



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

MOYSÉS ABRAHAM PEREIRA LICÁ

**UM SIMULADOR PARA ANÁLISE DE CABOS E TOPOLOGIAS G.
FAST**

CASTANHAL/PA
2021

MOYSÉS ABRAHAM PEREIRA LICÁ

**UM SIMULADOR PARA ANÁLISE DE CABOS E TOPOLOGIAS G.
FAST**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Computação, pela Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Lobato Acatuassu Nunes
Universidade Federal do Pará

CASTANHAL/PA
2021

MOYSÉS ABRAHAM PEREIRA LICÁ

**UM SIMULADOR PARA ANÁLISE DE CABOS E TOPOLOGIAS G.
FAST**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Computação, pela Universidade Federal do Pará.

DATA DE APROVAÇÃO: 30 DE JANEIRO DE 2024

CONCEITO:

Prof. Dr. Diogo Lobato Acatauassu Nunes
Orientador - FACOMP/UFPA

Prof. Dr. João Cláudio Chamma Carvalho
Membro - FACOMP/UFPA

Prof. Dr. José Jailton Júnior
Membro - FACOMP/UFPA

Prof^ª. Dr^ª. Yomara Pinheiro Pires
Membro - FACOMP/UFPA

CASTANHAL/PA
2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais por sempre me apoiarem, a minha namorada por sempre me ajudar a organizar minha vida e aos meus colegas os quais sempre me divertiram quando tudo parecia ser só estresse e trabalho, sem todos eles eu não iria tão longe.

RESUMO

Ao longo dos anos, a demanda crescente por novos serviços digitais impulsionou o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de prover as requeridas taxas de transmissão. Nesse contexto, a União Internacional de Telecomunicações (International Telecommunication Union - ITU) desenvolveu a quarta geração de tecnologias de banda larga fixa sobre cabos metálicos sob o padrão G.fast. Tal solução espera atingir taxas na ordem de Gbps usando frequências de algumas centenas de MHz e cabos metálicos curtos. Esse trabalho apresenta o desenvolvimento de um software para avaliação de cabos metálicos com potencial uso em redes G.fast. O software tem o objetivo de auxiliar projetos de redes híbridas que usem cabos metálicos nos seguimentos finais de distribuição de sinais de internet.

Palavras-chave: Cabo de Par-Trançado. DSL. G.Fast. Linhas de Transmissão. Modelos de Cabo.

ABSTRACT

Over the years, the growing demand for new digital services has driven the development of new technologies capable of providing the required transmission rates. In this context, the International Telecommunication Union (ITU) developed the fourth generation of fixed broadband technologies over metallic cables under the G.fast standard. Such a solution expects to achieve rates in the order of Gbps using frequencies of a few hundred MHz and short metallic cables. This work presents the development of a software for the evaluation of metallic cables with potential use in G.fast networks. The software aims to help hybrid network projects that use metallic cables in the final segments of internet signal distribution.

Keywords: Cable Modelling. DSL. G.Fast Topology Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Comparação entre o padrão G.fast e tecnologias DSL mais antigas. (fonte: [4])	12
Figura 2.1 – Espectro eletromagnético. (fonte: [8])	15
Figura 2.2 – Modelagem de uma seção Δz de uma linha de transmissão como circuito elétrico. (fonte: [4])	16
Figura 2.3 – Exemplo de <i>Bridged Tap</i> . (fonte: [4])	17
Figura 2.4 – Métodos para obtenção da função de transferência para 3 enlaces dis- tintos. (fonte: [4])	18
Figura 4.1 – Diagrama de atividade para geração de curvas de um cabo.	26
Figura 4.2 – Diagrama de atividade para geração da função de transferência de uma topologia.	27
Figura 4.3 – Topologia D1-H1, topologia com 4 segmentos de cabos interconectados.	30
Figura 4.4 – Topologia D2-H2, topologia com 8 segmentos de cabos interconectados e 5 <i>bridged taps</i>	31
Figura 4.5 – Topologia D3-H5, topologia com 3 segmentos de cabos interconectados.	31
Figura 4.6 – Topologia D4-H3, topologia com 5 segmentos de cabos interconectados e 1 <i>bridged tap</i>	31
Figura 5.1 – Tela Inicial do Software, nela tem uma breve descrição sobre o software.	32
Figura 5.2 – Módulo Cable Analyzer - Início da Página, nesta imagem tem o campo para selecionar o modelo do cabo, o tipo do cabo e uma descrição do tipo de cabo selecionado.	33
Figura 5.3 – Módulo Cable Analyzer - Final da Página, nesta imagem temos os campos referentes aos parâmetros do modelo de cabo selecionado, bem como os campos de faixa de frequência, tamanho do cabo, função a calcular e escala de geração do gráfico.	33
Figura 5.4 – Módulo Topology Analyzer - Início da Página, nesta imagem temos o campo para selecionar a topologia desejada para se calcular e uma imagem da topologia selecionada.	34
Figura 5.5 – Módulo Topology Analyzer - Final da Página, nesta imagem temos os campos referentes a cada segmento de cabo da topologia selecionada, tanto o tipo de cabo do segmento quanto seu tamanho, também temos os campos referentes a faixa de frequência, além, da impedância de carga e de fonte.	35
Figura 5.6 – Resistência em Série do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.	36
Figura 5.7 – Indutância em Série do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.	36
Figura 5.8 – Condutância em Paralelo do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.	37
Figura 5.9 – Capacitância em Paralelo do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.	37
Figura 5.10 – Constante de Atenuação do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.	38
Figura 5.11 – Constante de Fase do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.	38

Figura 5.12–Constante de Propagação do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre. . .	39
Figura 5.13–Impedância Característica do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre. . .	39
Figura 5.14–Função de Transferência usando modelo BT0 e cabo TP100 com comprimento de 100 metros	40
Figura 5.15–Função de Transferência usando modelo BT0 e cabo 26AWG com comprimento de 100 metros	40
Figura 5.16–Função de Transferência da Topologia D4-H3	41
Figura 5.17–Função de Transferência da Topologia D1-H1	42
Figura B.1 – Cálculo da Constante de Propagação - Modelo TNO/EAB	48
Figura B.2 – Cálculo da Impedância Característica - Modelo TNO/EAB	49
Figura B.3 – Cálculo da Função de Transferência - Modelo TNO/EAB	49
Figura B.4 – Cálculo dos Parâmetros Primários - Modelo TNO/EAB	50
Figura C.1 – Cálculo dos Parâmetros Primários - Modelo BT0	51
Figura C.2 – Cálculo da Constante de Propagação, Impedância em Série e Admitância em Paralelo - Modelo BT0	51
Figura C.3 – Cálculo da Função de Transferência - Modelo BT0	52
Figura C.4 – Cálculo da Impedância Característica - Modelo BT0	52
Figura D.1 – Cálculo da Constante de Propagação - Modelo KHM	53
Figura D.2 – Cálculo da Impedância Característica - Modelo KHM	54
Figura D.3 – Cálculo da Função de Transferência - Modelo KHM	54
Figura D.4 – Cálculo da Impedância Característica - Modelo KHM	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros de cabos para o modelo BT0	29
Tabela 4.2 – Parâmetros de cabos para o modelo KHM	29
Tabela 4.3 – Parâmetros de cabos para o modelo TNO/EAB	30
Tabela 4.4 – Continuação dos parâmetros de cabos para o modelo TNO/EAB . . .	30

LISTA DE SIGLAS

BT0	<i>British Telecom Model 0</i> , em português, Modelo 0 da companhia de telecomunicações britânica;
CSS	<i>Cascading Style Sheets</i> , em português, Folhas de Estilo em Cascata;
DMT	<i>Discrete Multitone Modulation</i> , em português, modulação multitone discreto;
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i> , em português, Linha Digital do Assinante;
HTML	<i>HyperText Markup Language</i> , em português, Linguagem de Marcação de Hipertexto;
ITU-T	<i>ITU's Telecommunication Standardization Sector</i> , em português, Departamento de Padronização de Telecomunicações do Grupo ITU;
JS	<i>JavaScript</i> ;
KHM	<i>K H Model</i> , em português, Modelo K H da UFPA;
LTI	<i>Line Topology Identification</i> , identificação de topologia de linha;
PE	polietileno, polímero sintético de plástico, comumente usado para isolamento de cabos;
PVC	Policloreto de vinila, polímero sintético de plástico, comumente usado para isolamento de cabos;
RLGC	Resistência, Indutância, Condutância e Capacitância, tais parâmetros são comumente chamados de parâmetros primários;
SGBD	Sistema gerenciador de banco de dados;
SQL	<i>Standard Query Language</i> , em português, Linguagem de Consulta Padrão;
TNO/EAB	<i>Netherlands Organisation for Applied Scientific Research / Ericsson A.B.</i> , em português, modelo da TNO/EAB;
VM	<i>Virtual Machine</i> , em português, Máquina Virtual.

LISTA DE SÍMBOLOS

$R(f)$	Resistência em Série;
$L(f)$	Indutância em Série;
$G(f)$	Condutância em Paralelo;
$C(f)$	Capacitância em Paralelo;
Z_s	Impedância da fonte;
Z_l	Impedância da carga;
$\gamma(f)$	Constante de propagação;
$\alpha(f)$	Constante de atenuação;
$\beta(f)$	Constante de fase;
$\Re\{\}$	Função real, usada para denotar a parte real do argumento entre as chaves;
$\Im\{\}$	Função imaginária, usada para denotar a parte imaginária do argumento entre as chaves;
R_{oc}	Parâmetro usado no modelo BT0;
a_c	Parâmetro usado no modelo BT0;
L_0	Parâmetro usado no modelo BT0;
L_∞	Parâmetro usado no modelo BT0;
f_m	Parâmetro usado no modelo BT0;
N_b	Parâmetro usado no modelo BT0;
g_0	Parâmetro usado no modelo BT0;
N_{ge}	Parâmetro usado no modelo BT0;
C_∞	Parâmetro usado no modelo BT0;
C_0	Parâmetro usado no modelo BT0;
N_{ce}	Parâmetro usado no modelo BT0;
k_1	Parâmetro usado no modelo KHM;
k_2	Parâmetro usado no modelo KHM;
k_3	Parâmetro usado no modelo KHM;
h_1	Parâmetro usado no modelo KHM;

h_2	Parâmetro usado no modelo KHM;
$Z_{0\infty}$	Parâmetro usado no modelo TNO/EAB;
n_{vf}	Parâmetro usado no modelo TNO/EAB;
R_{s0}	Parâmetro usado no modelo TNO/EAB;
q_e	Parâmetro usado no modelo TNO/EAB;
q_h	Parâmetro usado no modelo TNO/EAB;
q_x	Parâmetro usado no modelo TNO/EAB;
q_y	Parâmetro usado no modelo TNO/EAB;
q_c	Parâmetro usado no modelo TNO/EAB;
ϕ	Parâmetro usado no modelo TNO/EAB;
f_d	Parâmetro usado no modelo TNO/EAB;

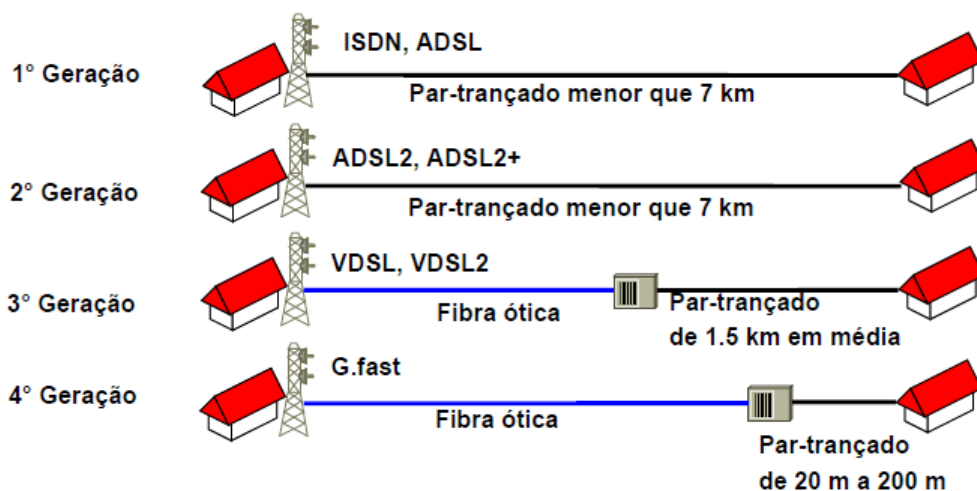
1 INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna há cada vez mais demanda por conexões de internet com altas taxas de transmissão, baixa latência e o menor número possível de erros. O advento das redes baseadas em fibra óptica foi um grande salto no que diz respeito a velocidade das redes de acesso [1]. Entretanto, escavar, aterrar, passar dutos e instalar conexões de fibra óptica até a residência do usuário final ainda é oneroso em larga escala [2]. Por conta disso, ainda se fazem presentes em grande parte do mundo instalações de cabeamento metálico. Com o intuito de reaproveitar tais instalações, e assim, economizar recursos de construção, além de garantir velocidades de transmissão satisfatórias, as redes híbridas foram criadas. Tais redes utilizam enlaces de fibra óptica em conjunto com cabos metálicos, de forma que o ultimo trecho de distribuição se dá pelo cabeamento metálico existente.

Hoje em dia, a linha digital do assinante assimétrica (*Assymetrical Digital Subscriber Line* - ADSL, ADSL2 e ADSL2+) e a linha digital do assinante de alta velocidade (VDSL e VDSL2) ainda representam importantes tecnologias de acesso a banda larga fixa. Naturalmente, a penetração dos enlaces de fibra vem crescendo e, conseqüentemente, há uma diminuição do enlace metálico. Dentro deste contexto, a União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union* - ITU) iniciou o desenvolvimento da quarta geração de sistemas DSL, gerando assim o padrão G.fast [3].

O padrão G.fast têm como objetivo atingir taxas máximas efetivas (*downstream + upstream*) próximas de 1 Gb/s, além de taxas mínimas superiores a 150 Mb/s, utilizando para isso cabos de cobre de par-trançado curtos. Uma comparação entre o G.fast e tecnologias DSL mais antigas, em termos de comprimento típico dos enlaces utilizados nas topologias é mostrado na Figura 1.1 abaixo:

Figura 1.1 – Comparação entre o padrão G.fast e tecnologias DSL mais antigas. (fonte: [4])



Com base nisso, o trabalho aqui apresentado descreve um simulador capaz de estimar o comportamento em frequência dos cabos e enlaces metálicos usados no sistema G.fast. O objetivo é averiguar a performance das linhas, auxiliando no projeto e tomada de decisões adotadas na construção de redes híbridas usadas em sistemas G.fast.

1.1 Características Físicas dos Cabos e Enlaces

Cabos da rede de acesso de cobre são tipicamente compostos por um ou mais pares de fios de cobre cilíndricos, que podem ser fisicamente trançados ou não-trançados. Cada fio de cobre dentro dos cabos é coberto por algum tipo de material isolante (dielétrico), tal como polietileno (PE) ou policloreto de polivinila (PVC). Os cabos podem ser classificados em diferentes categorias (por exemplo, Categoria 3, Categoria 5, Categoria 6, etc), de acordo com as suas qualidades de transmissão. As qualidades de transmissão do cabo são geralmente definidas pelo seu nível de atenuação em frequências específicas [5].

