 é apresentado o esquema de montagem dos testes realizados na bancada.

Figura 4.7 - Esquema de montagem dos testes na bancada



Fonte: Elaborado pela própria autora

Todas as células foram conectadas entre si através de cabos com conector banana. O Varivolt monofásico foi conectado na entrada da bancada conforme ilustração na figura 4.7 onde foi aplicada a tensão. O primeiro multímetro foi conectado também na entrada da bancada para acompanhamento do valor da tensão aplicada com o Varivolt. O segundo multímetro foi conectado entre a célula 1 e a célula 2 e o terceiro entre a célula 9 e a célula 10 para o acompanhamento das correntes entre as respectivas células. O quarto multímetro foi utilizado para a medição da tensão na saída da bancada.

Para avaliar o comportamento da linha de transmissão em escala reduzida, diversos experimentos foram realizados, a exemplo: linha de transmissão a vazio, com carga resistiva, capacitiva e indutiva para observar o comportamento das tensões e correntes ao longo da linha com as várias cargas.

As correntes e tensões medidas na linha em todos os testes foram anotadas para comparação com os valores obtidos nas simulações computacionais nos mesmos pontos medidos.

Os valores dos componentes da linha foram medidos com o medidor LCR configurado para 100Hz (escala mais próxima da frequência real utilizada nos testes) e estão disponíveis na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores de cada componente das células da bancada

Componentes da linha				
	Indutor (mH)	Resistência (Ω)	Capacitor 1 (ηF)	Capacitor 2 (ηF)
Célula 1	20,10	1,89	215,00	219,30
Célula 2	19,88	1,87	214,50	216,60
Célula 3	20,36	1,89	218,30	215,50
Célula 4	20,24	1,88	214,70	217,20
Célula 5	20,20	1,75	226,60	217,40
Célula 6	20,10	1,87	219,50	224,00
Célula 7	20,82	1,88	214,90	218,10
Célula 8	20,53	1,62	227,70	217,70
Célula 9	20,01	1,57	217,30	218,60
Célula 10	20,18	1,88	220,10	222,80

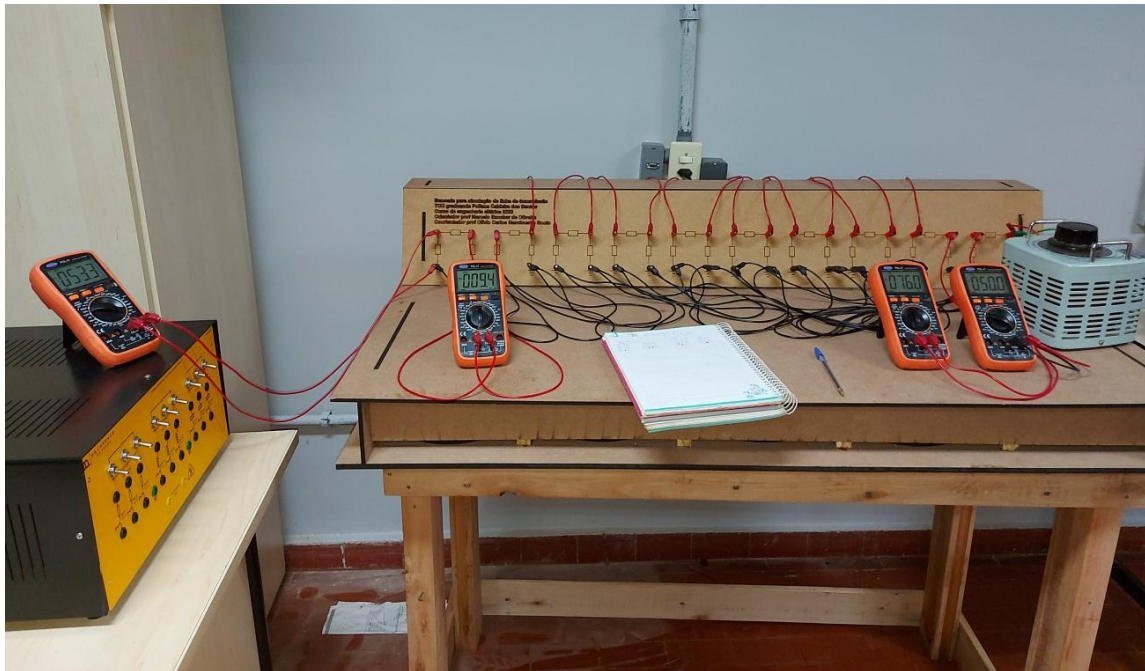
Fonte: Elaborado pela própria autora

A equação 2.20 pode ser usada para calcular a impedância natural da linha (Z_0), conforme é apresentado na equação 4.1.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{202,42 \cdot 10^{-3}}{4375,8 \cdot 10^{-9}}} = 215,08 \, \Omega \quad 4.1$$

Na figura 4.8 é apresentada a foto da configuração da bancada durante os testes. A imagem mostra especificamente o teste realizado sem carga.

Figura 4.8 – Foto do teste de tensão e corrente sem carga na bancada

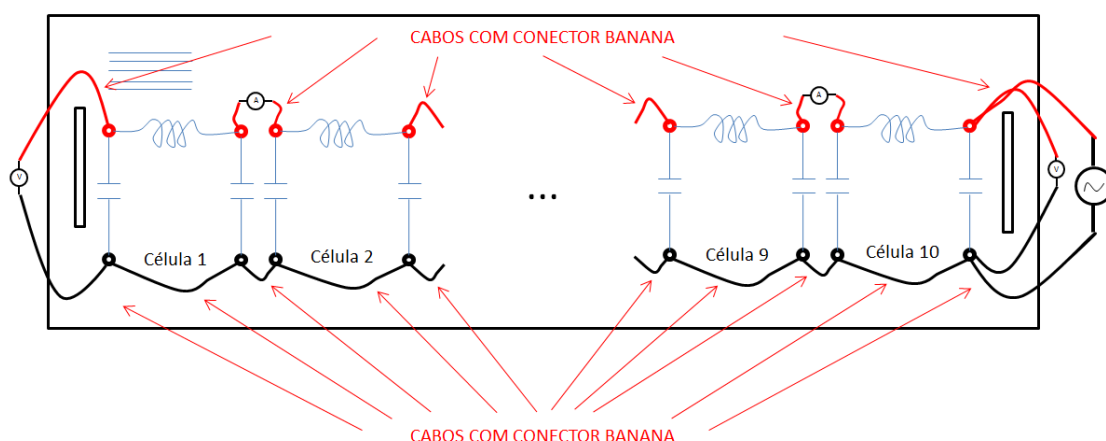


Fonte: Elaborado pela própria autora

Teste a vazio

No teste a vazio foi conectado o Varivolt monofásico na entrada da linha e conectados dois voltímetros: um deles na entrada e o outro na saída da linha para o acompanhamento da tensão. Foram conectados dois amperímetros na linha conforme figura 4.9.

Figura 4.9 – Esquema ilustrativo do teste a vazio



Fonte: Elaborado pela própria autora

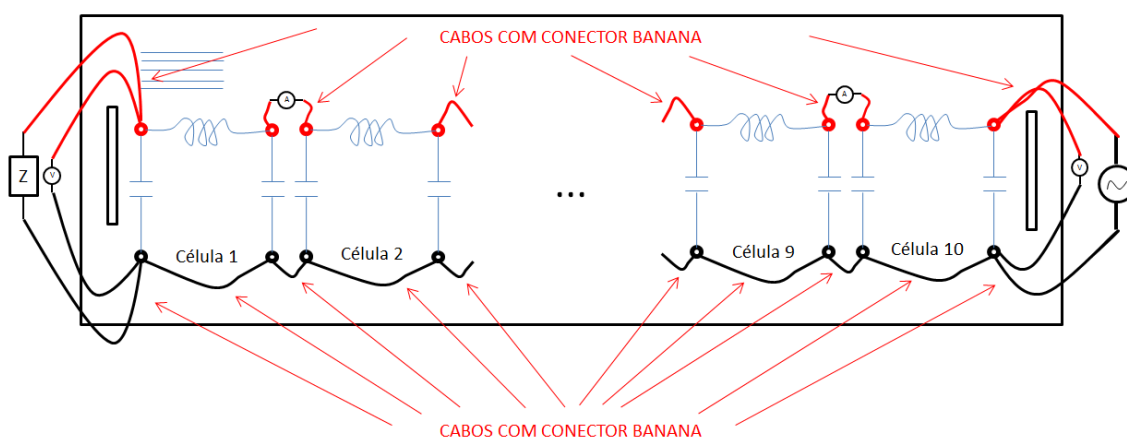
Nesse teste as tensões de entrada aplicadas foram de 25V e de 50V. Os volímetros foram utilizados na escala para 200V e os amperímetros na escala de 200mA.