1.2 Definição do Problema

A análise das características elétricas dos cabos metálicos em função da frequência dos sinais transportados por eles é tipicamente feita por meio da teoria de linhas de transmissão e modelagem de rede de duas portas. Nesse contexto, é uma prática comum de engenheiros e projetistas recorrer aos chamados modelos de cabo. Um modelo de cabo apresenta um conjunto de parâmetros e equações que podem ser utilizadas para estimar os parâmetros elétricos das linhas. Ao longo dos anos tanto a indústria quanto a academia propuseram modelos de cabos metálicos. Alguns exemplos são os modelos da *British Telecom* (BT0), da *Netherlands Organisation for Applied Scientific Research / Ericsson A.B* (TNO/EAB) e da Universidade Federal do Pará (KHM). Os modelos de cabo podem ser codificados em linguagem de alto nível e servir para estimação de performance de enlaces e topologias complexas, evitando processos de medições de laboratório que geralmente consomem recursos humanos e materiais. Além disso, os modelos de cabo podem ser utilizados como ferramenta para o desenvolvimento de novas técnicas de modulação e algoritmos de processamento de sinal.

Uma outra aplicação importante dos modelos de cabo é dar suporte a processos de identificação de topologia de linha (*line topology identification - LTI*) [6].

Não é raro que operadoras de serviço banda larga encontrem dificuldades ao tentar estimar as características de suas redes de acesso de cobre, uma vez que, em muitos casos, os cabos foram instalados ali há décadas e não há documentação técnica facilmente disponível. Mesmo quando essa documentação existe, em muitos casos ela está desatualizada, e não é certo que as informações ali contidas são apropriadas para uma boa predição das características dos enlaces. Os modelos de cabo podem ser utilizados por técnicas *LTI*, afim de estimar, por exemplo, o tipo e número de seções, bem como o diâmetro e comprimento dos cabos utilizados em um determinado enlace metálico G.fast [4].

1.3 Resumo dos Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um simulador para análise de cabos e topologias, com ênfase na aplicação dos mesmos em redes G.fast.

Os objetivos específicos deste trabalho podem ser sumarizados em:

1. Desenvolver uma ferramenta para simulação de cabos metálicos utilizados em sistemas G.fast por meio dos modelos KHM, BT0 e EAB/TNO. As características elétricas estimadas pelo software incluem:
 - a) Parâmetros primários;
 - b) Contante de propagação;
 - c) Impedância característica;

- d) Função de transferência.
- 2. Desenvolver uma ferramenta para simulação de enlaces G.fast utilizando os cabos metálicos previamente salvos durante o objetivo 1. Os enlaces são arranjos constituídos por diferentes tipos de cabo conectados em série e *bridged taps* que compõe a rede de acesso entre o provedor e os usuários.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho se organiza da seguinte maneira:

Revisão Bibliográfica: este capítulo faz uma revisão sobre rádio frequência, micro ondas, guia de ondas e teoria de linhas de transmissão, descrevendo como um cabo metálico pode ser representado por seus parâmetros primários, parâmetros secundários e função de transferência. Ele também descreve como é feita a estimação das características elétricas de um enlace contendo diferentes tipos de cabos e *bridged taps* por meio da modelagem de rede de duas portas.

Fundamentação Teórica: este capítulo descreve os modelos de cabo KHM, BT0 e EAB/TNO, apresentando suas equações e parâmetros e indicando como eles são usados para calcular as características elétricas das linhas.

Metodologia: este capítulo descreve o processo de concepção do software, indicando sua arquitetura, estrutura e detalhando os elementos utilizados em seu desenvolvimento, tal como as bibliotecas e o sistema de gerenciamento de banco de dados. Além disso, também são apresentadas informações sobre os cabos metálicos suportados pela ferramenta.

Resultados: este capítulo apresenta os resultados obtidos, que incluem gráficos reproduzindo os comportamentos elétricos das linhas além da interface do software.

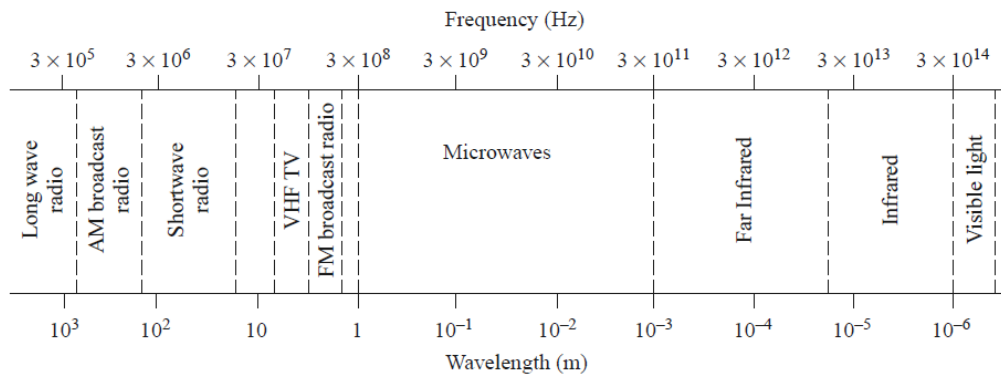
Conclusão: neste capítulo é feita a conclusão do trabalho bem como apresentado os trabalhos futuros planejados para o software.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Rádio Frequência e Micro ondas

O campo de rádio frequências e micro ondas na engenharia analisa o comportamento de ondas de sinais alternados cujas frequências estão no intervalo de 100 MHz até 1000 GHz. Nesse contexto, as rádios frequências estão no intervalo de altas frequências (VHF - *Very High Frequencies*) (30 - 300 MHz) até as ultra altas frequências (UHF - *Ultra High Frequencies*) (300 - 3000 MHz), enquanto que as micro ondas estão presentes na faixa de frequência de 3 a 300 GHz. Para estudos mais profundos sobre o comportamento de ondas de rádio frequência e micro ondas é necessário uma análise criteriosa sobre as quatro leis de Maxwell (mais detalhes em: [8]), as quais serão brevemente citadas durante este trabalho, porém, não aprofundadas devido a complexidade ultrapassar o escopo deste documento. A Figura 2.1 ilustra o espectro eletromagnético.

Figura 2.1 – Espectro eletromagnético. (fonte: [8])



O espectro eletromagnético abrange as formas de onda, englobando tanto as ondas de rádio, micro ondas, infravermelho, entre outras.

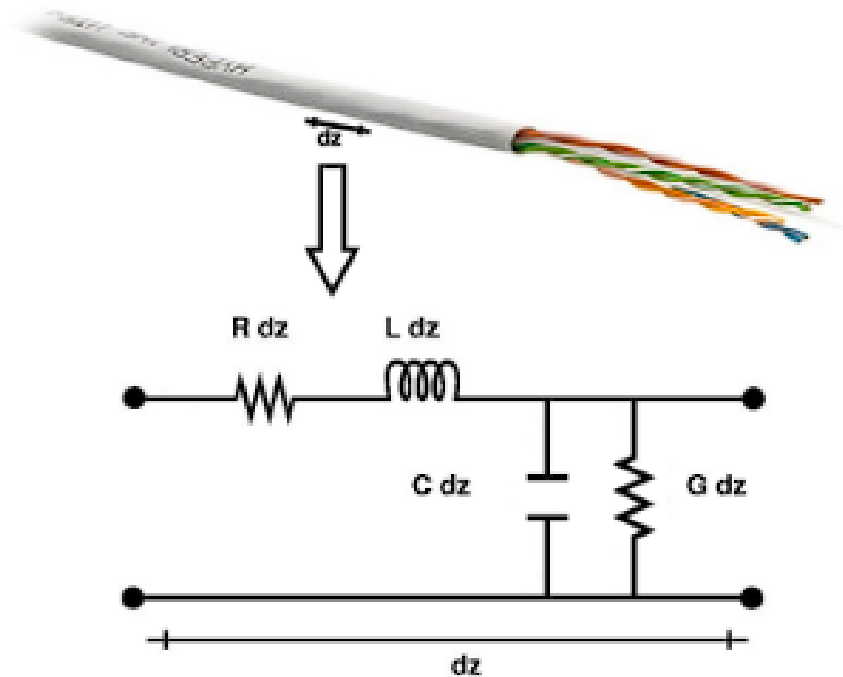
2.2 Guias de Ondas

Guias de ondas são estruturas que permitem a propagação de ondas em seu meio material. Cabos metálicos e cabos de fibra óptica são exemplos de guias de ondas. Além deles, existem inúmeros tipos de guias de ondas, que permitem não somente a propagação de ondas elétricas e luminosas, mas também, ondas de calor, acústicas e afins.

2.3 Teoria da Linha de Transmissão Clássica

De acordo com a teoria da linha de transmissão clássica (mais detalhes em: [8]), as características elétricas dos cabos de pares de fios metálicos são determinadas pelos seus parâmetros primários dependentes da frequência, a resistência em série $R(f)$, a indutância em série $L(f)$, a condutância em paralelo $G(f)$, e a capacitância em paralelo $C(f)$. Os parâmetros primários são definidos por unidade de comprimento Δz , tal como mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Modelagem de uma seção Δz de uma linha de transmissão como circuito elétrico. (fonte: [4])



Esses parâmetros compõem a impedância em série:

$$Z(f) = R(f) + j2\pi fL(f) \quad (2.1)$$

e a admitância em paralelo

$$Y(f) = G(f) + j2\pi fC(f) \quad (2.2)$$

Dado que os valores dos parâmetros primários são expressos por unidade de comprimento, eles devem ser propriamente escalados pelo sistema métrico adotado para análise. A partir dos parâmetros primários, pode-se derivar os parâmetros secundários, a impedância característica:

$$Z_0(f) = \sqrt{\frac{Z(f)}{Y(f)}} \quad (2.3)$$

e a constante de propagação:

$$\gamma(f) = \sqrt{Z(f)Y(f)} \quad (2.4)$$

Escrevendo a constante de propagação como um número complexo obtém-se:

$$\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f) \quad (2.5)$$

onde $\alpha(f)$ é a constante de atenuação e $\beta(f)$ é a constante de fase.

De maneira semelhante, tendo em mãos os parâmetros secundários é possível derivar os parâmetros primários através de:

$$R(f) = \Re\{\gamma(f)Z_0(f)\} = \Re\{Z(f)\} \quad (2.6)$$

$$L(f) = \frac{1}{2\pi f} \Im\{\gamma(f)Z_0(f)\} = \frac{1}{2\pi f} \Im\{Z(f)\} \quad (2.7)$$

$$G(f) = \Re\left\{\frac{\gamma(f)}{Z_0(f)}\right\} = \Re\{Y(f)\} \quad (2.8)$$

$$C(f) = \frac{1}{2\pi f} \Im\left\{\frac{\gamma(f)}{Z_0(f)}\right\} = \frac{1}{2\pi f} \Im\{Y(f)\} \quad (2.9)$$

2.4 Função de Transferência

A função de transferência é uma informação muito importante pois indica como o cabo irá atenuar e alterar a fase dos sinais transmitidos por ele. A função de transferência é calculada por:

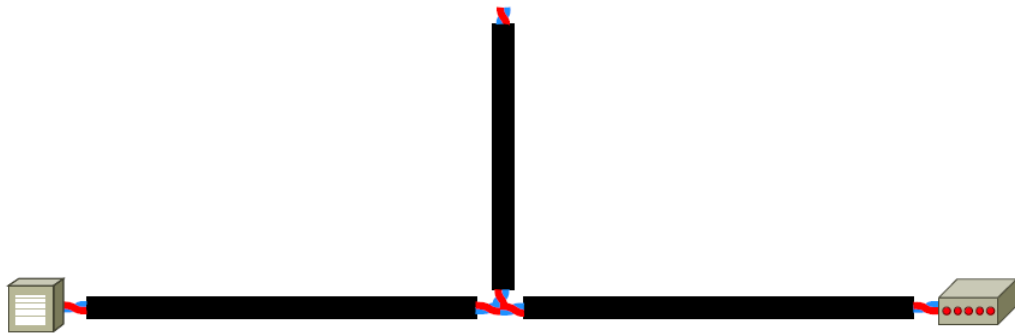
$$H(f) = e^{-d\gamma(f)} \quad (2.10)$$

onde $\gamma(f)$ é a constante de propagação e d é o comprimento do cabo.

2.5 Bridged Taps

Bridged Tap é uma denominação dada para enlces de cabos não terminados, muito presentes em estruturas de redes, sendo deixados como pontos de conexões sobressalentes.

Figura 2.3 – Exemplo de *Bridged Tap*. (fonte: [4])



2.6 Simplificação de Enlaces Complexos

A função de transferência dada pela equação (2.10) se aplica apenas para cabos homogêneos perfeitamente terminados. Para enlces mais complexos, onde estão interligados mais de um tipo de cabo, há a presença de *bridged taps*, etc., é necessário fazer outra abordagem.

A modelagem clássica da rede de duas portas (*two-port network modeling*) é usada para construir um equivalente elétrico descrito pelas matrizes ABCD a partir dos parâmetros primários ou secundários de cada segmento individual. Assumindo-se que cada segmento de enlace é uma linha de transmissão homogênea, a matriz ABCD para o segmento de cabo serial é dada por:

$$T_s = \begin{bmatrix} A(f) & B(f) \\ C(f) & D(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma(f)d) & Z_0(f)\sinh(\gamma(f)d) \\ \frac{\sinh(\gamma(f)d)}{Z_0(f)} & \cosh(\gamma(f)d) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

e a matriz ABCD para uma *bridged tap* é dada por:

$$T_{bt} = \begin{bmatrix} A(f) & B(f) \\ C(f) & D(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\tanh(\gamma(f)d)}{Z_0(f)} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

A matriz ABCD total que caracteriza a topologia é obtida pelo produto das matrizes ABCD de cada segmento. Para um enlace de n segmentos, a matriz ABCD total T_{tot} é dada por:

$$T_{tot} = T^{(1)} \times T^{(2)} \times \dots \times T^{(n)} \quad (2.13)$$

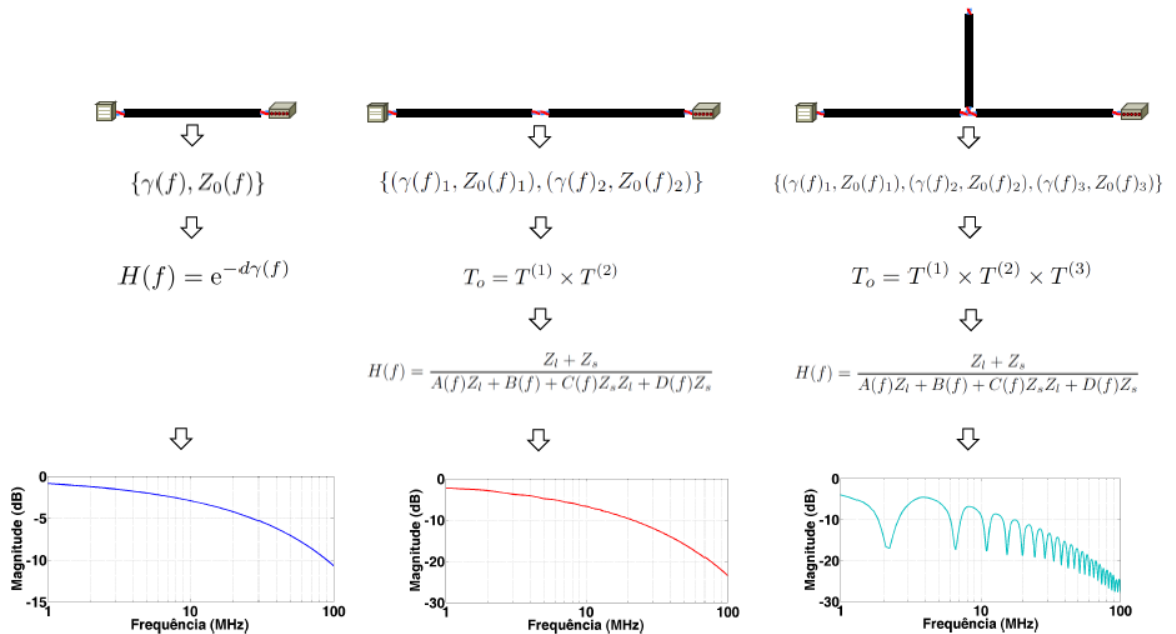
A partir da matriz T_{tot} é possível derivar a função de transferência do enlace baseada na perda de inserção (*insertion loss*) por:

$$H(f) = \frac{Z_l + Z_s}{A(f)Z_l + B(f) + C(f)Z_sZ_l + D(f)Z_s} \quad (2.14)$$

onde Z_s e Z_l são as impedâncias da fonte e da carga, respectivamente, que casam ambos os lados do circuito da linha de transmissão.

A Figura 2.4 abaixo exemplifica os procedimentos para obtenção da função de transferência de 3 enlaces metálicos distintos (serial simples, serial múltiplo e serial múltiplo com *bridged tap*):

Figura 2.4 – Métodos para obtenção da função de transferência para 3 enlaces distintos. (fonte: [4])



2.7 Tecnologias de Transmissão em Cabos Metálicos de Par-Trançado

Abaixo faremos uma breve revisão sobre as tecnologias (já implementadas ao longo do tempo) de transmissão em cabo metálicos, falando primeiro sobre HDSL, ADSL e VDSL. (as referências para o conteúdo abaixo estão em: [11] e [12])

2.7.1 HDSL

O *High-Bit-Rate Digital Subscriber Line* (HDSL), em português Linha Digital de Assinante de Alta Taxa de Dados, foi desenvolvido como uma tecnologia alternativa sem repetidores para disponibilização de serviços que utilizam métodos de multiplexação de canais de voz e dados em um mesmo cabo metálico. HDSL opera tanto em *Full-duplex* (transmissão simultânea de dados entre o transmissor e receptor em ambos os sentidos, bidirecional) quanto em *half-duplex* (transmissão entre o transmissor e receptor em ambas os sentidos, porém, embora o transmissor e receptor possam receber e enviar dados, isso não ocorre simultaneamente).

No modo *half-duplex* as taxas alcançadas podem chegar em até 1,544 Mb/s, enquanto que no modo *full-duplex* as taxas podem chegar em até 784 kb/s em cada sentido de transmissão.

2.7.2 ADSL

Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL), em português, Linha Digital Assimétrica de Assinante, é uma tecnologia onde os canais de comunicação *downstream* e *upstream* são assimétricos, permitindo assim (na maior parte das implementações) alocar mais banda para *download* do que para *upload*. Apesar do ADSL poder usar várias técnicas de modulação para realizar tal feito a maior parte dos padrões utiliza a modulação DMT (*Discrete Multitone Modulation*, em português, modulação multitone discreto).

Devido a variedade de técnicas que podem ser utilizadas para modelar o canal, e as várias formas de se configurar as larguras de banda de *downstream* e *upstream*, é difícil definir as taxas que este padrão pode alcançar, mas em sua maioria as taxas ficam em torno de 6 e 7 Mb/s levando em consideração os dois canais.

2.7.3 VDSL

Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line (VDSL), Linha Digital do Assinante de Taxa de Bits Muito Alta, opera com transmissões assimétricas variando de 13 a 52 Mb/s de *download*, e 1,5 a 2,3 Mb/s de *upload*. A tecnologia VDSL, apresenta características semelhantes ao ADSL, isto é, utiliza o tipo assimétrico de transmissão, sendo que a sua principal vantagem sobre o ADSL é que este pode atingir velocidades de transmissão muito superiores as utilizadas pelo seu concorrente mais próximo.

2.8 Padrão G.fast

O padrão G.fast, onde *fast* significa *fast access to subscriber terminals*, vem sendo desenvolvido desde 2011 pelo grupo Q4/15 da União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union - ITU*). Grandes empresas, operadoras e universidades de todo o mundo estão envolvidas neste processo, onde destacam-se: *Ericsson AB (EAB)*, *Alcatel-Lucent*, *British Telecom (BT)*, *Swisscom*, *TNO*, *Lantiq*, *Marvell Technology*, *Ikanos*, dentre outras.

Como explicado no Capítulo 1, o padrão G.fast espera atingir taxas máximas efetivas (*downstream+upstream*) próximas de 1 Gb/s, além de taxas mínimas superiores a 150 Mb/s, utilizando para isso cabos de cobre de par-trançado curtos. Para alcançar tais taxas, o ITU conceberá ao G.fast um perfil de transmissão inicial com largura de banda de aproximadamente 106 MHz, e espaçamento entre portadoras de 51,75 kHz. Um segundo perfil com largura de banda de aproximadamente 212 MHz também será padronizado

na sequência [7]. Considerando-se que a atenuação sobre um cabo de par-trançado é diretamente proporcional ao aumento da frequência do sinal e aumento do comprimento do cabo, estima-se que tais taxas serão realizáveis devido ao uso destes cabos de dimensões reduzidas, tipicamente variando entre 20 e 200 m de comprimento.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Modelagem de Cabo

Na literatura, existem vários modelos paramétricos para caracterizar um cabo metálico. Em termos de cabos de par-trançado, podemos destacar os seguintes: TNO/EAB (criado e padronizado por duas empresas, cujo as siglas dão nome ao modelo), BT0 (modelo criado pela *British Telecom Company*, em português, companhia britânica de telecomunicações), KHM (modelo criado pela Universidade Federal do Pará).

Tais modelos de cabos existem para calcular de forma simplificada características elétricas da linha, como a constante de propagação, a impedância característica e os parâmetros primários do cabo. A diferença entre cada modelo está nos parâmetros e fórmulas matemáticas usadas para caracterizar o cabo. Abaixo está uma breve explicação de como cada modelo trabalha:

- **BTO:** por meio deste modelo são calculados os parâmetros primários do cabo. Dos parâmetros primários derivamos a impedância em série e admitância em paralelo. Posteriormente calculamos a constante de propagação e impedância característica;
- **TNO/EAB:** por meio deste modelo são calculados a impedância em série e admitância em paralelo. Posteriormente derivamos a constante de propagação e impedância característica;
- **KHM:** este modelo é mais direto que os outros dois citados e calcula diretamente a constante de propagação e impedância característica do cabo. Os parâmetros primários podem ser estimados a partir deles.

3.2 Equações Paramétricas

3.2.1 Modelo de Cabo BT0

O modelo BTO é focado na modelagem dos parâmetros primários (RLGC) do cabo, da seguinte forma:

$$R(f) = \sqrt[4]{R_{oc}^4 + a_c \cdot f^2} \quad (3.1)$$

$$L(f) = \frac{L_0 + L_\infty \cdot \left(\frac{f}{f_m}\right)^{N_b}}{1 + \left(\frac{f}{f_m}\right)^{N_b}} \quad (3.2)$$

$$G(f) = g_0 \cdot f^{N_{ge}} \quad (3.3)$$

$$C(f) = C_\infty + \frac{C_0}{f^{N_{ce}}} \quad (3.4)$$

Onde R_{oc} é a resistência DC do condutor, a_c é o parâmetro que controla o fator de atenuação \sqrt{f} proveniente do efeito pelicular, L_0 é a indutância para baixas frequências, L_∞ é a indutância para altas frequências, f_m e N_b são parâmetros que controlam a transição da indutância de baixas frequências para altas frequências, C_0 é a capacitância para baixas frequências, C_∞ é a capacitância para altas frequências, N_{ce} é o parâmetro que controla o ajuste da curva da capacitância, g_0 controla a magnitude e N_{ge} controla o decline

na curva das perdas do dielétrico. Dessas quatro funções podemos derivar a função de impedância em série e a função de admitância em paralelo respectivamente por: (2.1) e (2.2). Posteriormente, o cálculo da constante de propagação e da impedância característica pode ser realizado da mesma forma que em (2.4) e (2.3), respectivamente.

3.2.2 Modelo de Cabo TNO/EAB

O modelo TNO/EAB calcula a impedância em série e a admitância em paralelo, da seguinte forma:

$$Z(f) = j2\pi f L_{s\infty} + R_{s0} \left(1 - q_s \cdot q_x + \sqrt{q_s^2 \cdot q_x^2 + 2 \frac{j2\pi f}{\omega_s} \cdot \left(\frac{q_s^2 + \frac{j2\pi f}{\omega_s} \cdot q_y}{q_x + \frac{j2\pi f}{\omega_s} \cdot q_y} \right)} \right) \quad (3.5)$$

$$Y(f) = j2\pi f C_{p0} \cdot (1 - q_c) \cdot \left(1 + \frac{j2\pi f}{\omega_d} \right)^{\frac{-2\phi}{\pi}} + j2\pi f C_{p0} \cdot q_c \quad (3.6)$$

Onde

$$L_{s\infty} = \frac{1}{\eta V F \cdot c_0} \cdot Z_{0\infty}$$

$$C_{p0} = \frac{1}{\eta V F \cdot c_0} \cdot \frac{1}{Z_{0\infty}}$$

$$q_s = \frac{1}{q_H^2 \cdot q_L}$$

$$w_s = q_H^2 \cdot \omega_{s0} = q_H^2 \cdot \left(\frac{4\pi R_{s0}}{\mu_0} \right)$$

$$w_d = 2\pi f_d$$

Sendo $Z_{0\infty}$ o valor assintótico da impedância característica para altas frequências, R_{s0} a resistência DC do condutor, $L_{s\infty}$ a indutância para altas frequências, C_{p0} a capacitância para baixas frequências, ω_s a frequência angular a partir de onde o efeito pelicular é dominante na resistência em série, ϕ o ângulo de perda dielétrica, ω_d a frequência angular a partir de onde a perda dielétrica é manifestada, n_{VF} o fator de velocidade, q_H um parâmetro de correção empírico que afeta a resistência em série nas altas frequências, q_L um parâmetro de correção empírico que afeta a indutância em série nas baixas frequências, q_x e q_y dois parâmetros empíricos de ajuste fino, c_0 a velocidade da luz dada por 300×10^6 m/s, μ_0 a permeabilidade magnética no espaço livre dada por $4\pi \times 10^{-7}$ H/m e q_c um parâmetro de escalamento.

Com a impedância em série e a admitância em paralelo calculadas, podemos derivar a constante de propagação e a impedância característica, respectivamente pelas equações (2.4) e (2.3).

3.2.3 Modelo de Cabo KHM

O modelo KHM é um modelo de linha de transmissão que tem como objetivo calcular diretamente a constante de propagação e impedância característica, esses dois parâmetros são calculados respectivamente por:

$$\gamma(f) = \alpha(f) + \beta(f) \quad (3.7)$$

$$Z_0(f) = \Re\{Z_0(f)\} + j\Im\{Z_0(f)\} \quad (3.8)$$

Tal que

$$\begin{aligned} \alpha(f) &= k_1\sqrt{f} + k_2f \\ \beta(f) &= k_1\sqrt{f} - k_2\frac{2}{\pi}f \ln f + k_3f \\ \Re\{Z_0(f)\} &= h_1 + h_2\frac{1}{\sqrt{f}} \\ \Im\{Z_0(f)\} &= -h_2\frac{1}{\sqrt{f}} \end{aligned}$$

Onde k_1 é um parâmetro empírico que escala a atenuação da resistência em série proveniente do efeito pelicular, k_2 é um parâmetro empírico que escala a atenuação da condutância em paralelo proveniente das perdas do material dielétrico, k_3 é um parâmetro empírico usado para impor causalidade que está relacionado a fase linear do canal, h_1 e h_2 são dois parâmetros empíricos que escalam o termo constante e o termo $\frac{1}{\sqrt{f}}$ da impedância característica, respectivamente

Os parâmetros primários podem ser derivados por (2.6), (2.7), (2.8) e (2.9).

4 METODOLOGIA

4.1 Desenvolvimento do Software

Com base no que foi apresentado anteriormente, foi projetado um software, capaz de caracterizar o comportamento de cada função dos cabos a partir dos seus parâmetros físicos.

O software desenvolvido tem a meta de gerar com base nos parâmetros físicos:

- Os parâmetros RLGC do cabo;
- A constante de propagação e a impedância característica do cabo;
- A função de transferência do cabo.
- A função de transferência de uma topologia mais complexa, com múltiplos cabos, *bridged taps*, etc.

4.2 Repositório do Software

O software desenvolvido tem seu código-fonte disponibilizado no seguinte repositório do GitHub (plataforma de hospedagem de código-fonte e arquivos com controle de versão utilizando o Git [projeto utilizado amplamente para controle de versão de softwares]): https://github.com/MoysesLica/GPLCS_ELECTRON.

O mesmo é disponibilizado como código-fonte aberto seguindo as diretrizes GPL (*General Public License*, Licença Pública Geral).

4.3 Visão Geral da Arquitetura do Software

O software foi feito através da linguagem de programação JavaScript, uma das linguagens de *scripting* mais usadas em desenvolvimento web.

Com o advento do *Node.js* a linguagem JavaScript pôde sair apenas do domínio web e ser usada em quase todos os ambientes. *Node.js* não é uma linguagem de programação, nem mesmo um *framework*, é uma plataforma que permite que aplicações sejam escritas em JavaScript e depois compiladas para uma VM (*Virtual Machine*, em português, máquina virtual) especial feita especificamente para executar aplicações JavaScript.

Utilizando-se a plataforma *Node.js*, o *framework* Electron permite a escrita de aplicativos usando-se JavaScript, HTML e CSS, tais aplicativos feitos por esse *framework* tem a vantagem de serem multiplataforma, podendo ser executados nos maiores e mais conhecidos sistemas operacionais usados no mercado.

4.4 Uso de SGBD

Para o salvamento de informações no sistema, em principal as informações de cabo, é usado um sistema gerenciador de banco de dados (SGBD). O SGBD escolhido foi o SQLite3. O mesmo é uma biblioteca JavaScript. O SQLite3 lê e escreve diretamente em um arquivo no disco rígido da máquina o qual o está executando.

A escolha do SGBD se deu pela praticidade do mesmo, o SQLite3 é indicado para aplicações *desktop*, de baixo número de requisições de usuários e ele ainda usa a *Structured Query Language* (SQL, Linguagem de Consulta Estruturada em português) para se criar

as tabelas do banco e realizar as principais consultas presentes nos SGBDs mais usados (SELECT, UPDATE, DELETE, INNER JOIN, CREATE TABLE, entre outros).

4.5 Bibliotecas Utilizadas

Várias bibliotecas foram utilizadas durante o desenvolvimento do software. Uma delas é a SQLite3, descrita na seção anterior, que já é um SGBD por si só. Outras três bibliotecas importantes foram: JQuery, Math.js e CanvasJS. Abaixo há uma breve explicação acerca de cada uma:

JQuery é uma biblioteca pequena e rápida JavaScript. Ela facilita a manipulação de elementos HTML, eventos, animações e AJAX (Asynchronous Javascript and XML, em português, Javascript Assíncrono e XML) permitindo o desenvolvimento de forma muito mais prática, com menos código e de melhor qualidade.

Math.js é uma extensa biblioteca desenvolvida para JavaScript e Node.js. Tal biblioteca permite a leitura de strings simbólicas (como feito no software MatLab) para realizar estimativas numéricas, computar funções e constantes diversas usadas nas áreas de matemática e computação aplicada, calcular soluções diferenciais de problemas, além da funcionalidade mais utilizada nesse trabalho que é o suporte ao cálculo de funções com números complexos. Isso evita a implementação de muitas linhas de código para realizar a computação de expressões que utilizam tais números.

CanvasJS é uma biblioteca para geração de gráficos, utiliza-se principalmente da tecnologia advinda da implementação canvas do próprio HTML. Os gráficos gerados por essa bibliotecas são desenhados como se fossem imagens (com a possibilidade de se adicionar algumas iterações e animações com a imagem) e tem suporte para os mais diversos tipos de gráficos. Os gráficos mais utilizados no software são os de linha normal para demonstrar as curvas da variação dos parâmetros calculados em relação a frequência.