Teste com cargas resistivas

Nesse teste foram utilizadas cargas de 150Ω e de 450Ω .

O primeiro volímetro foi conectado em paralelo com o Varivolt monofásico na entrada da linha e o segundo volímetro foi conectado em paralelo com a carga na saída da linha. Um dos amperímetros ficou conectado entre a primeira e a segunda célula pi e o outro amperímetro foi conectada entre a penúltima e a última célula de acordo com a figura 4.10.

Figura 4.10 – Esquema ilustrativo do teste com carga resistiva



Fonte: Elaborado pela própria autora

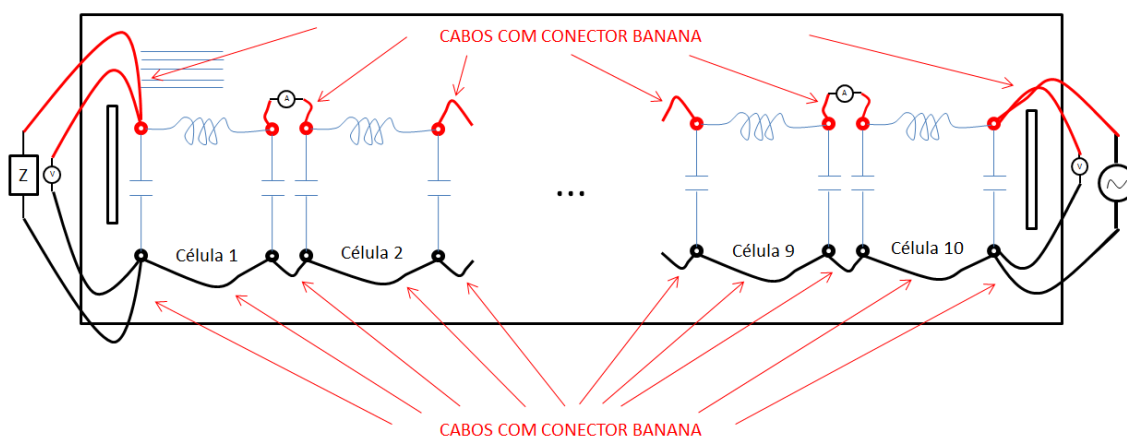
Nesse teste as tensões de entrada aplicadas também foram de 25V e de 50V. Os voltímetros foram utilizados na escala para 200V e os amperímetros na escala de 200mA e as cargas resistivas utilizadas do painel de cargas LCR.

Teste com carga indutiva com núcleo de material ferromagnético

Nesse teste foi utilizado o painel de carga indutiva de 282,5mH e 8,38Ω de resistência interna. As conexões dos voltímetros e dos amperímetros foram realizadas da mesma forma do teste anterior conforme figura 4.11.

As tensões aplicadas na entrada foram de 100V, 125V, 150V, 175V e 200V e medidos os respectivos valores de tensão e corrente ao longo da linha.

Figura 4.11 – Esquema ilustrativo do teste com carga indutiva com núcleo ferromagnético

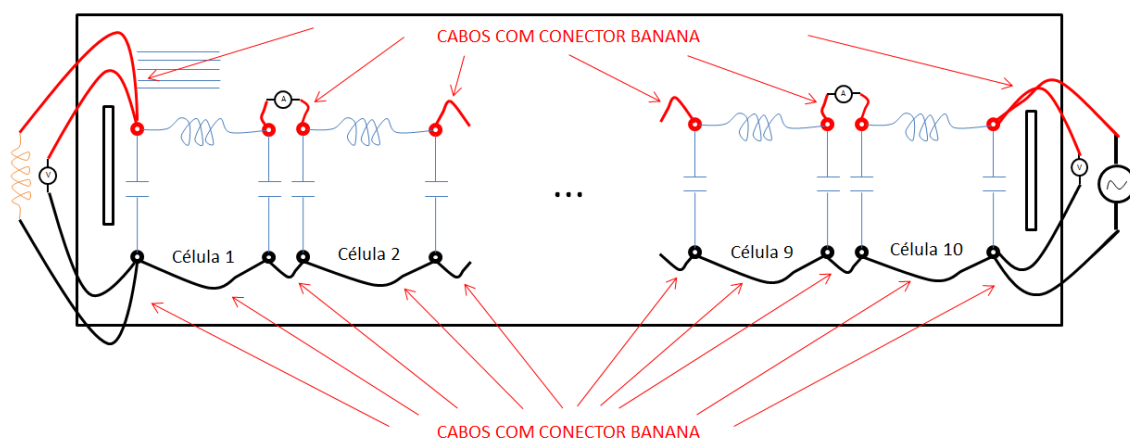


Fonte: Elaborado pela própria autora

Teste com carga indutiva com núcleo de ar

Nesse teste foi utilizada a bobina piloto AWG20 de 20,25mH e, aproximadamente, 6Ω de resistência interna conectada na saída da linha. A tensão de entrada aplicada foi de 14,8V e foram medidos os valores de tensão e corrente ao longo da linha conforme figura 4.12.

Figura 4.12 – Esquema ilustrativo do teste com carga indutiva com núcleo de ar



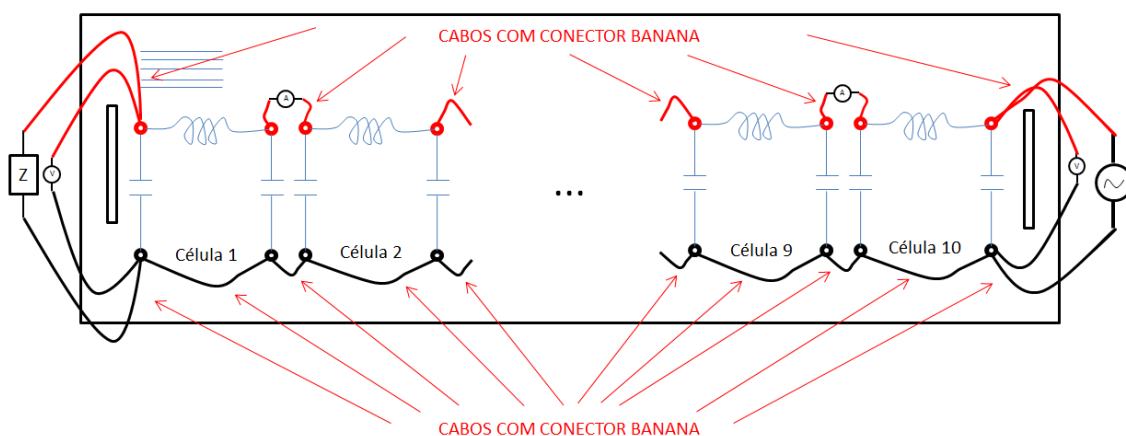
Fonte: Elaborado pela própria autora

A escala dos amperímetros foi mantida em 200mA e dos voltmíetros em 20V.

Teste com carga capacitiva

No teste com carga capacitiva foi utilizado o painel de cargas LCR e os voltmíetros e amperímetros foram conectados na linha conforme a figura 4.13.

Figura 4.13 – Esquema ilustrativo do teste com carga capacitiva



Fonte: Elaborado pela própria autora

As tensões de entrada utilizadas foram de 25V e de 50V, o amperímetros foram utilizados na escala de 20A e os voltmíetros na escala de 200mA.

Os testes foram realizados com 25V e 50V de tensão de entrada por questões de segurança. Porém, o teste com a carga indutiva de núcleo de material ferromagnético precisou ser realizado com 200V de tensão de entrada devido a tensão nominal da carga.

Em todos os testes as escalas foram utilizadas o mais próximo possível dos valores a serem medidos procurando sempre preservar a integridade dos equipamentos. Nos testes sem carga e com carga resistiva, por exemplo, os multímetros utilizados para medição da tensão foram colocados na escala de 200V e para a corrente foram utilizados na escala de 200mA para maior precisão dos resultados. O teste com carga capacitiva com entrada de 50V, por sua vez, precisou ser realizado com os multímetros utilizados na medição de corrente na escala de 20A devido o limite de corrente de 200mA do fusível de proteção do amperímetro.

Software ATPDraw

O ATPDraw (*Alternative Transient Program*) é um software desenvolvido para estudos eletromagnéticos com várias aplicações. De acordo com o trabalho de Ortiz (2012), o programa permite modelar o sistema elétrico o mais próximo possível da configuração elétrica real das redes e inclui recursos para modelagem de sistemas elétricos de transmissão e distribuição na mesma plataforma, permitindo as análises de transitórios eletromagnéticos para diferentes configurações operacionais.