4.6 Estrutura do Software

4.6.1 Estrutura do software

Para facilitar o uso do software, o mesmo é dividido em 3 abas principais, *Home*, *Cable Analyzer* e *Topology Analyzer*, cada uma sendo descrita abaixo:

- Home: tela inicial do software, onde encontra-se algumas informações sobre o programa e uma rápida descrição dos dois principais módulos;
- Cable Analyzer: tela onde é possível inserir os parâmetros dos cabos e assim gerar as principais gráficos dos mesmos;
- Topology Analyzer: tela onde é possível selecionar uma topologia predefinida, personalizar os cabos usados e assim verificar o comportamento de uma rede mais complexa.

4.6.2 Fluxo de Geração das Curvas de um Cabo

A forma correta de utilizar a aba *Cable Analyzer* é descrita abaixo:

1. Selecione um modelo de cabo para se trabalhar (essencial, pois os parâmetros informados são diferentes de modelo para modelo);
2. Selecione um cabo para se trabalhar ou deixe selecionado *Custom* para poder inserir você mesmo os parâmetros do cabo que você deseja trabalhar;
3. Altere caso queira o tamanho do cabo que se está trabalhando;

4. Altere caso queira a frequência que você deseja trabalhar;
5. Altere caso queira a escala de exibição do gráfico, a opção *Linear* renderizará o mesmo em escala linear, enquanto, a opção *Logarithmic* renderizará o gráfico em escala logarítmica;
6. Selecione a função que você deseja visualizar, as opções disponíveis são (até a escrita deste trabalho): *Propagation Constant*, *Characteristic Impedance*, *Transfer Function* e *Primary Parameters*;
7. Clique no botão calcular para visualizar a função selecionada utilizando-se os parâmetros do cabo informados.

Na sequência, é mostrado um diagrama de atividade representando o fluxo descrito acima:

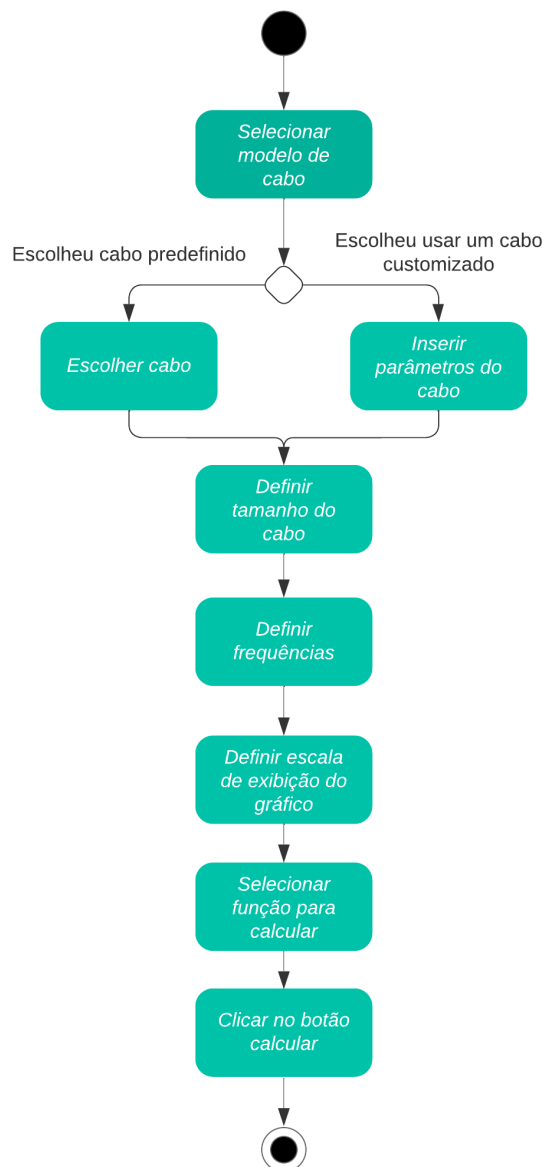


Figura 4.1 – Diagrama de atividade para geração de curvas de um cabo.

4.6.3 Fluxo de Geração da Função de Transferência de uma Topologia Complexa

A forma correta de utilizar a aba *Topology Analyzer* é descrita abaixo:

1. Selecione a topologia que você deseja trabalhar;
2. Selecione os cabos de cada segmento da topologia que você escolheu;
3. Verifique os tamanhos de cada segmento da topologia, você pode alterá-los como quiser;
4. Altere caso queira a faixa de frequências que você deseja trabalhar;
5. Altere caso queira a impedância de fonte e a impedância de carga;
6. Clique no botão calcular para visualizar a função de transferência da topologia utilizando-se os dados informados por você anteriormente.

Na sequência, é mostrado um diagrama de atividade representando o fluxo descrito acima:

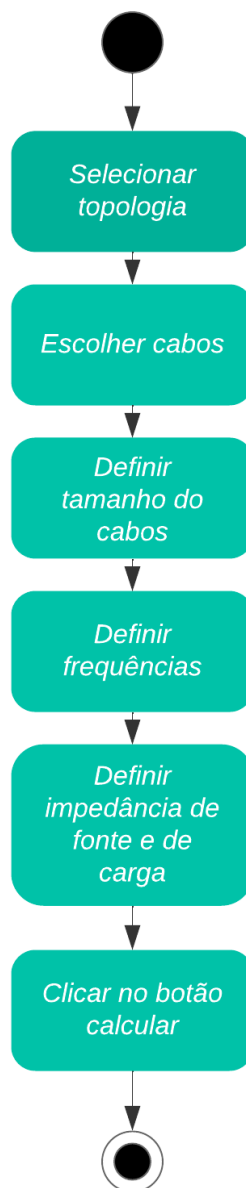


Figura 4.2 – Diagrama de atividade para geração da função de transferência de uma topologia.

4.7 Cabos Predefinidos

Na execução padrão do software (sem alterações por terceiros), alguns cabos previamente cadastrados são exibidos tanto na aba *Cable Analyzer* quanto na aba *Topology Analyzer*. Abaixo está a descrição de cada um:

- CAT5: Cabo Categoria 5 típico usado em cabeamento estruturado de redes de computadores, tal como *Ethernet*. Linha de alta qualidade contendo quatro pares de fios trançados. Este tipo de cabo é comumente empregado para interconectar equipamentos *Ethernet* de 1 Gb/s junto as impedâncias de carga e de fonte de 100 ohm, respectivamente. Especificado na norma *ISO/IEC 11801*.
- CAD55 - *Cable Aerial Drop-wire Nº55* (também chamado de B05a nos modelos BT0 e KHM): Cabo de cobre típico da rede de acesso do Reino Unido. Linha com 2 ou 4 pares de fios de cobre de 0,5 mm isolados por polietileno usado pela *British Telecom* em instalações aéreas. O CAD55 é usado na conexão entre o último ponto de distribuição óptico e o equipamento do usuário.
- T05u: Cabo KPN, uma linha usada na rede de acesso da Holanda. Cabo metálico com múltiplos pares de fios trançados em *quads* (cada *quad* contém dois ou quatro fios) e blindagem comum. Usado na rede Holandesa em instalações subterrâneas para oferecer serviço de telefonia. Cada fio metálico possui 0,5 mm e é isolado por polietileno.
- T05b: Cabo de múltiplos *quads* usado em cabeamento predial. Linha telefônica de média qualidade contendo 30 *quads* trançados (60 pares de fios) usada na Holanda. O cabo é blindado e cada fio contém 0,5 mm.
- T05h: Cabo de baixa qualidade usado em instalações telefônicas residenciais. Linha contendo dois pares de fios de 0,5 mm não trançados (paralelos) encontrados facilmente no mercado.
- J-H(ST)H Bd 10x2x0.6: Cabo usado por muitos anos na rede de telefonia da Alemanha. Linha de qualidade média de 100 ohm contendo 10 pares de fios metálicos de 0,6 mm agrupados em *quads*. Tipicamente usado em cabeamento residencial e instalações subterrâneas Alemãs.
- I-O2YS(ST)H 10x2x0.5: Cabo usado na rede de telefonia da Alemanha. Linha de qualidade alta de 135 ohm contendo 10 pares de fios metálicos de 0,5 mm agrupados em *quads*. Tipicamente usado em cabeamento residencial e instalações subterrâneas Alemãs.
- PE4D-ALT: Cabo usado na rede de acesso da Suíça desde o começo dos anos 1990. É composto por 10 *quads* contendo fios de cobre de 0,6 mm isolados por polietileno e cobertos por uma manda de alumínio. O cabo é construído de forma que existem duas camadas, uma interna contendo 2 *quads* e uma externa contendo 8 *quads*. A impedância característica da linha é 135 ohm e ela é considerada de alta qualidade.
- P-Pb: Cabo usado na Europa até o começo dos anos 1990. É composto por 10 *quads* de fios de cobre contendo 0,6 mm. O cabo é construído de forma que existem 2 *quads* internos e 8 *quads* externos. O isolamento é feito por papel.
- TP100: Cabo contendo múltiplos fios condutores de cobre de 0,5 mm isolados por polietileno. É predominantemente usado em instalações subterrâneas e bastante encontrado em redes de acesso Americanas e Europeias.
- 24AWG: Cabo contendo 25 pares de fios condutores trançados de 0,51 mm, comumente encontrado em redes de acesso Americanas e Europeias.
- 26AWG: Cabo de par-trançado contendo fios de cobre de 0,4mm, comumente encontrado em redes de acesso Americanas e Europeias.

Os parâmetros das próximas seções foram retirados de: [4], [7], [17], [18], [19], [20], além, de alguns parâmetros serem obtidos por testes práticos e fornecidos pelo Prof. Dr. Diogo Acatauassu.

Vale salientar que a diferença nos parâmetros dos cabos se deve as características construtivas como a geometria e os materiais utilizados para confecção do mesmo.

4.7.1 Parâmetros dos Cabos para o Modelo BT0

Abaixo está uma tabela com os parâmetros de alguns cabos citados anteriormente para o modelo BT0:

	CAD55	TP100	24AWG	26AWG	I-O2YS(ST)H	JH(ST)H
R_{oc}	187.0831	179.0	174.559	286.17578	20.16991764	160.16183
a_c	0.0457	35.89e-3	0.05307	0.14769620	4.294697418e-2	0.03329
L_0	6.5553e-004	0.695e-3	617.295e-6	675.36888e-6	9.08779665e-4	9.067942863e-4
L_∞	5.0973e-4	585e-6	478.971e-6	488.95186e-6	5.998736085e-4	5.342191844e-4
f_m	8.1241e5	1e6	553760.3	806338.63	91895.48079	91895.48079
N_b	1.0142	1.2	1.15298	0.92930728	7139316783e-1	0.7218331678
g_0	1.0486e-10	0.5e-9	0.234875e-12	43e-9	4.342153972e-12	23.7312e-12
N_{ge}	1.1500	1.033	1.38	0.70	1.105448975	1.151833774
C_∞	4.5578e-8	55e-9	50e-9	49e-9	3.237852447e-8	4.6143e-08
C_0	-6.9514e-11	1e-9	0	0	7.760581191e-8	7.760763018e-8
N_{ce}	-0.1500	0.1	0	0	0.5674612531	0.5463017537

Tabela 4.1 – Parâmetros de cabos para o modelo BT0

4.7.2 Parâmetros dos Cabos para o Modelo KHM

Abaixo está uma tabela com os parâmetros de alguns cabos citados anteriormente para o modelo KHM:

	CAT5	B05a(CAD55)	T05b	T05h	T05u
k1	1.97311e-3	0.001673341445328	1.70454e-3	2.48426e-3	1.78466e-3
k2	1.24206e-8	1.353696217013869e-7	4.98183e-11	4.65719e-8	2.51367e-8
k3	3.03005e-5	3.131898531199303e-5	3.10070e-5	3.07543e-5	2.87051e-5
h1	98.5944	1.066383411430814e2	132.3825	100.3102	127.0785
h2	6.0876e3	5.560058806660871e3	6.9128e3	6.9374e3	6.9114e3

Tabela 4.2 – Parâmetros de cabos para o modelo KHM

4.7.3 Parâmetros dos Cabos para o Modelo TNO/EAB

Abaixo estão duas tabelas com os parâmetros de alguns cabos citados anteriormente para o modelo TNO/EAB:

	CAT5	CAD55	T05u	T05b	T05h
$Z_{0\infty}$	98.0	105.0694	125.636455	132.348256	98.369783
n_{VF}	0.690464	0.6976	0.729623	0.675449	0.681182
R_{s0}	0.1659	187.1e-3	180.0e-3	170.5e-3	170.8e-3
q_l	2.15	1.5315	1.666050	1.789725	1.7
q_h	0.859450	0.7415	0.74	0.725776	0.65
q_x	0.5	1	0.848761	0.799306	0.777307
q_y	0.722636	0	1.207166	1.030832	1.5
q_c	0	1.0016	0	0	0
ϕ	0.00097385	-0.2356	1.762056e-3	0.005222e-3	3.02393e-3
f_d	1	1	1	1	1

Tabela 4.3 – Parâmetros de cabos para o modelo TNO/EAB

	J-H(ST)H	I-O2YS(ST)H	PE4D-ALT	P-Pb	TP100
$Z_{0\infty}$	110.8	134.2196	130	130	97.561
n_{VF}	0.6810	0.7489	0.735	0.735	0.73193
R_{s0}	0.1901	0.2145	0.125	0.125	0.17876
q_l	9.17386	2.160729447	2.5	1.5	1.2692
q_h	0.60105	0.7415	0.75	0.75	0.78886
q_x	1	1	1	2	0.87734
q_y	0	0	0	0	-0.24741
q_c	1.0016	1.0016	0	0	1.1678
ϕ	0.05076227074	-0.03191108824	0.0071	0.013	-0.015866
f_d	1	1	1	1	2.5353

Tabela 4.4 – Continuação dos parâmetros de cabos para o modelo TNO/EAB

4.8 Topologias Predefinidas

Assim como os cabos predefinidos, no módulo *Topology Analyzer* estão algumas topologias pré-cadastradas, tais topologias podem ser encontradas no documento ITU-T G.9701, disponibilizado pela ITU-T com referência para implementação de redes G.fast [7], abaixo estão as topologias pré-cadastradas no software, onde DP significa *distribution point* e *Term* significa terminal.

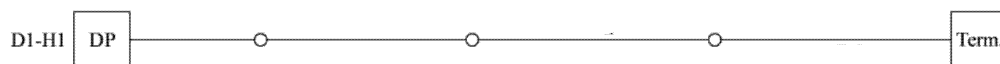


Figura 4.3 – Topologia D1-H1, topologia com 4 segmentos de cabos interconectados.

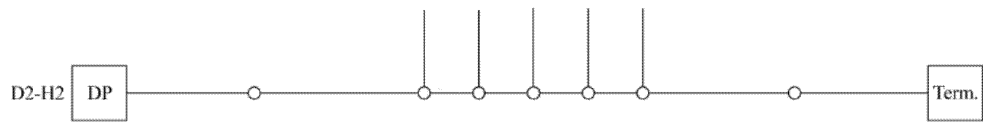


Figura 4.4 – Topologia D2-H2, topologia com 8 segmentos de cabos interconectados e 5 *bridged taps*.



Figura 4.5 – Topologia D3-H5, topologia com 3 segmentos de cabos interconectados.