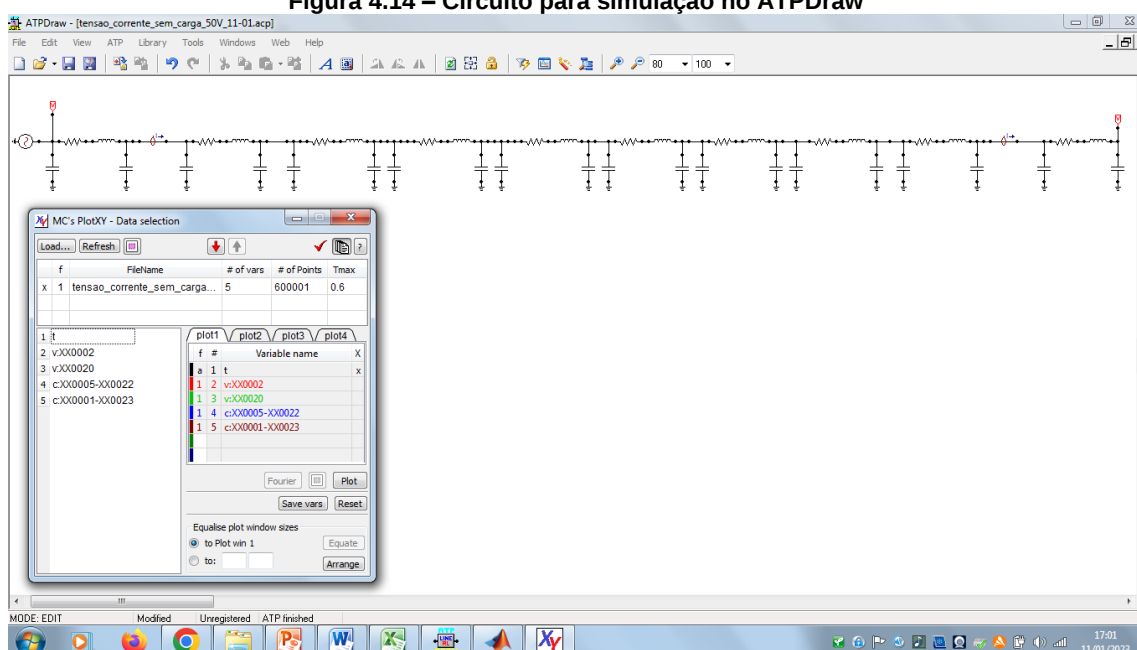
O software é uma plataforma computacional destinada à modelagem e simulação de circuitos e sistemas elétricos no domínio do tempo, comumente utilizado devido as suas funcionalidades, além de ser um software de domínio livre e permitir a realização de diversos tipos de estudos. (SILVA, 2017)

Para uma análise assertiva do comportamento das tensões da linha de transmissão é importante que os dados do sistema elétrico sejam lançados no programa com grau de realidade para que o sistema simulado esteja adequado ao caso real a ser estudado. (REIS; et al., 2012).

Simulações

O circuito elétrico para a simulação dos experimentos da linha foi montado no ATPDraw conforme a figura 4.14 e os valores dos componentes foram preenchidos conforme medições apresentadas na tabela 4.1. Foram simulados tensão e corrente com carga e sem carga e comparadas com os valores medidos na bancada. A simulação foi montada com a mesma sequência dos componentes e com a mesma configuração da bancada durante os testes, para que as duas situações tivessem a maior semelhança possível.

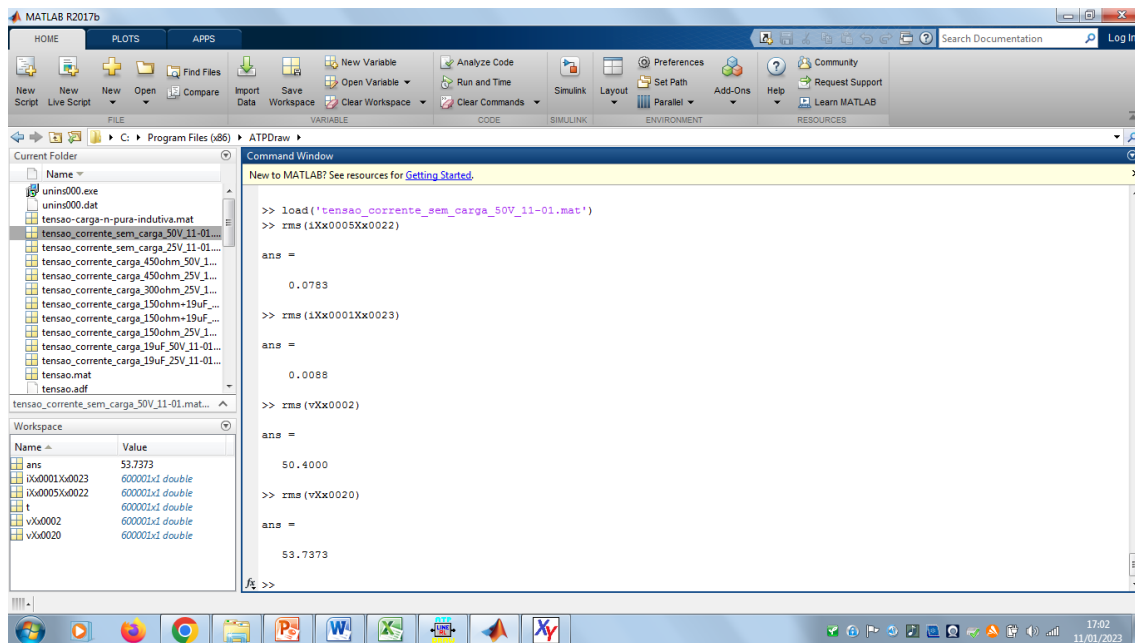
Figura 4.14 – Circuito para simulação no ATPDraw



Fonte: próprio autor

Os valores rms das medições foram calculados através do Matlab a partir dos valores simulados no ATPDraw, conforme é apresentado na figura 4.15.

Figura 4.15 - Cálculo dos valores rms de tensão e corrente no Matlab



Fonte: Elaborado pela própria autora

As figuras B.1 a B.5 do anexo B mostram como ficou realizada a montagem dos circuitos para as simulações no ATPDraw.

Cálculos de tensão e corrente a partir das equações gerais da LT

A partir das equações gerais da linha de transmissão para o circuito a parâmetros distribuídos, equações 4.2 e 4.3, podem ser calculados os valores de tensão e corrente em qualquer ponto da linha e comparados com os valores medidos na bancada.

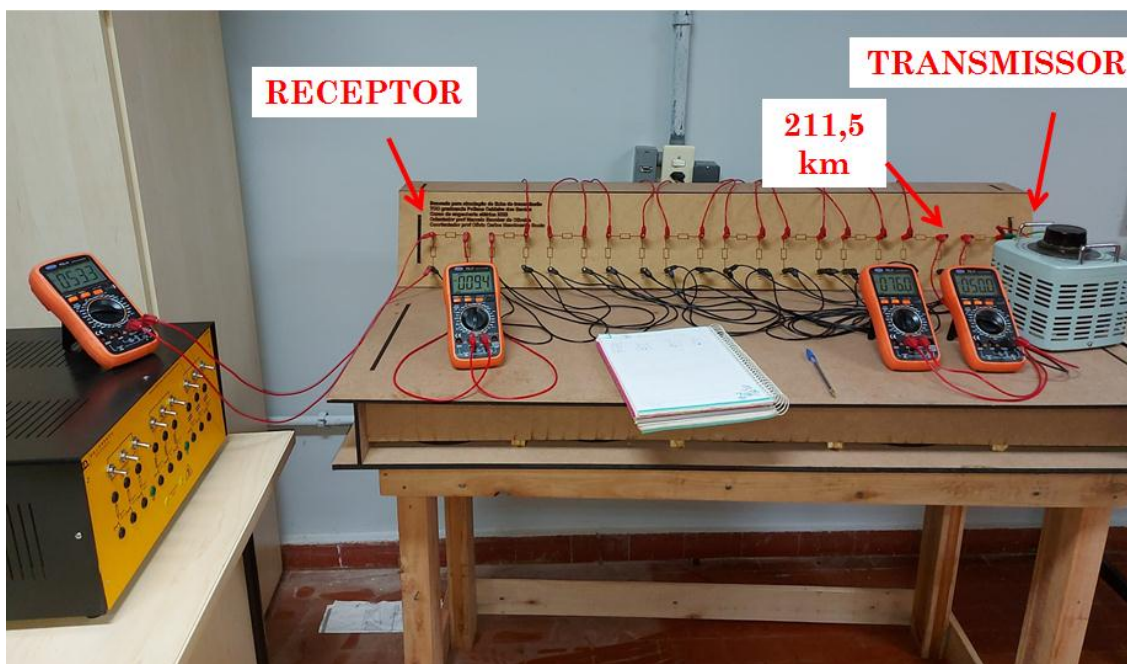
$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \sqrt{\dot{Z}/\dot{Y}}}{2} e^{x\sqrt{\dot{Z}\dot{Y}}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \sqrt{\dot{Z}/\dot{Y}}}{2} e^{-x\sqrt{\dot{Z}\dot{Y}}} \quad [V] \quad (4.2)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \sqrt{\dot{Z}/\dot{Y}}}{2\sqrt{\dot{Z}/\dot{Y}}} e^{x\sqrt{\dot{Z}\dot{Y}}} - \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \sqrt{\dot{Z}/\dot{Y}}}{2\sqrt{\dot{Z}/\dot{Y}}} e^{-x\sqrt{\dot{Z}\dot{Y}}} \quad [A] \quad (4.3)$$

A fim de calcular o erro entre as medições na bancada e os valores de tensão e corrente calculados a partir das equações gerais da linha, foi realizada a montagem do teste a vazio de acordo com a figura 4.16. A corrente foi

medida entre a penúltima e a última célula pi, ponto que representa 211,5km da LT real.