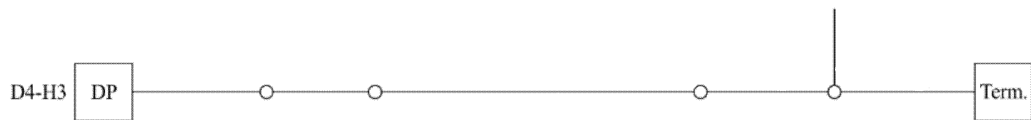


Figura 4.6 – Topologia D4-H3, topologia com 5 segmentos de cabos interconectados e 1 *bridged tap*.

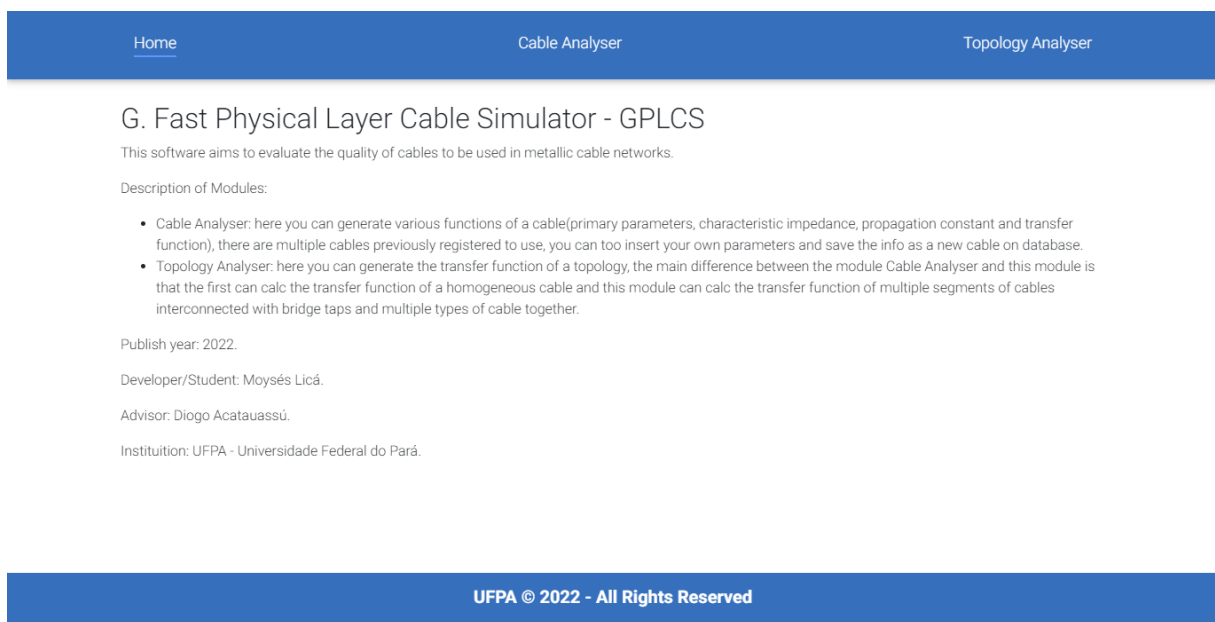
5 RESULTADOS

Neste capítulo serão mostrados os resultados alcançados pelo trabalho, desde imagens da interface do software até as curvas das funções geradas pelo mesmo.

5.1 Aba Home

Abaixo está uma imagem da tela inicial do software:

Figura 5.1 – Tela Inicial do Software, nela tem uma breve descrição sobre o software.



5.2 Aba Cable Analyzer

Abaixo estão duas imagens referentes a tela do módulo *Cable Analyzer*. Na figura 5.2, podemos ver uma descrição rápida do módulo, bem como a caixa de seleção do modelo usado para realização dos cálculos, a caixa do tipo de cabo sob avaliação e a descrição das características físicas e construtivas da linha.

Figura 5.2 – Módulo Cable Analyzer - Início da Página, nesta imagem tem o campo para selecionar o modelo do cabo, o tipo do cabo e uma descrição do tipo de cabo selecionado.

Home Cable Analyser Topology Analyser

Cable Analyser

In this module you can insert some cable parameters to generate curves, the curves are: Propagation Constant, Characteristic Impedance, Primary Parameters (Resistance, Inductance, Conductance and Capacitance) and Transfer Function.

Below you can insert the parameters of cable to start calculate the curves:

Cable Model:

Cable Used:

Cable Description: Have been used in the past by Deutsche Telekom or its predecessor Deutsche Bundespost as in-house installation cable. J-H(ST)H Bd 10x2x0.6 is a 0.6mm PE quad cable of moderate but predictable quality. It is composed of five quads that build a 10-pair cable. This is typically used for in house wiring and has an impedance of aproximatly 110 Ohms. It is a quad-structured cable. This cable is used in Germany as an underground telephone cable, but also for in-building wiring.

R_{oc} a_c L_0 L_{∞}

UFPA © 2022 - All Rights Reserved

Na figura 5.3, temos as caixas de texto onde são inseridos os valores dos parâmetros (neste exemplo, são mostrados os campos de parâmetros referentes ao modelo BT0). Além dos valores de parâmetros, também é possível inserir o comprimento da linha usada, escolher a faixa de frequência (que também pode ser customizada), a função que será calculada e a escala de exibição do gráfico (linear ou logarítmica).

Figura 5.3 – Módulo Cable Analyzer - Final da Página, nesta imagem temos os campos referentes aos parâmetros do modelo de cabo selecionado, bem como os campos de faixa de frequência, tamanho do cabo, função a calcular e escala de geração do gráfico.

is about 135 Ohm. A high quality 0.5mm PE quad cable composed of five quads that build a 10-pair cable. This cable is used in Germany as an underground telephone cable, but also for in-building wiring.

R_{oc} a_c L_0 L_{∞}

f_m N_b g_0 N_{ge}

C_{inf} C_0 N_{ce}

Cable Length: Frequency:

Function to Calculate: Plot Scale:

CALCULATE

UFPA © 2022 - All Rights Reserved

5.3 Aba Topology Analyzer

Abaixo estão duas imagens referentes ao módulo *Topology Analyzer*. Na figura 5.4, temos uma descrição rápida do módulo, a caixa de seleção da topologia e uma imagem ilustrativa da topologia.

Figura 5.4 – Módulo Topology Analyzer - Início da Página, nesta imagem temos o campo para selecionar a topologia desejada para se calcular e uma imagem da topologia selecionada.

Home Cable Analyser Topology Analyser

Topology Analyser

In this module you can choose one topology(presents in ITU-T G.9701), after choosing the topology you can calculate the transfer function of the system.

Topology:

D4-H3 **DP** ———— **Term.**

Cabo Primeiro Segmento:	Cabo Segundo Segmento:	Cabo Terceiro Segmento:
<input type="text" value="I-O2YS(ST)H 10x2x0.5 (BT0)"/>	<input type="text" value="I-O2YS(ST)H 10x2x0.5 (BT0)"/>	<input type="text" value="I-O2YS(ST)H 10x2x0.5 (BT0)"/>
Tamanho Primeiro Segmento:	Tamanho Segundo Segmento:	Tamanho Terceiro Segmento:
<input type="text" value="0.6"/>	<input type="text" value="3.0"/>	<input type="text" value="70.0"/>

UFPA © 2022 - All Rights Reserved

Na figura 5.5, vemos os campos de seleção de cada segmento da topologia, os campos para inserção dos comprimentos de cada segmento, os campos onde são informadas as frequências de início, fim e espaçamento entre as portadoras DMT (necessárias para geração da função de transferência), e por fim as impedâncias de fonte e de carga usadas na topologia.

Figura 5.5 – Módulo Topology Analyzer - Final da Página, nesta imagem temos os campos referentes a cada segmento de cabo da topologia selecionada, tanto o tipo de cabo do segmento quanto seu tamanho, também temos os campos referentes a faixa de frequência, além, da impedância de carga e de fonte.

The diagram shows a cable topology starting with a source labeled 'D4-H3 DP' and ending with a load labeled 'Term.'. The cable is divided into five segments by four nodes. Below the diagram are configuration fields for each segment and global parameters.

Segment	Cable Type	Length
Cabo Primeiro Segmento:	I-O2YS(ST)H 10x2x0.5 (BT0)	0.6
Cabo Segundo Segmento:	I-O2YS(ST)H 10x2x0.5 (BT0)	3.0
Cabo Terceiro Segmento:	I-O2YS(ST)H 10x2x0.5 (BT0)	70.0
Cabo Quarto Segmento:	I-O2YS(ST)H 10x2x0.5 (BT0)	10.0
Cabo Primeira Bridge Tap:	I-O2YS(ST)H 10x2x0.5 (BT0)	5.0
Cabo Quinto Segmento:	I-O2YS(ST)H 10x2x0.5 (BT0)	10.0

Parameter	Value
Minimum Frequency:	2.2e6
Frequency Space:	25e3
Maximum Frequency:	106e6
Source Impedance:	100
Load Impedance:	100

CALCULATE

UFPA © 2022 - All Rights Reserved

5.4 Resultados Alcançados

Abaixo estão algumas imagens dos resultados alcançados, no software, foram validados todos os resultados para condizerem com os documentos [4], [7], [17], [18], [19], [20], a validação foi feita em conjunto com o Prof. Dr. Diogo Acatauassu.

5.4.1 Parâmetros Primários

No módulo *Cable Analyzer*, ao se selecionar um modelo, um cabo e a opção *Primary Parameters* em *Function to Calculate*, são gerados 4 gráficos correspondendo aos parâmetros RLGC. Abaixo estão 4 imagens exemplificando as funções (os 4 gráficos foram gerados selecionando-se o modelo BT0 e cabo TP100):

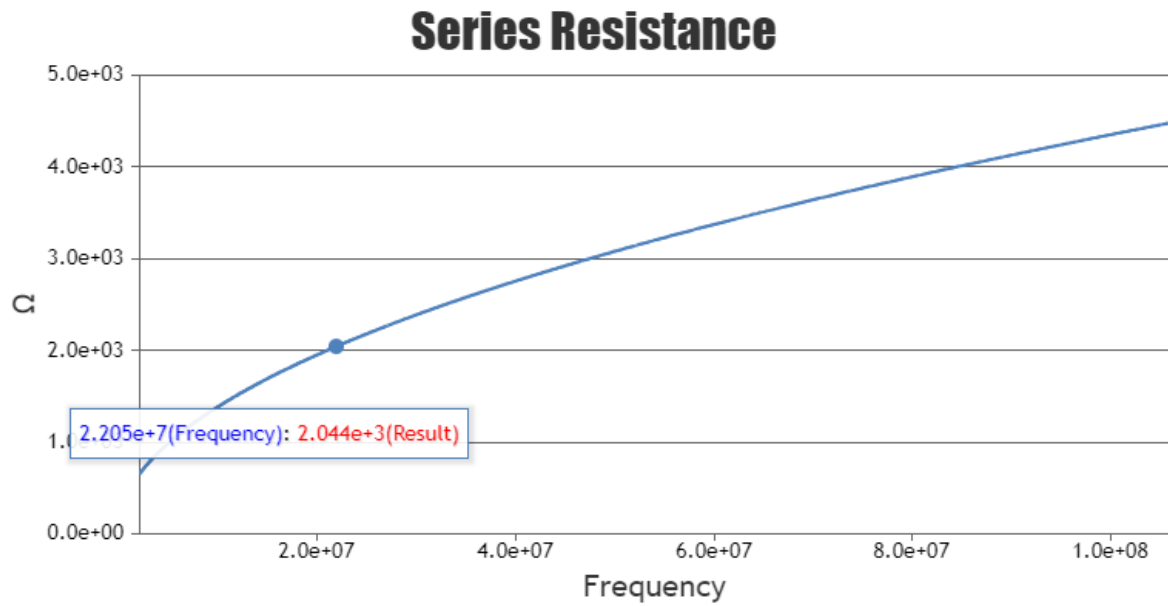


Figura 5.6 – Resistência em Série do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.

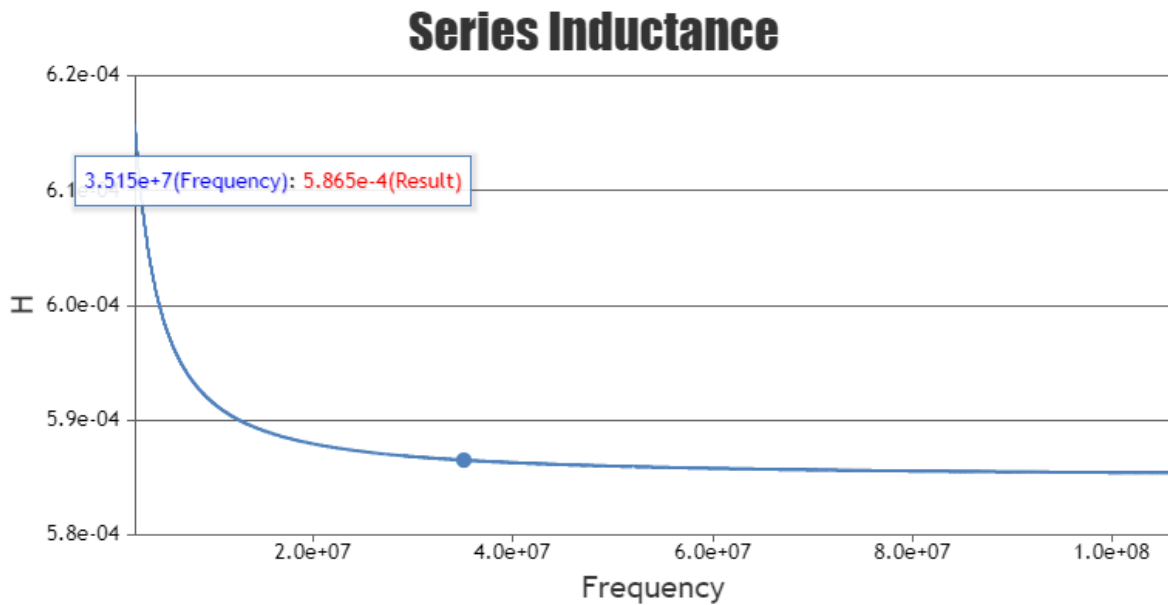


Figura 5.7 – Indutância em Série do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.

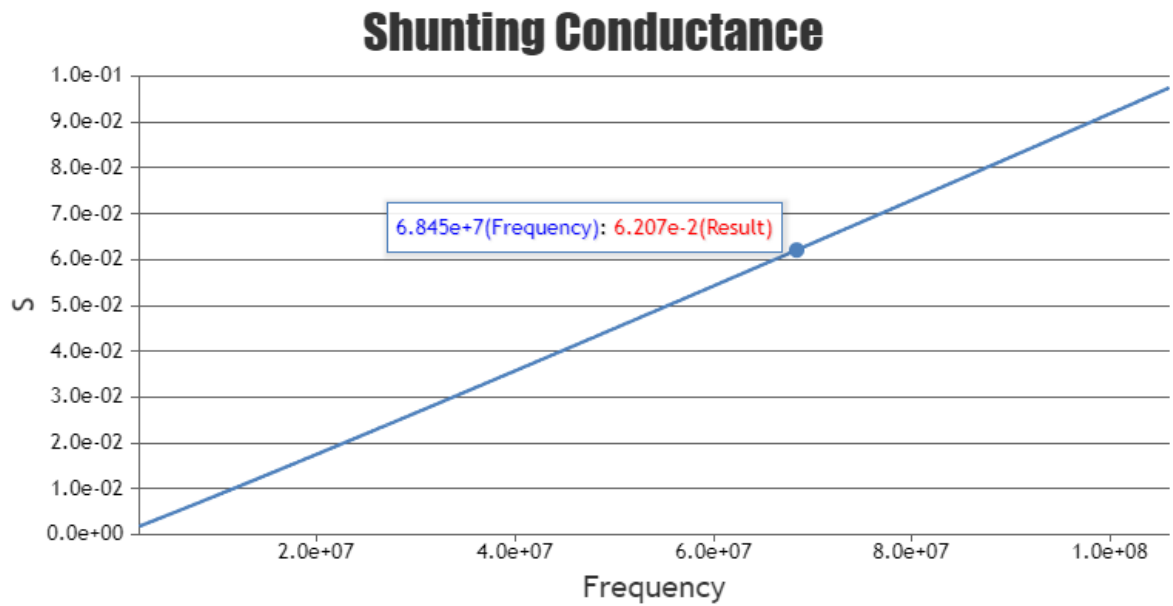


Figura 5.8 – Condutância em Paralelo do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.