Figura 4.16 - Montagem do teste a vazio



Fonte: Elaborado pela própria autora

Lembrando que a vazio $I_{receptor} = 0$, foram utilizadas as equações gerais da LT no software Matlab para calcular os valores de tensão e corrente da linha, de acordo com o código disponível no apêndice B.

Resultados e discussão

Os valores de tensão e corrente obtidos durante os testes na linha e nas simulações estão apresentados na tabela 4.2 com os respectivos erros calculados; e a comparação dos testes de tensão e corrente da bancada a vazio com os cálculos a partir das equações gerais da linha estão na tabela 4.3.

Simulações

Na comparação com as simulações o maior erro observado nos testes de tensão sem carga e com as cargas resistiva e capacitiva foi em torno de 4%; e para as correntes com essas mesmas condições de carga o maior erro encontrado foi próximo de 8%, porém são aceitáveis levando-se em conta os baixos níveis de correntes medidas. No caso específico em que o erro

encontrado foi próximo de 8%, a diferença entre a corrente medida na linha e o valor simulado foi de 0,0007A.

Nos testes com carga indutiva com núcleo de material ferromagnético foi observado que os percentuais de erro têm valores consideráveis, mas diminuem com o aumento da tensão de entrada, o que pode ser justificado pelo perfil de não linearidade da carga relacionado à curva de histerese de magnetização do núcleo, pois quanto mais a tensão se aproxima da tensão nominal da carga os erros tendem a diminuir.

Os testes com a carga indutiva com núcleo de ar, que apresenta a curva de magnetização linear, por sua vez, tiveram os erros calculados para a comparação das tensões e correntes obtidas das simulações e dos testes na linha menores que 4%.

O teste com o indutor com núcleo de ar foi realizado, por precaução, com baixa tensão devido a espessura do fio do indutor. Os resultados desse teste evidenciam a grande influência da não linearidade do núcleo magnético nos erros encontrados.

As figuras C.1 e C.2 do anexo C apresentam fotos de como foram feitos os testes com as cargas indutivas.

Tabela 4.2 - Comparação das tensões e correntes da bancada e das simulações

Carga	V entrada	I entrada			I saída			V saída		
		Bancada (A)	Simulação (A)	Erro	Bancada (A)	Simulação (A)	Erro	Bancada (V)	Simulação (V)	Erro
a vazio	25,200	0,038	0,039	-2,296%	0,005	0,004	6,818%	26,900	26,870	0,112%
	50,400	0,076	0,078	-2,427%	0,010	0,009	7,955%	53,700	53,737	-0,069%
154,86 Ω	25,500	0,136	0,139	-1,804%	0,138	0,142	-2,399%	21,500	21,950	-2,050%
	50,000	0,260	0,270	-3,704%	0,260	0,270	-3,704%	42,900	43,000	-0,233%
463,94 Ω	25,100	0,062	0,064	-2,347%	0,054	0,055	-1,280%	25,000	25,330	-1,303%
	50,000	0,124	0,127	-2,592%	0,107	0,109	-1,651%	50,400	50,460	-0,119%
19 μ F (139,60 $\angle$ -90° Ω)	25,000	0,490	0,486	0,885%	0,440	0,431	2,183%	58,900	58,815	0,144%
	50,000	1,000	0,972	2,934%	0,900	0,861	4,493%	117,400	117,631	-0,196%
154,86 Ω + 19 μ F (208,50 $\angle$ -42° Ω)	25,000	0,166	0,170	-2,415%	0,146	0,148	-1,152%	29,000	30,100	-3,655%
	50,000	0,320	0,340	-5,799%	0,280	0,295	-5,149%	58,800	60,200	-2,326%
282,5mH + 8,38 Ω (106,83 $\angle$ 85,5° Ω)	100,000	0,380	0,450	-15,631%	0,480	0,557	-13,762%	68,000	60,555	12,295%
	125,500	0,490	0,565	-13,305%	0,610	0,699	-12,670%	84,400	75,997	11,058%
	150,800	0,590	0,679	-13,133%	0,740	0,839	-11,842%	100,900	91,317	10,494%
	175,800	0,700	0,792	-11,594%	0,880	0,979	-10,066%	117,100	106,456	9,999%
	201,000	0,810	0,905	-10,527%	1,010	1,119	-9,725%	133,000	121,716	9,271%
20,55mH + 5,5 Ω (9,50 $\angle$ 54,6° Ω) (núcleo de ar)	14,800	0,165	0,163	1,349%	0,175	0,173	0,634%	1,600	1,651	-3,089%

Fonte: Elaborado pela própria autora

Quanto a comparação dos resultados de tensão e corrente com a impedância natural da linha (Z_0), conforme foi visto no capítulo 2, quando comparados os valores de carga com Z_0 , observa-se que quando a carga tem valor maior do que a impedância natural da linha ocorre uma elevação no valor da tensão ao mesmo tempo em que o valor da corrente diminui, situação que pode ser observada nos testes na linha e nas simulações. Quando uma carga de valor menor do que a impedância natural da linha é utilizada nos testes, observa-se, por sua vez, que ocorre uma diminuição no valor da tensão ao passo que o valor da corrente aumenta.

Em relação aos testes realizados sem cargas conectadas na saída da linha, observa-se uma elevação no valor da tensão ao mesmo tempo em que o valor da corrente diminui de acordo com o que foi visto na teoria também no capítulo 2, em que esse fenômeno é conhecido como Efeito Ferranti.

É notável grande assertividade na comparação entre os valores de tensão e corrente medidos na linha e os valores simulados. Entre todas as medições de tensão e corrente, desconsiderados os testes com carga indutiva com núcleo de material ferromagnético com tensão muito menor que a tensão nominal da carga, o maior erro encontrado entre o valor medido e simulado foi em torno de 10%. Assim é possível consolidar o bom funcionamento da linha em escala reduzida, visto que os fenômenos estudados na disciplina de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica puderam ser simulados na linha e os valores de tensão e corrente medidos na linha em escala reduzida foram obtidos nas simulações computacionais com boa proximidade.

Cálculos

Assim como na comparação dos testes de tensão e corrente com as simulações, os resultados da bancada com os cálculos a partir das equações gerais da linha também apresentaram grande assertividade. Os cálculos foram realizados apenas para a condição de linha a vazio com a tensão de entrada de 25V e de 50V e calculados os erros para corrente e tensão no transmissor e estão apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Comparação das tensões e correntes da bancada e dos cálculos

V receptor	I _{211.5}			V _{transmissor}		
	Bancada (A)	Calculado (A)	Erro	Bancada (V)	Calculado (V)	Erro
26,900	0,038	0,039	-2,545%	25,200	25,227	0,105%
53,700	0,076	0,078	-2,551%	50,400	50,359	0,081%

Fonte: Elaborado pela própria autora

Nessas comparações, os maiores erros encontrados ficaram em torno de 2%.

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do projeto, a construção da bancada e os testes realizados permitiram a aplicação da teoria de linhas de transmissão de forma a corroborar os fenômenos estudados.

A utilização da linha artificial para a representação da linha de transmissão em escala reduzida para utilização em laboratório foi de grande praticidade para a realização do projeto. Além disso, a representação da LT com a utilização de 10 células Pi, fez com que a divisão dos componentes para cada célula tivesse maior precisão.

Comparando os resultados das simulações e dos cálculos realizados através das equações gerais da LT com os valores de tensão e corrente obtidos dos testes práticos é possível notar boa assertividade entre os valores consolidando o funcionamento da bancada de acordo com a teoria das linhas de transmissão comprovando sua funcionalidade para a aplicação em aulas práticas.

Além disso, a observação dos fenômenos que ocorreram na linha de acordo com a teoria estudada comprovam seu bom funcionamento.

Trabalhos futuros

Com o funcionamento da linha já consolidado, pode ser dado prosseguimento no trabalho com o desenvolvimento de uma apostila com experimentos específicos de linhas de transmissão que evidenciem fenômenos estudados na teoria além de experimentos com a compensação de reativos.

Referências

DAMASCENO, Adryelle Faccio. **Aprimoramento de Bancada Didática para Estudo de uma Linha de Transmissão**. Monografia, Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama, Brasília, DF, Brasil, 2019.

DIEFENTHÄLER, Andressa Tais. **Modelagem Matemática de Linhas de Transmissão Baseada em Dados Reais da Rede de Distribuição Primária de Energia Elétrica**. Unijuí, Ijuí, RS, 2019.

EPE; **Transmissão de energia elétrica**, 2017.

Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/topico-70/Cap4_Texto.pdf. Acesso em 13 de janeiro de 2023.

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica: linha aéreas; Teoria das linhas em regime permanente, volume 1**. Livros Técnicos e Científicos. Escola Federal de engenharia de Itajubá, RJ, 1977.

ONS; **Mapa dinâmico do SIN**, 2022.

Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em 13 de janeiro de 2023.

REIS, Alex; et al.. **Curso de ATPDraw**. Uberlândia, MG, 2012.

SADIKU, Matthew N. O.; ALEXANDER, Charles K.. **Fundamentos de circuitos elétricos**. Ed. 5, AMGH Editora Ltda., São Paulo, SP, 2013.

SETTE, Homero. **Cálculo de indutores com núcleo de ar, com base no Trabalho de Neville Thiele Air - Cored Inductors for Audio**. Relatório técnico, 2015.

SILVA, Alex Gomes da. **Bancada para simulação de linha de transmissão.** Monografia, Universidade de Brasília, Faculdade UnB Gama, Brasília, DF, Brasil, 2017.

SOUZA, Luis Felipe Soares de. **Estimação de parâmetros de linhas de transmissão – estudo de caso.** Trabalho de conclusão de curso, CEFET-MG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2015.

Apêndice A

Cálculo de indutores de acordo com o trabalho de Homero Sette.

```
clear;
clc;

% CÁLCULO DE INDUTORES COM NÚCLEO DE AR DE ACORDO COM O
% TRABALHO DE HOMERO SETTE
% PROJETO A PARTIR DOS VALORES DE L, R E Db

% EXEMPLO HOMERO SETTE

% L=50000; % deve ser em uH
% R=5; % deve ser em ohm
% Db=75; % diâmetro da bobina deve ser em mm

fprintf('\nCÁLCULO DE INDUTORES COM NÚCLEO DE AR DE ACORDO
COM O TRABALHO DE HOMERO SETTE\n');
LT= input('\nEscolha a LT: \n 1. LT BAURU-CABREUVA, 235Km,
440KV; \n 2. LT MESQUITA-BAGUARI, 67.51Km, 230KV; \n 3. LT
SÃO JOÃO DO PIAUÍ-MILAGRES, 400Km, 500KV. \n \n');

if LT==1

    Rt=28.7648;
    Xt=75.8856;
    Bt=0.0013;

    Npi = input ('\nDigite a quantidade de células pi entre
9 e 11 \n\n'); % numero de células pi (cada célula pi deve
representar de 20 a 25km)

    R=Rt/Npi;
    X=Xt/Npi;
    B=Bt/Npi;

    L=(X/(2*pi*60))*1000000;
    C=((B/(2*pi*60))/2)*1000000;

    fprintf('\nPara a LT %d representada em %d células pi,
os valores dos componentes de cada célula são: \n L= %3.3f
(uH); \n R= %3.3f (ohm); \n C/2= %3.4f (uF); \n', LT, Npi,
L, R, C);

elseif LT==2

    Rt=7.5647;
    Xt=35.1256;
```

```

    Bt=0.000222831;

    % Npi = input ('Digite a quantidade de células pi entre
    9 e 11'); % numero de células pi (cada célula pi deve
    representar de 20 a 25km)

    Npi=3;
    R=Rt/Npi;
    X=Xt/Npi;
    B=Bt/Npi;

    L=(X/(2*pi*60))*1000000;
    C=((B/(2*pi*60))/2)*1000000;

    fprintf('\nPara a LT %d representada em %d células pi,
    os valores dos componentes de cada célula são: \n L= %3.3f
    (uH); \n R= %3.4f (ohm); \n C/2= %3.3f (uF); \n', LT, Npi,
    L, R, C);

elseif LT==3

    Rt=7.44;
    Xt=106.8;
    Bt=0.0024496;

    Npi = input ('\nDigite a quantidade de células pi entre
    15 e 20 \n\n'); % numero de células pi (cada célula pi deve
    representar de 20 a 25km)

    R=Rt/Npi;
    X=Xt/Npi;
    B=Bt/Npi;

    L=(X/(2*pi*60))*1000000;
    C=((B/(2*pi*60))/2)*1000000;

    fprintf('\n Para a LT %d representada em %d células pi,
    os valores dos componentes de cada célula são: \n L= %3.3f
    (uH); \n R= %3.3f (ohm); \n C/2= %3.4f (uF); \n', LT, Npi,
    L, R, C);

end

% CONSTANTE DE TEMPO

CT= L/R;

% DIMENSÕES ÓTIMAS PARA O MÍNIMO PESO DE COBRE

```

```

co= 0.3166*sqrt(L/R);

Dbo= (7/3)*co;

ao= 0.5276*sqrt(L/R);

ho= 0.3517*sqrt(L/R);

Cfo= 193.94*sqrt(L*co);

No= 58.5*sqrt(R*co);

Dfo= 0.1158*sqrt(sqrt((co^3)/R));

Nawgo= 36-39*((log10((200*Dfo)/25.4)/(log10(92))));

Pfo= (4.292*(Dfo^2)*sqrt(R*(co^3)))/1000;

fprintf('\nO mínimo peso de cobre necessário para a
produção de cada indutor será: \n%3.2f Kg.\n', Pfo);

fprintf('\nAs dimensões ótimas da bobina para o mínimo peso
de cobre são: \n%3.2f mm de altura; \n%3.2f mm de diâmetro
da forma; \n%3.f espiras; \nAWG %1.f.\n', ho, Dbo, No,
Nawgo);

fprintf('\nOs diâmetros externos comerciais (em mm) de
tubos de PVC rígido soldável são:\n');

fprintf('\n20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 60 | 75 | 85 | 110\n')

Db= input('\nDigite o diâmetro da forma de PVC (em mm) mais
próximo do valor encontrado para o mínimo peso de
cobre:\n');

% DIMENSÕES DO INDUTOR A PARTIR DE L, R E Db

c=(3/7)*Db;

a=(Db+c)/2;

h=(L*(6*a+10*c))/(R*161.67*a*c-9*L);

Cf= 193.94*sqrt(L*c); % comprimento do fio;

N=101.3213*sqrt((R*h*c)/(Db+c)); % número de espiras;

Df=0.0835*sqrt(sqrt((Db+c)/R)*h*c); % diâmetro do fio;

AWG=36-39*((log10((200*Df)/25.4)/(log10(92))));

```

```

Pf=(2.23*(Df^2)*sqrt(R*(Db+c)*h*c))/1000; % peso do fio em
g

fprintf('\nPara a produção do indutor serão necessários
%3.2f kg de fio de cobre de %3.2f mm de diâmetro e AWG
%1.f.\n', Pf, Df, AWG);
fprintf('Os indutores terão %3.2f mm de altura, %3.2f mm de
diâmetro interno e %3.f espiras. \n', h, Db, N); %
dimensões da bobina do indutor