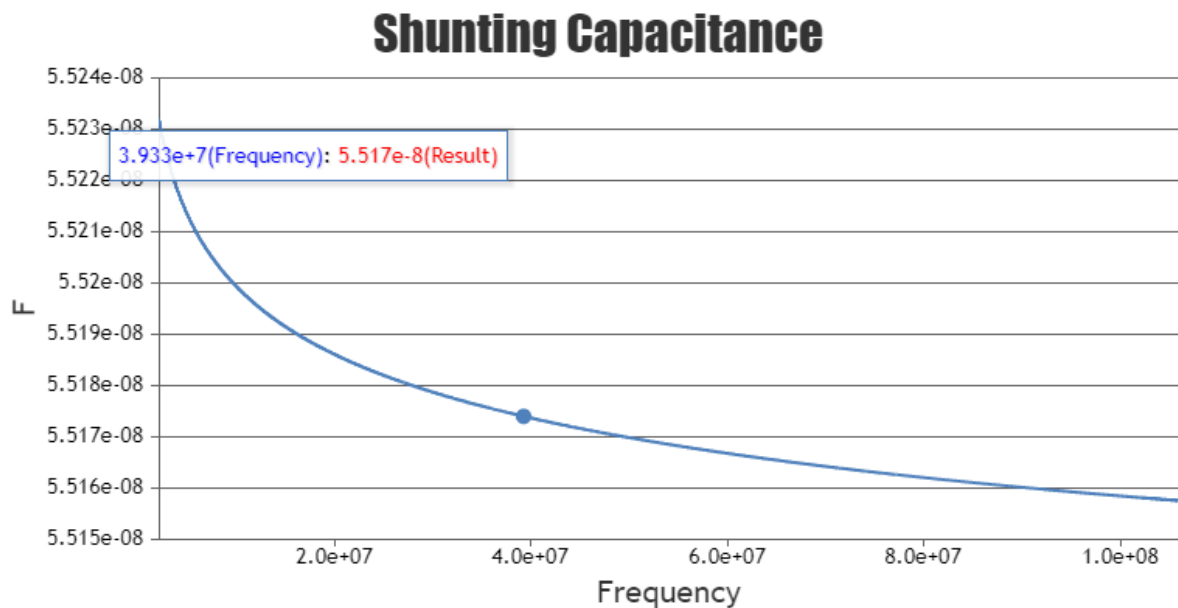


Figura 5.9 – Capacitância em Paralelo do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.

5.4.2 Constante de Propagação

No módulo *Cable Analyzer*, ao se selecionar um modelo, um cabo e a opção *Propagation Constant* em *Function to Calculate*, são gerados 3 gráficos correspondendo a constante de atenuação, a constante de fase e a constante de propagação, respectivamente. Abaixo estão 3 imagens exemplificando as funções (os 3 gráficos foram gerados selecionando-se o modelo BT0 e cabo TP100):

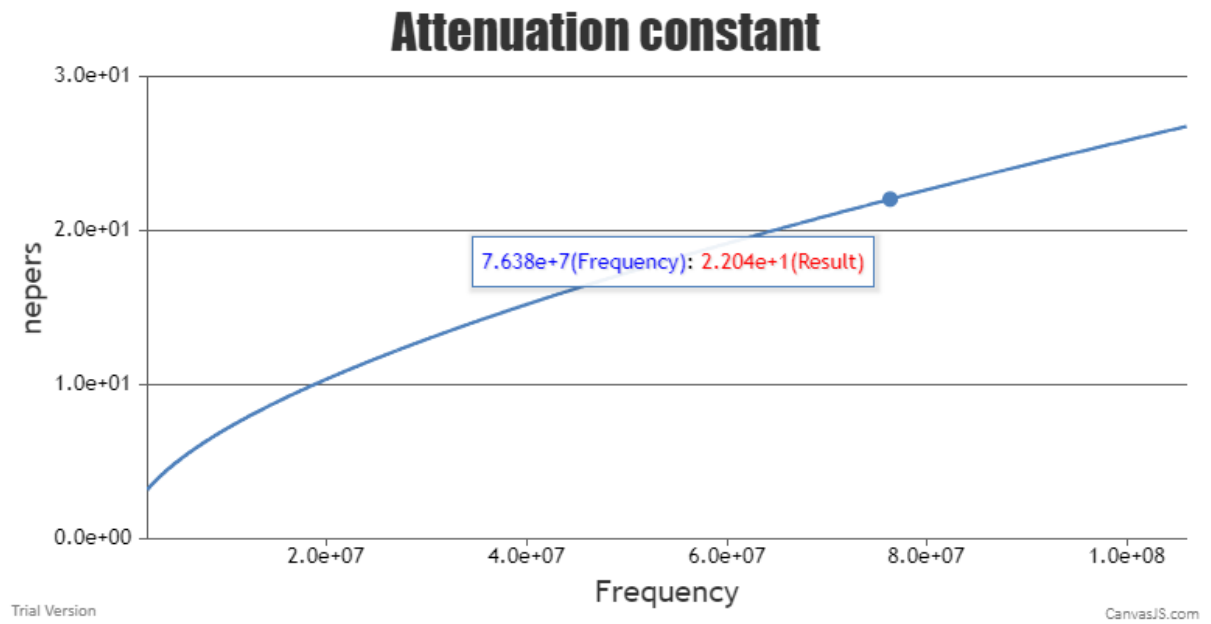


Figura 5.10 – Constante de Atenuação do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.

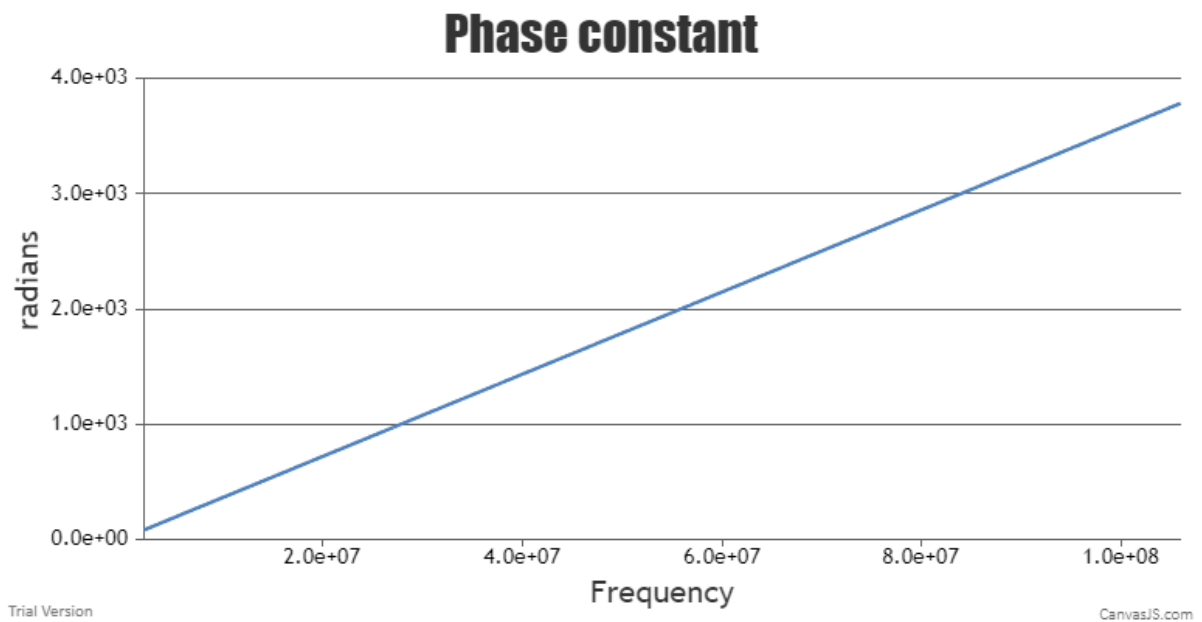


Figura 5.11 – Constante de Fase do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.

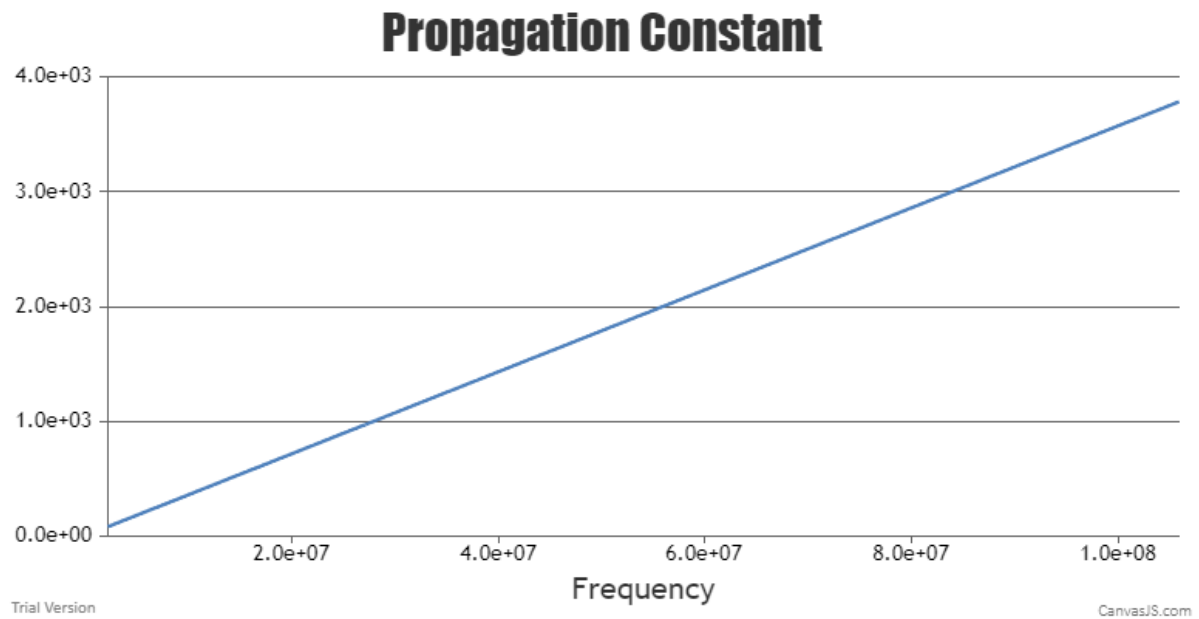


Figura 5.12 – Constante de Propagação do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.

5.4.3 Impedância Característica

No módulo *Cable Analyzer*, ao se selecionar um modelo, um cabo e a opção *Characteristic Impedance* em *Function to Calcule*, é gerado 1 gráfico correspondendo a impedância característica do cabo, abaixo está um gráfico demonstrando a função (o gráfico foi gerado selecionando-se o modelo BT0 e cabo TP100):

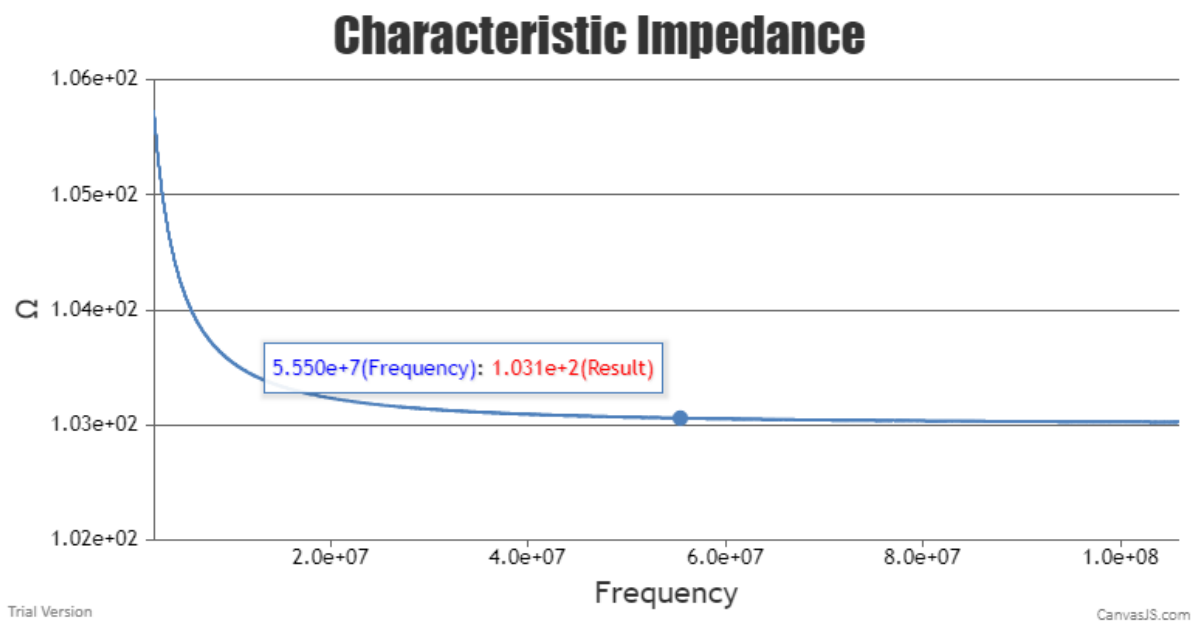


Figura 5.13 – Impedância Característica do cabo TP100 pelo modelo BT0, todos os outros parâmetros foram deixados pelo padrão que o software abre.