```

Apêndice B

```
clear;
clc;

% LINHA REAL:
% z=28.7648+75.8856*j;
% y=0.0013*j;

% BANCADA:
R=(18.10)/235;
L=(202.42*10^-3)/235;
C=(4375.8*10^-9)/235;

x=235; % comprimento em km

Xl= j*2*pi*60*L;
B=j*2*pi*60*C;

z= (R+Xl);
y= B;

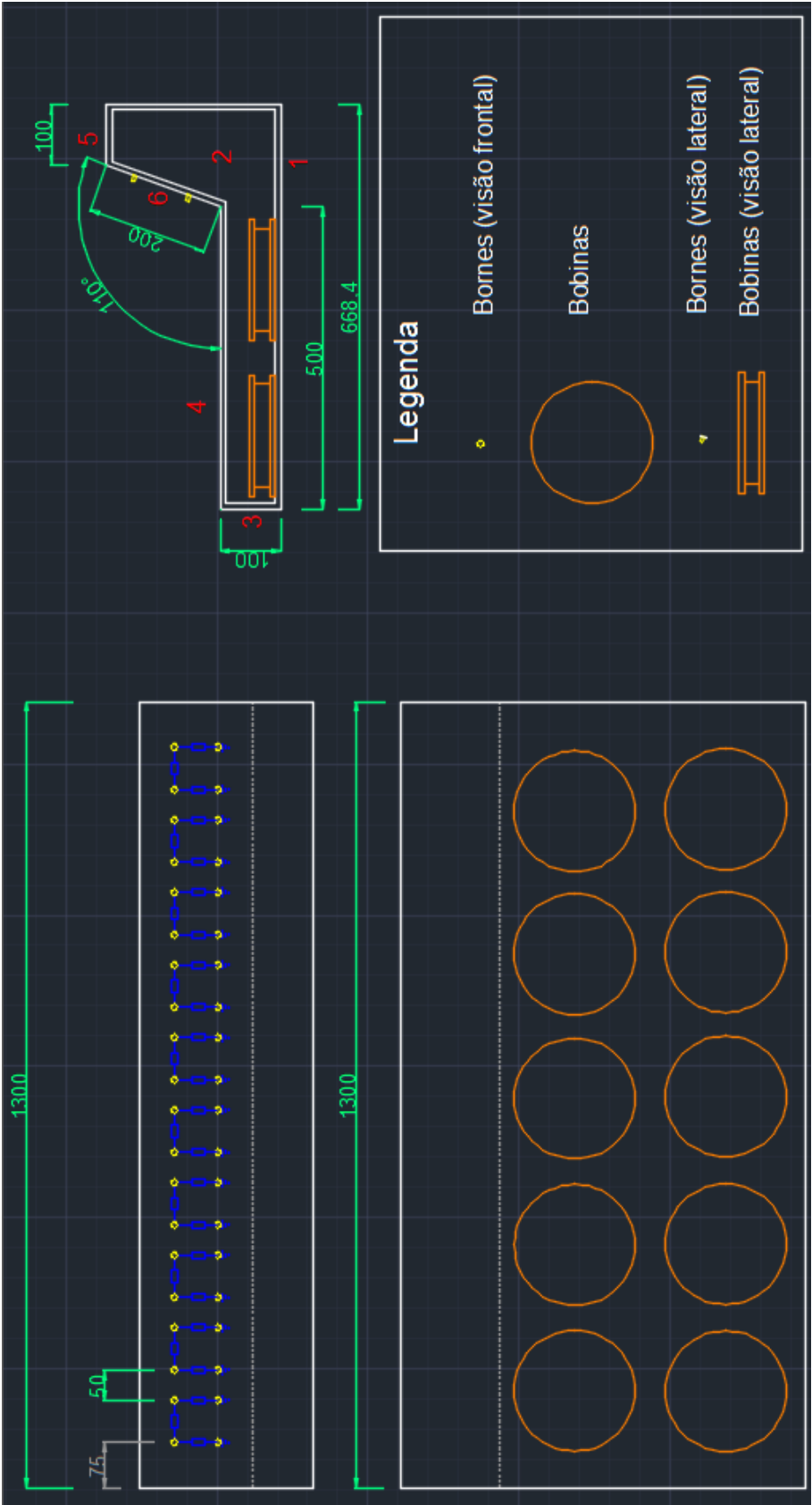
Ur = 26.9; % tensão no receptor
Zc = sqrt(z/y); % impedância característica
Ir = 0; % corrente no receptor

Ux=((Ur+Ir*sqrt(z/y))/2)*exp(x*sqrt(z*y))+((Ur-
Ir*sqrt(z/y))/2)*exp(-x*sqrt(z*y))

Ix=((Ur+Ir*sqrt(z/y))/(2*sqrt(z/y)))*exp(x*sqrt(z*y))-((Ur-
Ir*sqrt(z/y))/(2*sqrt(z/y)))*exp(-x*sqrt(z*y))
```

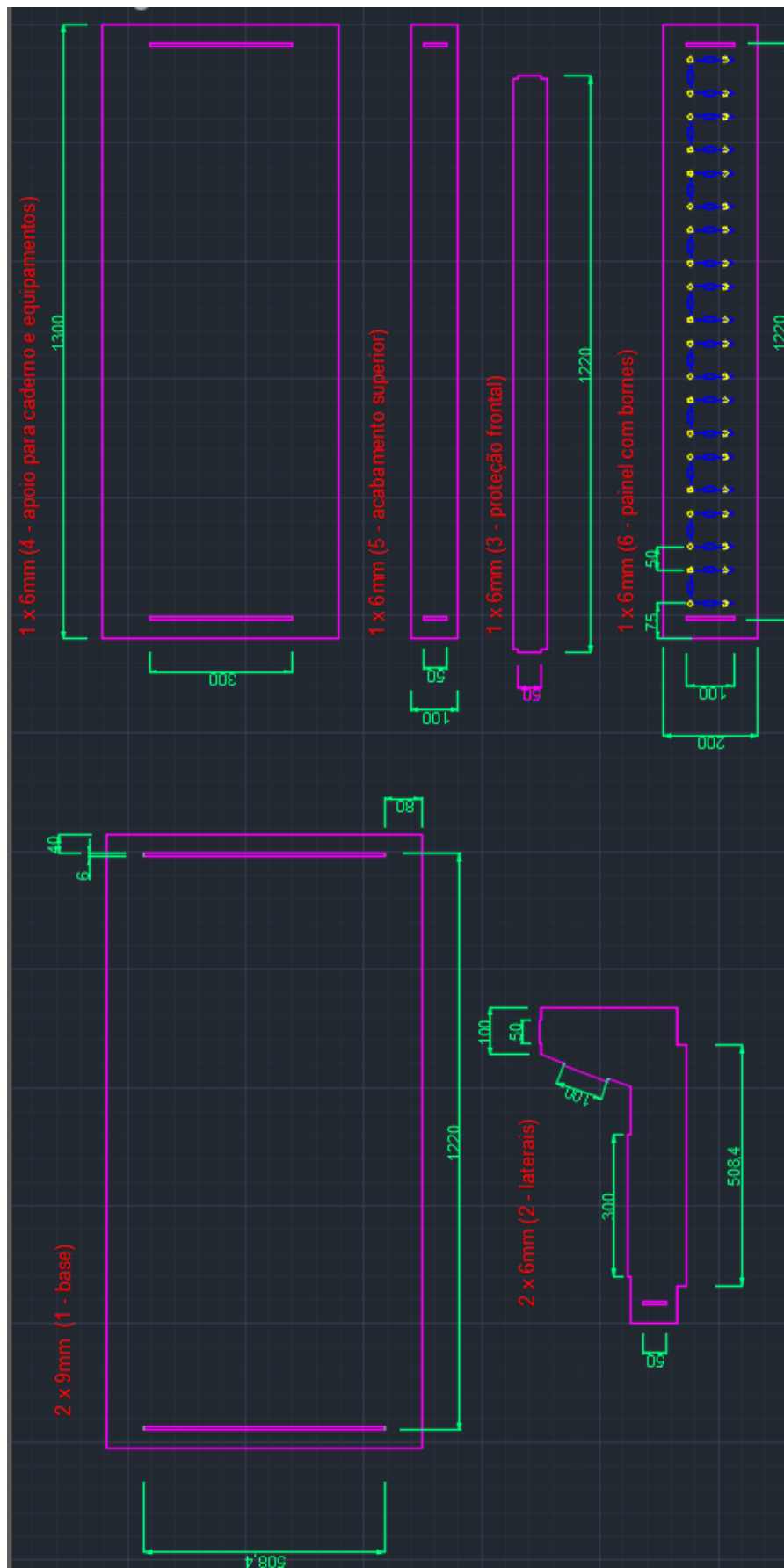
Anexo A

Figura A.1 - Projeto da bancada no AutoCad



Fonte: Elaborado pela própria autora

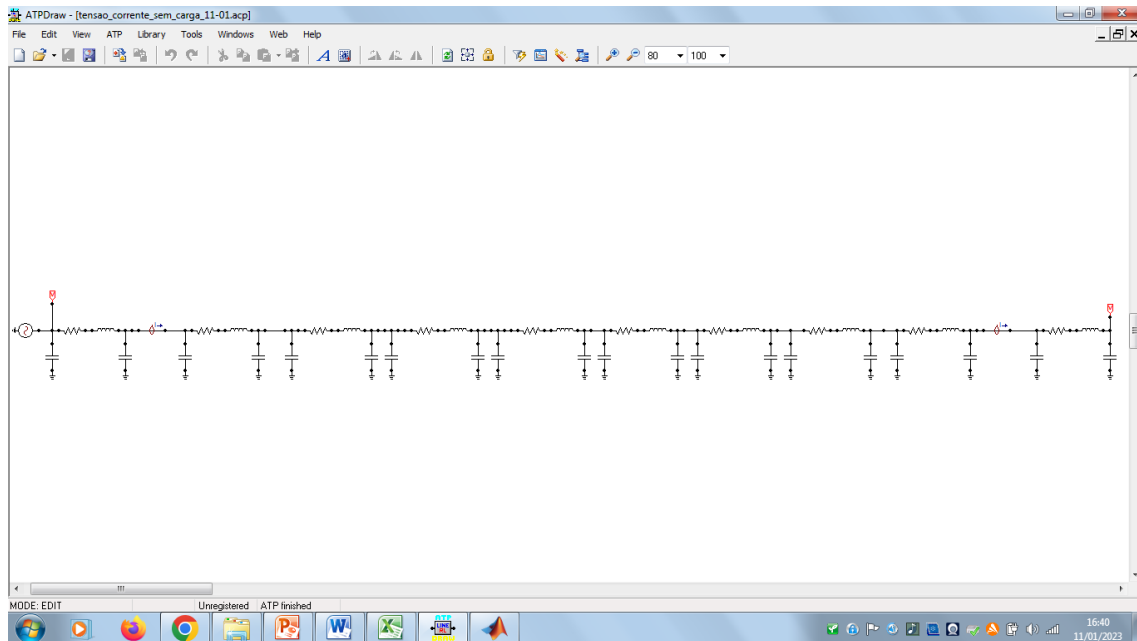
Figura A.2 - Projeto das peças da bancada no AutoCad



Fonte: Elaborado pela própria autora

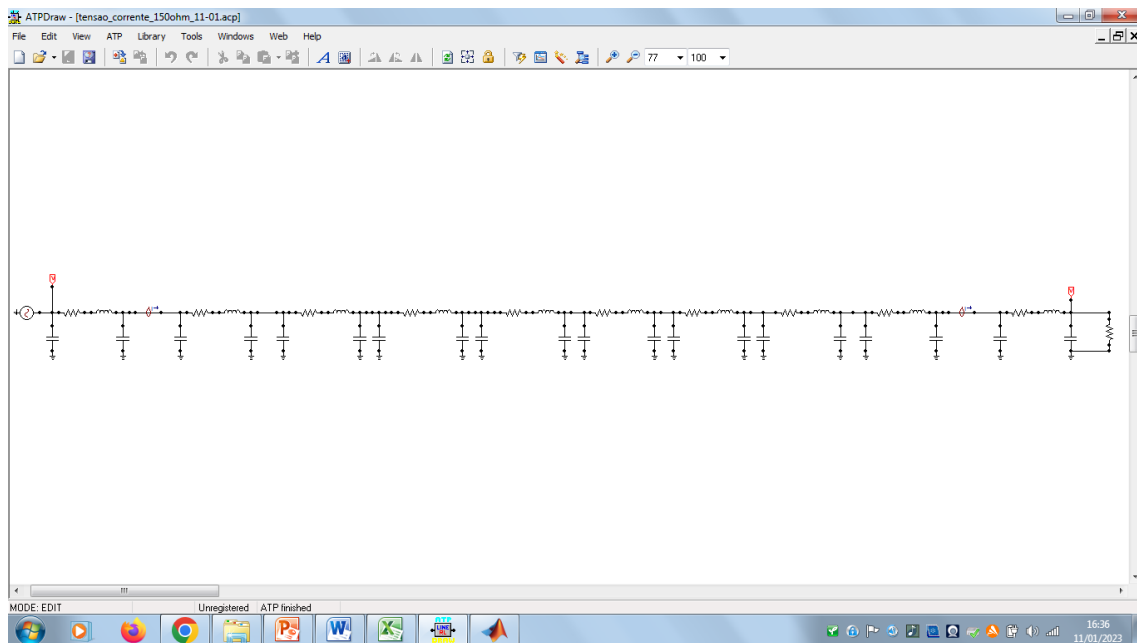
Anexo B

Figura B.1 – Circuito para simulação do teste sem carga no ATPDraw



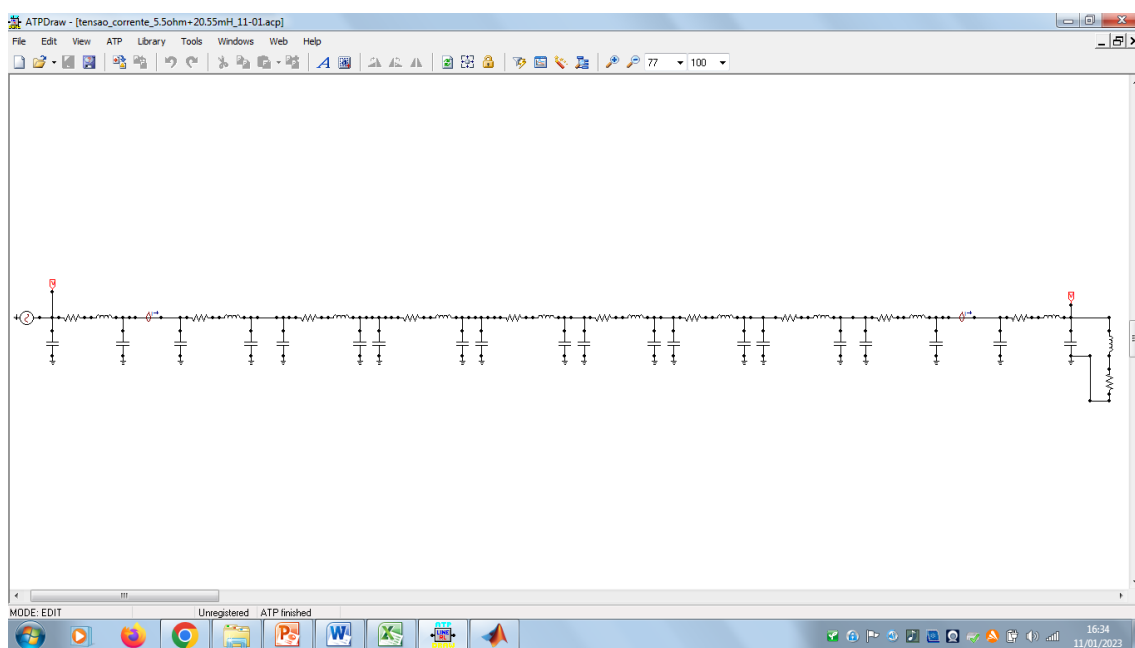
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura B.2 – Circuito para simulação do teste com carga resistiva no ATPDraw



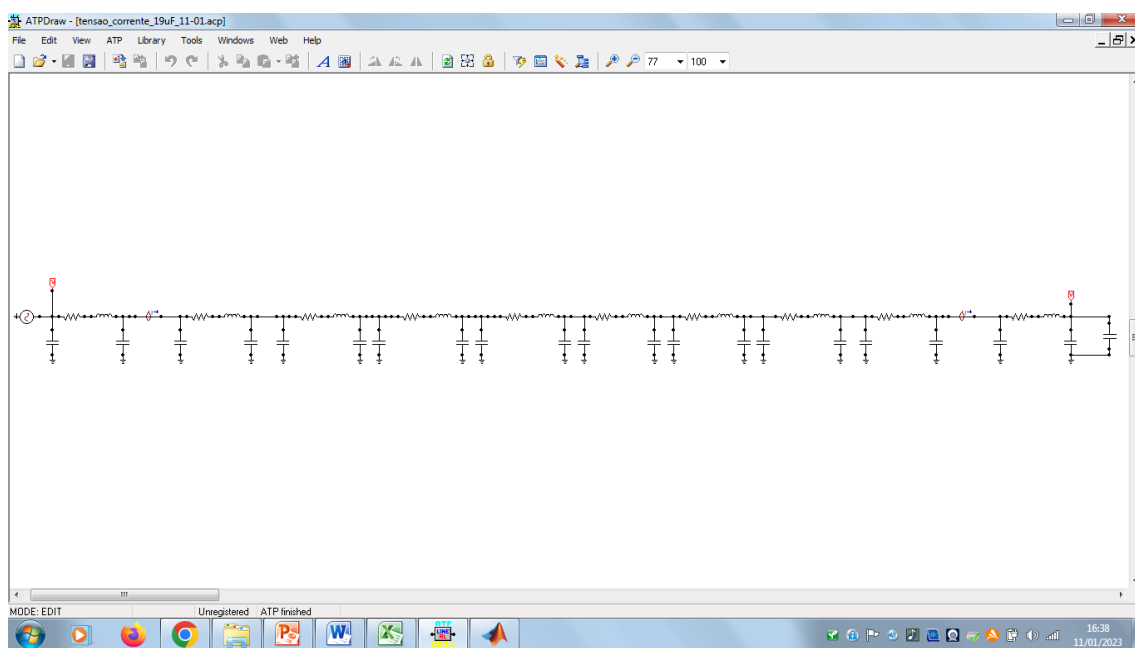
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura B.3 – Circuito para simulação do teste com carga indutiva no ATPDraw