5.4.4 Função de Transferência de Cabos

No módulo *Cable Analyzer*, ao se selecionar um modelo, um cabo e a opção *Transfer Function* em *Function to Calculate*, é gerado 1 gráfico correspondendo a função de transferência do cabo. As Figuras 5.14 e 5.15 abaixo correspondem a função de transferência gerada para os cabos TP100 e 26AWG (ambos de 100 metros) respectivamente:

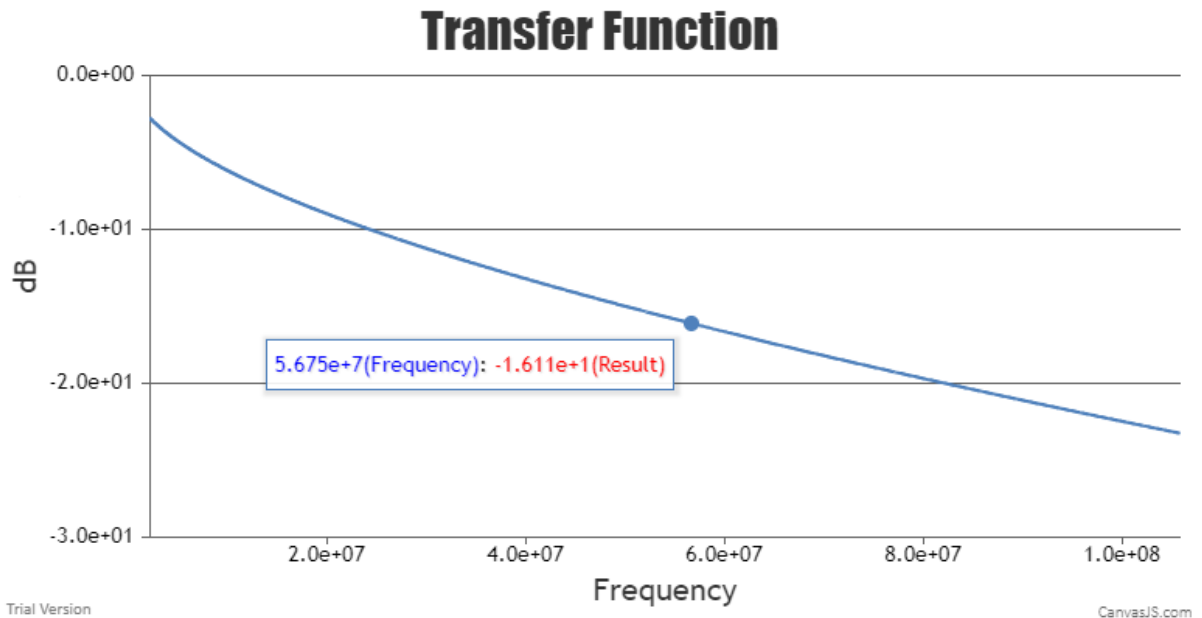


Figura 5.14 – Função de Transferência usando modelo BT0 e cabo TP100 com comprimento de 100 metros

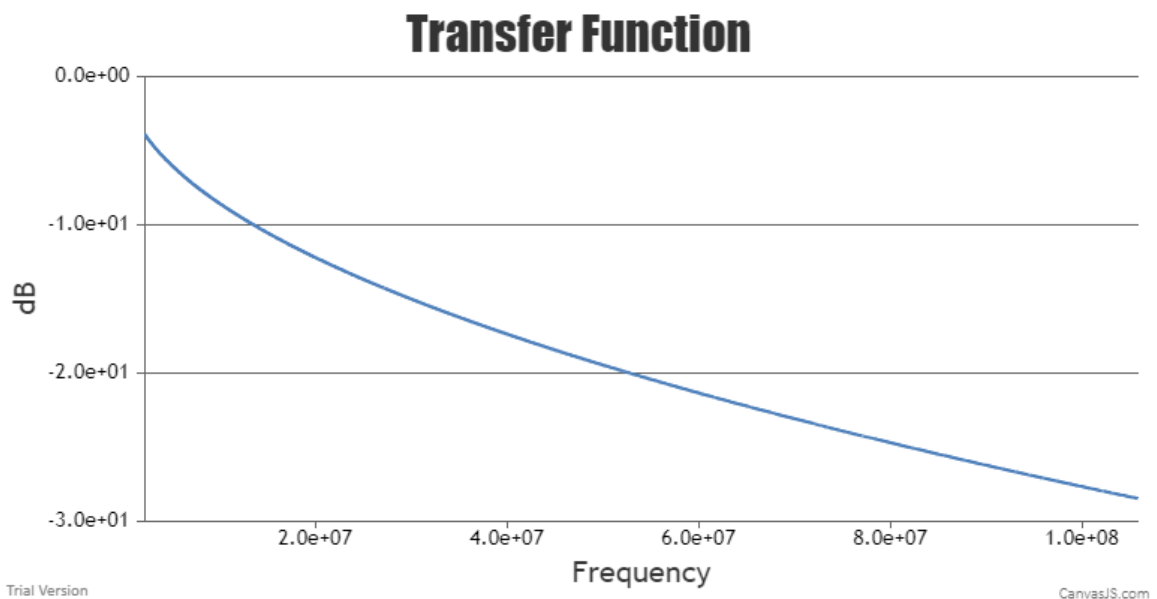


Figura 5.15 – Função de Transferência usando modelo BT0 e cabo 26AWG com comprimento de 100 metros

É possível ver a diferença de qualidade dos cabos, enquanto o cabo TP100 tem atenuações próximas a -20dB nas frequências de 100 MHz o cabo 26AWG tem atenuações próximas a -30dB nas mesmas frequências, realmente aferindo a qualidade superior do cabo TP100 em relação ao cabo 26AWG.

5.4.5 Função de Transferência de Topologias

No módulo *Topology Analyzer*, ao se selecionar uma topologia, definir os cabos que a compõe bem como o comprimento de cada cabo, além das especificações da faixa de frequência e das impedâncias de fonte e carga, é gerado a função de transferência da topologia. Abaixo está um gráfico gerado selecionando-se a topologia "D4-H3", composta por 5 segmentos de cabo mais uma *bridged tap* entre o quarto e quinto segmento. Todos os cabos informados foram "CAD55", os tamanhos foram os tamanhos padrões desta topologia [7] e o cálculo das características elétricas de cada linha foi feito usando o modelo BT0:

Transfer Function

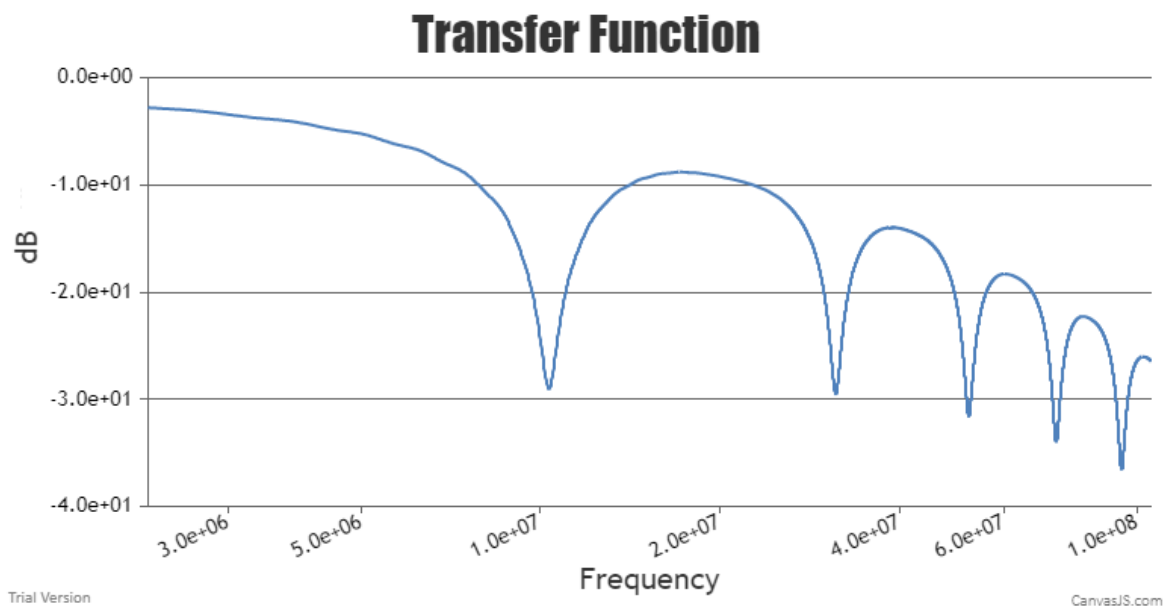


Figura 5.16 – Função de Transferência da Topologia D4-H3

Abaixo está outro gráfico gerado, desta vez utilizando-se a topologia "D1-H1", composta por 4 segmentos de cabo, sem *bridged tap*. Todos os cabos informados foram "CAD55", os tamanhos foram os tamanhos padrões desta topologia [7] e o cálculo das características elétricas de cada linha foi feito usando o modelo BT0:

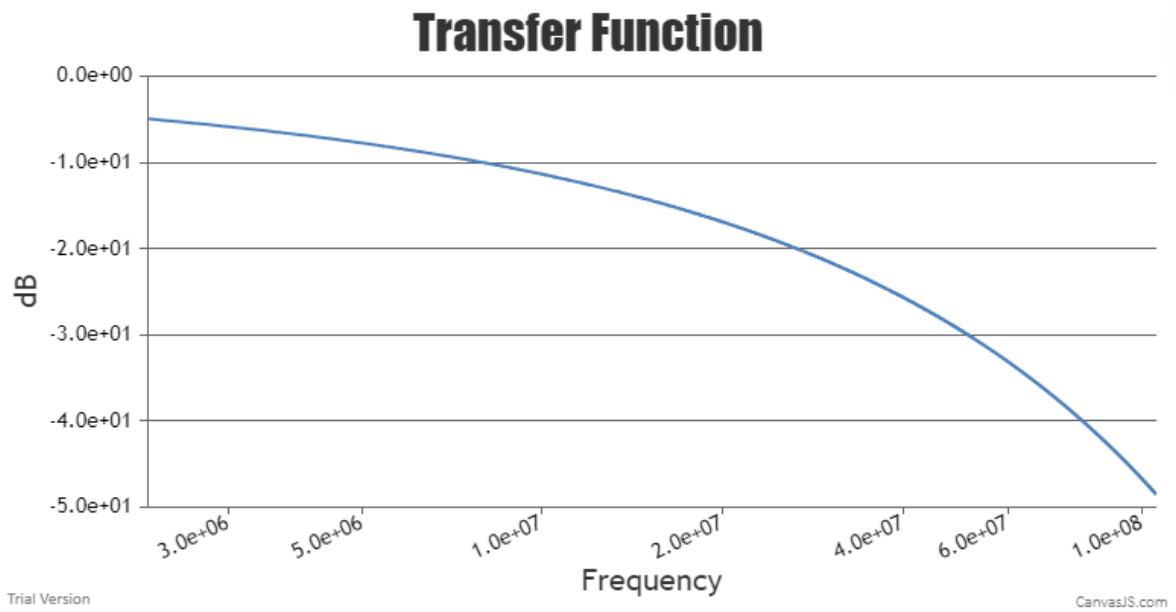


Figura 5.17 – Função de Transferência da Topologia D1-H1

É possível notar a diferença entre os formatos da curvas, isso se dá pela reflexão de sinal da *bridged tap* na topologia "D4-H3", o sinal bate na ponta descascada e volta causando tais ondulações, como pode ser visto o software é capaz de representar esses fenômenos.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta para estimação das características elétricas de cabos metálicos usados em redes G.fast. Foi mostrado ao longo dos capítulos toda a base teórica usada para o desenvolvimento do mesmo, tais fundamentos teóricos foram codificados e suas implementações em código estão disponíveis nos apêndices deste documento. Abaixo estão alguns comentários acerca dos resultados e trabalhos futuros.

6.1 Comentários Acerca dos Resultados

Sobre os resultados alcançados, os mesmos foram satisfatórios, já que os números e gráficos gerados são semelhantes a aqueles obtidos por diversos trabalhos feitos na área de análise e projeto de redes que utilizam enlaces metálicos como vistos nos trabalhos: [4], [7], [17], [18], [19] e [20].

As implementações conseguiram ser simples, altamente reutilizáveis e versáteis. Os cálculos das características elétricas do cabo alterando-se os parâmetros na interface do módulo *Cable Analyzer* sintetizaram bem a ideia do trabalho, que era ser um software para análise da viabilidade de cabos diversos para uso em redes G.fast.

O software descarta a necessidade de revisar uma literatura extensa sobre o assunto para assim ter-se mensurações acerca da qualidade dos cabos, tendo-se os parâmetros dos cabos e inserindo-os nos campos, já é possível visualizar as funções e assim averiguar a qualidade das linhas.

A análise de uma rede complexa, onde há diversos segmentos de cabos e *bridged taps*, utilizando também os parâmetros dos cabos e informando os tamanhos de cada um é outro resultado pensado inicialmente e alcançado com sucesso pelo software.

6.2 Trabalhos Futuros

Sobre os trabalhos futuros pensados para melhoria do software, estão:

- Implementação de redes desenhadas pelo usuário. Para isso, é necessário utilizar de bibliotecas especializadas em desenho geométrico, para permitir desenhar topologias mais próximas das implementações que são feitas em projetos de redes, assim, permitindo a análise de redes cada vez mais complexas;
- Implementação de outras funções para análise de cabos, entre tais implementações destaca-se a função de resposta ao impulso muito importante na análise de transmissão de sinal no domínio do tempo;
- Implementação do módulo de transmissão de sinais G.fast sobre os cabos. Como o software já permite a análise das linhas, é desejável estimar a qualidade de transmissão dos sinais utilizando as mesmas, isso inclui a taxa de dados alcançados para diferentes tipos de modulação e afins.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Bourne, "Fiber to the home: practically a reality,"IEEE International Conference on Communications, - Spanning the Universe., 1988, pp. 890-894 vol.2, doi: 10.1109/ICC.1988.13687.
- [2] P. Odling, T. Magesacher, S. Host, P. O. Borjesson, M. Berg and E. Areizaga, "The fourth generation broadband concept,"in IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 1, pp. 62-69, January 2009, doi: 10.1109/MCOM.2009.4752678.
- [3] V. Oksman et al., "The ITU-T's new G.fast standard brings DSL into the gigabit era,"in IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 3, pp. 118-126, March 2016, doi: 10.1109/MCOM.2016.7432157.
- [4] Acatauassu, Diogo. Modelos Paramétricos Simples e Casuais Para Cabos de Cobre Utilizados em Enlaces Metálicos de Sistemas G.fast. 2014.
- [5] TIA/EIA, TIA/EIA Standard - Comercial Building Telecommunications Cabling Standard, Part 2: Balanced Twisted-Pair Cabling Components, TIA/EIA-568-B.2. 2001.
- [6] C. Sales et al., Line Topology Identification Using Multiobjective Evolutionary Computation. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 59, no. 3, pp. 715-729. 2010. doi: 10.1109/TIM.2009.2025991.
- [7] ITU - Telecommunication Standardization Sector, "Fast access to subscriber terminals (FAST) - Physical layer specification", 2019.
- [8] D. Pozar. Microwave engineering, 4th ed. 2012.
- [9] Acatauassu, Diogo et al. "Simple and Causal Copper Cable Model Suitable for G.fast Frequencies", 2014.
- [10] ITU - Telecommunication Standardization Sector, "G.fast: Wideband modeling of twisted pair cables as two-ports", 2011.
- [11] ADSL, VDSL, and Multicarrier Modulation, 2000.
- [12] ADSL: Standards, Implementation, and Architecture, 1999.
- [13] Metropolitan Area Networks - Concepts, Standards and Services, 1992.
- [14] Learning jQuery - Fourth Edition, 2013.
- [15] jQuery in Action, Third Edition, 2015.
- [16] jQuery Succinctly, 2014.
- [17] D. Acatauassu et al., "KHM cable model parameters for ITU-T G.fast reference loops,"2015 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), 2015, pp. 168-173, doi: 10.1109/CSCN.2015.7390439.
- [18] TR-285, Broadband Copper Cable Models, Issue 1, 2015.

- [19] TR-285, Broadband Copper Cable Models, Issue 1, Amendment 1, 2017.
- [20] Marx Freitas, Aline Ohashi, Diogo Acatauassu, João C. W. A. Costa, Eduardo Medeiros, Miguel Berg, Igor Almeida and André M. Cavalcante, Performance Evaluation of MGfast Systems Over Coaxial Cables, Journal of Communication and Information Systems, Vol. 36, No.1, 2021..

Apêndices

APÊNDICE A – Download e Instalação

O software pode ser clonado em uma máquina utilizando-se o Git. Depois disso, é necessário instalar as dependências do projeto. Finalmente o mesmo pode ser executado diretamente por linha de comando ou então compilado em um aplicativo multiplataforma.

Abaixo um passo a passo detalhado de como fazer o *download* e instalação do software:

1. Baixar e instalar o software Node.js, disponível em: <https://nodejs.org/en/>
2. Baixar para a máquina local o projeto, isso pode ser feito baixando-se o projeto em formato de arquivo compactado pela página do projeto no GitHub ou pelo comando Git (necessário ter instalado o Git):

```
git clone https://github.com/MoysesLica/GPLCS_ELECTRON.git
```

3. Instalar as dependências do projeto, isso pode ser feito navegando-se por um terminal de comando até a pasta onde o projeto foi baixado e executando o seguinte comando:

```
npm install
```

4. Para executar o projeto, basta executar no terminal (estando presente na pasta do projeto) o comando:

```
npm run start
```

E para compilar o projeto em um aplicativo você deve usar o comando:

```
npm run dist
```

APÊNDICE B – Cálculo dos Parâmetros do Modelo TNO/EAB

Neste apêndice será explicado como são feitos os cálculos das funções de um cabo utilizando o modelo de cabo TNO/EAB.