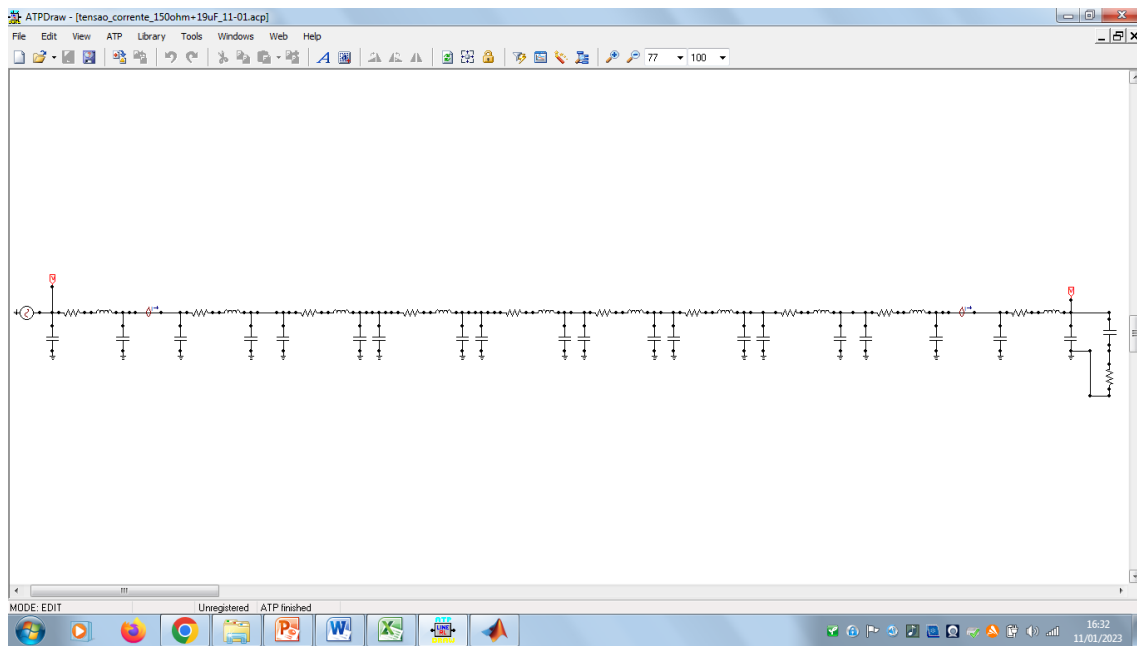
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura B.4 – Circuito para simulação do teste com carga puramente capacitiva no ATPDraw



Fonte: Elaborado pela própria autora

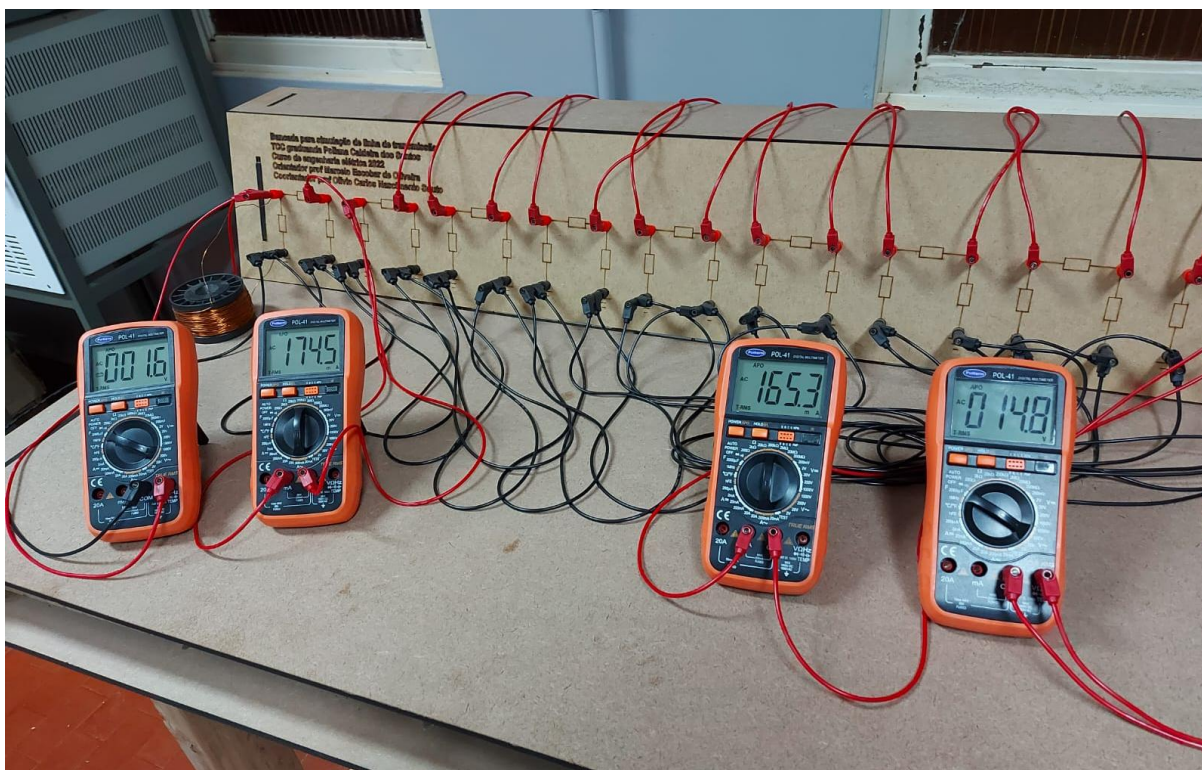
Figura B.5 – Circuito para simulação do teste com carga capacitiva no ATPDraw



Fonte: Elaborado pela própria autora

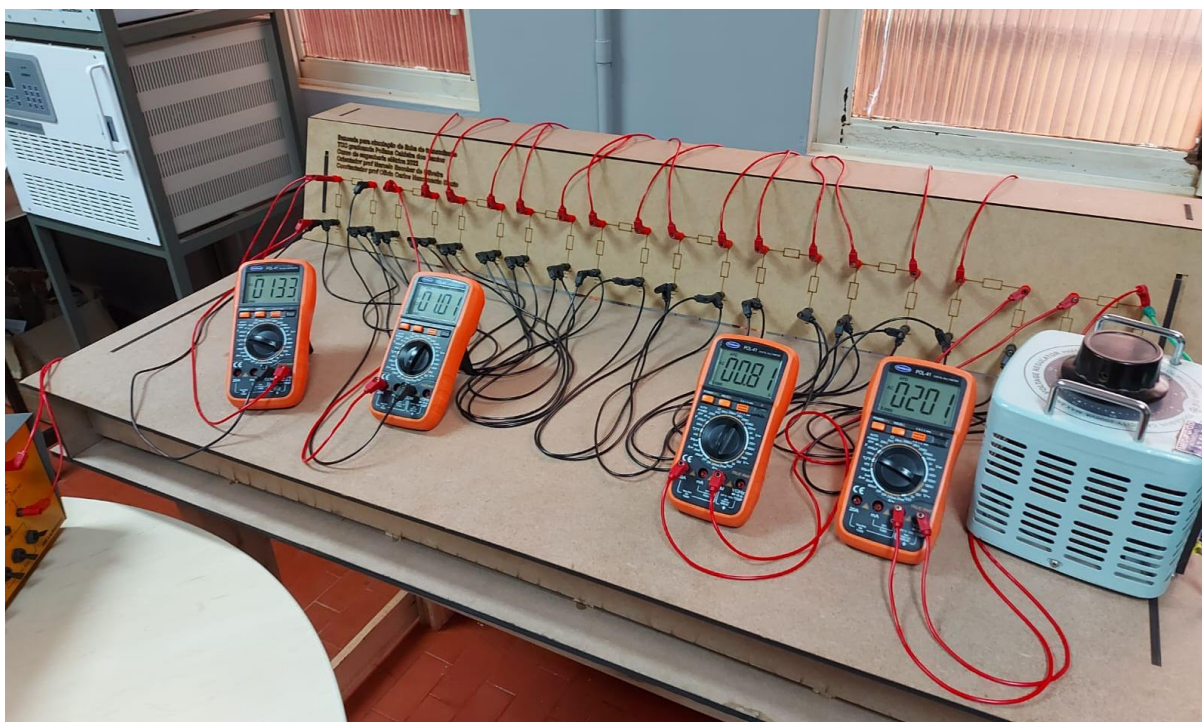
Anexo C

Figura C.1 - Teste com carga indutiva com núcleo de ar



Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura C.2 - Teste com carga indutiva com núcleo de material ferromagnético



Fonte: Elaborado pela própria autora