O cálculo das funções de um cabo utilizando o modelo TNO/EAB começam pelo cálculo da função de Constante de Propagação, dela é derivada a impedância em série e a admitância em paralelo, esses dois parâmetros são usados para gerar a impedância característica e os parâmetros primários. A Constante de Propagação também é usada diretamente para gerar a função de transferência, abaixo estão os códigos do cálculo das funções implementadas no software (Obs.: todos os cálculos utilizam a biblioteca matemática Math.js):

```
function calcPropagationConstantTNOEAB(minF, maxF, stepF, qs, qx, ws, qy, rs0, lsinf, wd, qc, cp0, phi){
  let propagationConstant = [];
  let alpha = [];
  let beta = [];
  let seriesImpedance = [];
  let shuntingAdmittance = [];
  for(let i = minF; i <= maxF; i += stepF) {
    let w = 2*Math.PI*i;
    let Z = math.add(math.multiply(math.complex(rs0, 0), math.add(math.complex(1 - qs, 0), math.add(math.complex(qs - (qs*qx), 0), math.sqrt(math.add(
    math.complex(Math.pow(qs, y: 2)*Math.pow(qx, y: 2), 0), math.multiply(math.complex(0, 2*w/ws), math.divide(math.complex(Math.pow(qs, y: 2), w/ws*qy ),
    math.complex(Math.pow(qs, y: 2)/qx, w/ws*qy))))))), math.complex(0, w*lsinf));
    let Y = math.multiply(math.add(math.multiply(math.pow(math.complex(1, w/wd), math.complex(-2*phi/Math.PI)), math.complex(1-qc)), math.complex(qc)),
    math.complex(0, w*cp0))
    seriesImpedance.push(Z);
    shuntingAdmittance.push(Y);
    let gamma = math.sqrt(math.multiply(Z, Y));
    propagationConstant.push(gamma);
    alpha.push(gamma.re);
    beta.push(gamma.im);
  }
  return {propagationConstant: propagationConstant,alpha: alpha,beta: beta,shuntingAdmittance: shuntingAdmittance,seriesImpedance: seriesImpedance};
}
```

Figura B.1 – Cálculo da Constante de Propagação - Modelo TNO/EAB

Na figura B.1 acima temos a função de cálculo da constante de propagação. A função recebe os parâmetros do cabo e os parâmetros de frequência (frequência mínima, máxima e o espaçamento entre cada tom). Depois é feito o cálculo da impedância em série e da admitância em paralelo respectivamente pelas fórmulas (3.5) e (3.6). A função retorna tanto a constante de propagação, a constante de atenuação e a constante de fase quanto a impedância em série e admitância em paralelo.

```
function calcCharacteristicImpedanceTNOEAB(seriesImpedance, shuntingAdmittance){
  let recharacteristicImpedance = [];
  let imcharacteristicImpedance = [];
  let characteristicImpedance = [];
  for(let i = 0; i < seriesImpedance.length; i++){
    let Z0 = math.sqrt(math.divide(seriesImpedance[i], shuntingAdmittance[i]));
    characteristicImpedance.push(Z0);
    recharacteristicImpedance.push(Z0.re);
    imcharacteristicImpedance.push(Z0.im);
  }
  return {
    recharacteristicImpedance: recharacteristicImpedance,
    imcharacteristicImpedance: imcharacteristicImpedance,
    characteristicImpedance: characteristicImpedance
  };
}
```

Figura B.2 – Cálculo da Impedância Característica - Modelo TNO/EAB

Na figura B.2 acima temos a função de cálculo da impedância característica. A função recebe a impedância em série e a admitância em paralelo calculadas anteriormente e retorna a impedância característica, bem como suas partes real e imaginária. O cálculo é feito vide fórmula (2.3).

```
function calcTransferFunctionTNOEAB(cableLength, PC){
  let transferFunction = [];
  for(let i = 0; i < PC.length; i++){
    let TF = math.exp(math.multiply(math.complex(-cableLength, 0), PC[i]));
    transferFunction.push(TF);
  }
  return {
    transferFunction: transferFunction
  };
}
```

Figura B.3 – Cálculo da Função de Transferência - Modelo TNO/EAB

Na figura B.3 acima temos a função de cálculo da função de transferência. A função recebe o tamanho do cabo e a constante de propagação calculada anteriormente. A função retorna apenas a função de transferência. O cálculo é feito vide fórmula (2.10).

```

function calcPrimaryParametersTNOEAB(minF, maxF, stepF, seriesImpedance, shuntingAdmittance){
  let seriesResistance = [];
  let seriesInductance = [];
  let shuntingCapacitance = [];
  let shuntingConductance = [];
  let n = 0;
  for(let i = minF; i <= maxF; i += stepF) {
    let w = 2*Math.PI*i;
    seriesResistance.push(seriesImpedance[n].re);
    seriesInductance.push(seriesImpedance[n].im/w);
    shuntingCapacitance.push(shuntingAdmittance[n].im/w);
    shuntingConductance.push(shuntingAdmittance[n].re);
    n++;
  }
  return {
    seriesResistance: seriesResistance,
    seriesInductance: seriesInductance,
    shuntingConductance: shuntingConductance,
    shuntingCapacitance: shuntingCapacitance
  };
}

```

Figura B.4 – Cálculo dos Parâmetros Primários - Modelo TNO/EAB

Na figura B.4 acima temos a função de cálculo dos parâmetros primários do cabo, ela recebe os parâmetros de frequência (os mesmos usados na função de cálculo da constante de propagação), além da impedância em série e da admitância em paralelo. A função retorna a resistência em série, a indutância em série, a condutância em paralelo e a admitância em paralelo. Os cálculos desses 4 parâmetros são feitos respectivamente pelas fórmulas: (2.6), (2.7), (2.8) e (2.9).

APÊNDICE C – Cálculo dos Parâmetros do Modelo BT0

Neste apêndice será explicado como são feitos os cálculos das funções de um cabo utilizando o modelo de cabo BT0.

O cálculo das funções de um cabo utilizando o modelo BT0 começam pelo cálculo dos parâmetros primários. A partir dos parâmetros primários derivam-se a constante de propagação, impedância em série e admitância em paralelo. Posteriormente, podemos calcular por meio destes três parâmetros tanto a função de transferência quanto a impedância característica do cabo.

```
function calcPrimaryParametersBT0(minF, maxF, stepF, roc, ac, l0, linf, fm, nb, g0, nge, c0, cinf, nce){
  let seriesResistance = [];let seriesInductance = [];let shuntingCapacitance = [];let shuntingConductance = [];
  for(let i = minF; i <= maxF; i += stepF) {
    let ffbm = Math.pow((i/fm), nb);

    let R = Math.sqrt(Math.sqrt(x: Math.pow(roc, 4)+(ac*Math.pow(i, 2))));
    let L = (l0+(linf*ffbm))/(1+ffbm);
    let G = g0*Math.pow(i, nge);
    let C = cinf+(c0*Math.pow(i, (-nce)));

    seriesResistance.push(R);
    seriesInductance.push(L);
    shuntingConductance.push(G);
    shuntingCapacitance.push(C);
  }

  return {seriesResistance: seriesResistance, seriesInductance: seriesInductance, shuntingConductance: shuntingConductance, shuntingCapacitance: shuntingCapacitance};
}
```

Figura C.1 – Cálculo dos Parâmetros Primários - Modelo BT0

Na figura C.1 acima temos a função de cálculo dos parâmetros primários. A função recebe os parâmetros do cabo mais os parâmetros de frequência (frequência mínima, máxima e o espaçamento entre cada tom de frequência a ser calculado). Depois é feito o cálculo da resistência em série, indutância em série, condutância em paralelo e capacitância em paralelo respectivamente pelas fórmulas (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4). A função retorna os quatro parâmetros citados anteriormente.

```
function calcPropagationConstantBT0(minF, maxF, stepF, R, L, G, C){
  let propagationConstant = []; let alpha = []; let beta = []; let seriesImpedance = []; let shuntingAdmittance = [];
  for(let i = minF; i <= maxF; i += stepF) {

    let w = i*Math.PI*2;
    let n = (i - minF)/stepF;
    let SI = math.complex(R[n], w*L[n]);
    let SA = math.complex(G[n], w*C[n]);

    seriesImpedance.push(SI);
    shuntingAdmittance.push(SA);

    let PC = math.sqrt(math.multiply(SI, SA));

    propagationConstant.push(PC);
    alpha.push(PC.re);
    beta.push(PC.im);
  }
  return {propagationConstant: propagationConstant, alpha: alpha, beta: beta, shuntingAdmittance: shuntingAdmittance, seriesImpedance: seriesImpedance};
}
```

Figura C.2 – Cálculo da Constante de Propagação, Impedância em Série e Admitância em Paralelo - Modelo BT0

Na figura C.2 acima temos a função de cálculo da constante de propagação. A função recebe os parâmetros primários calculados anteriormente e os parâmetros de frequência. Nesta função primeiro é feito o cálculo da impedância em série e da admitância em paralelo pelas fórmulas (2.1) e (2.2) respectivamente, depois, a constante de propagação é calculada pela fórmula (2.4).

```
function calcTransferFunctionBT0(cableLength, PC){
  let transferFunction = [];
  for(let i = 0; i < PC.length; i++){
    let TF = math.exp(math.multiply(math.complex(-cableLength/1000, 0), PC[i]));
    transferFunction.push(TF);
  }
  return {transferFunction: transferFunction};
}
```

Figura C.3 – Cálculo da Função de Transferência - Modelo BT0

Na figura C.3 acima temos a função de cálculo da função de transferência. A função recebe o tamanho do cabo e a constante de propagação calculada anteriormente e estima a função de transferência. O cálculo é feito vide fórmula (2.10).

```
function calcCharacteristicImpedanceBT0(seriesImpedance, shuntingAdmittance){
  let recharacteristicImpedance = [];let imcharacteristicImpedance = [];let characteristicImpedance = [];
  for(let i = 0; i < seriesImpedance.length; i++){
    let Z0 = math.sqrt(math.divide(seriesImpedance[i], shuntingAdmittance[i]));
    characteristicImpedance.push(Z0);
    recharacteristicImpedance.push(Z0.re);
    imcharacteristicImpedance.push(Z0.im);
  }
  return {
    recharacteristicImpedance: recharacteristicImpedance,
    imcharacteristicImpedance: imcharacteristicImpedance,
    characteristicImpedance: characteristicImpedance
  };
}
```

Figura C.4 – Cálculo da Impedância Característica - Modelo BT0

Na figura C.4 acima temos a função de cálculo da impedância característica. A função recebe a impedância em série e a admitância em paralelo calculadas anteriormente, depois calcula por meio da fórmula (2.3) a impedância característica. A função retorna a impedância característica do cabo em formato complexo, além das partes reais e imaginárias que a compõe separadamente.

APÊNDICE D – Cálculo dos Parâmetros do Modelo KHM

Neste apêndice será explicado como são feitos os cálculos das funções de um cabo utilizando o modelo de cabo KHM.

O cálculo das funções de um cabo utilizando o modelo KHM começam pelo cálculo da constante de propagação. Posteriormente calcula-se a impedância característica. Depois disso, pode-se calcular tanto a função de transferência quanto seus parâmetros primários do cabo.

```
function calcPropagationConstantKHM1(minF, maxF, stepF, k1, k2, k3){
    let propagationConstant = []; let alpha = []; let beta = [];

    for(let i = minF; i <= maxF; i += stepF){
        let alp = (k1*Math.sqrt(i)) + (k2*i);
        let bet = (k1*Math.sqrt(i)) - (k2*(2/Math.PI)*i*Math.log(i)) + (k3*i);
        alpha.push(alp);
        beta.push(bet);
        let PC = math.complex(alp, bet);
        propagationConstant.push(PC);
    }

    return {propagationConstant: propagationConstant, alpha: alpha, beta: beta};
}
```

Figura D.1 – Cálculo da Constante de Propagação - Modelo KHM

Na figura D.1 acima temos a função de cálculo da constante de propagação. A função recebe os parâmetros do cabo e os parâmetros de frequência (frequência mínima, máxima e o espaçamento entre cada tom de frequência a ser calculado). Depois é feito o cálculo da constante de propagação utilizando a fórmula (3.7). A função retorna a constante de propagação, bem como a constante de atenuação e a constante de fase.

```
function calcCharacteristicImpedanceKHM1(minF, maxF, stepF, h1, h2){
    let recharacteristicImpedance = []; let imcharacteristicImpedance = []; let characteristicImpedance = [];

    for(let i = minF; i <= maxF; i += stepF){
        let re = h1 + (h2*(1/Math.sqrt(i)));
        let im = -h2*(1/Math.sqrt(i));
        recharacteristicImpedance.push(re);
        imcharacteristicImpedance.push(im);
        let CI = math.complex(re, im);
        characteristicImpedance.push(CI);
    }

    return {recharacteristicImpedance: recharacteristicImpedance, imcharacteristicImpedance: imcharacteristicImpedance, characteristicImpedance:
characteristicImpedance};
}
```

Figura D.2 – Cálculo da Impedância Característica - Modelo KHM

Na figura D.2 acima temos a função de cálculo da impedância característica. A função recebe os parâmetros do cabo e os parâmetros de frequência, depois a impedância característica é calculada pela fórmula (3.8). A função retorna a impedância característica bem como suas partes reais e imaginárias.

```
function calcTransferFunctionKHM1(propagationConstant, cableLength){
    let transferFunction = [];

    for(let i = 0; i < propagationConstant.length; i++){
        transferFunction.push(math.exp(math.multiply(propagationConstant[i], math.complex(-cableLength))));
    }

    return {
        transferFunction: transferFunction
    };
}
```

Figura D.3 – Cálculo da Função de Transferência - Modelo KHM

Na figura D.3 acima temos a função de cálculo da função de transferência. A função recebe o tamanho do cabo e a constante de propagação calculada anteriormente. A função retorna apenas a função de transferência, o cálculo é feito via fórmula (2.10).

```
function calcPrimaryParametersKHM1(minF, maxF, stepF, propagationConstant, characteristicImpedance){
    let seriesResistance = []; let seriesInductance = []; let shuntingCapacitance = []; let shuntingConductance = [];
    let n = 0;
    for(let i = minF; i <= maxF; i += stepF){
        let SR = math.multiply(propagationConstant[n], characteristicImpedance[n].re;
        let SI = math.multiply(propagationConstant[n], characteristicImpedance[n].im * (1/(2*Math.PI*i)));
        let SCo = math.divide(propagationConstant[n], characteristicImpedance[n].re;
        let SCa = math.divide(propagationConstant[n], characteristicImpedance[n].im * (1/(2*Math.PI*i)));
        seriesResistance.push(SR);
        seriesInductance.push(SI);
        shuntingConductance.push(SCo);
        shuntingCapacitance.push(SCa);
        n++;
    }

    return {seriesResistance: seriesResistance, seriesInductance: seriesInductance, shuntingConductance: shuntingConductance, shuntingCapacitance:
shuntingCapacitance};
}
```

Figura D.4 – Cálculo da Impedância Característica - Modelo KHM

Na figura D.4 acima temos a função de cálculo dos parâmetros primários. A função recebe os parâmetros de frequência, a constante de propagação e a impedância característica. O cálculo da resistência em série, indutância em série, condutância em paralelo e capacitância em paralelo é feito respectivamente por: (2.6), (2.7), (2.8) e (2.9). A função retorna os parâmetros primários citados anteriormente.