

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

AGHATTA CIOQUETTA MOREIRA

**MODELO FÍSICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO: ADAPTAÇÃO
PARA SISTEMAS DE *POWER LINE COMMUNICATION***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**SÃO JOÃO DA BOA VISTA
2019**

AGHATTA CIOQUETTA MOREIRA

**MODELO FÍSICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO: ADAPTAÇÃO
PARA SISTEMAS DE *POWER LINE COMMUNICATION***

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito obrigatório à
obtenção do título de bacharel em
engenharia eletrônica e de
telecomunicações, da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho”

Orientador: Prof. Dr. Afonso José do
Prado

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2019

Dedico este trabalho aos meus pais.
Mãe, seu cuidado e dedicação me deram
em alguns momentos, a esperança para
seguir.

Pai, sua presença significou segurança e
a certeza de que não estou sozinha nesta
e nas próximas caminhadas.

Moreira, Aghatta Cioquetta

Modelo físico de linhas de transmissão: adaptação para sistemas de *power line communication*/ Aghatta Cioquetta Moreira -- São João da Boa Vista, 2019.

52 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Câmpus Experimental de São João da Boa Vista – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. Afonso José do Prado

Bibliografia

1. Linhas elétricas 2. Sistemas de transmissão de dados 3. Telecomunicações 4. Transitórios (Eletricidade)

CDD 23. ed. – 621.382

Ficha catalográfica elaborada pela [Biblioteca-BJB](#)

Bibliotecário responsável: João Pedro Alves Cardoso – CRB-8/9717

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MODELO FÍSICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO: ADAPTAÇÃO PARA SISTEMAS
DE *POWER LINE COMMUNICATION***

Aluno: Aghatta Cioquetta Moreira

Orientador: Prof. Dr. Afonso José do Prado

Banca Examinadora:

- Afonso José do Prado (Orientador)
- André Alves Ferreira (Examinador)
- Elmer Mateus Gennaro (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 26/2019)

São João da Boa Vista, 03 de dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à UNESP pela oportunidade e por todo o conhecimento adquirido.

Aos meus pais por me mostrarem que a vida é linda de viver.

Ao meu namorado pela compreensão.

Aos amigos pela cumplicidade e pelo auxílio em diversos momentos.

Ao meu orientador que sempre dividiu comigo seu conhecimento e me mostrou o caminho correto.

Aos meus professores pela dedicação.

À FAPESP pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

*“Qualquer destino, por mais longo e
complicado que seja, vale apenas por um
único momento:
aquele em que o homem compreende de
uma vez por todas quem é.”*
(Jorge Luis Borges)

RESUMO

Linhas de transmissão podem ser modeladas de maneira simples e obedecendo a uma série de restrições como sendo uma cascata de circuitos π . Para análise de transitórios eletromagnéticos e de sistemas PLC (*Power Line Communication*) são necessárias algumas alterações na representação da linha, pois esses fenômenos necessariamente dependem da influência da frequência para sua análise. A alteração que permite o estudo dessas situações é a inclusão de blocos consistindo de um resistor e um indutor colocados em paralelo no modelo. Neste trabalho, serão apresentadas duas abordagens de estudo sobre o modelo de linhas de transmissão. Foram feitas análises em um modelo físico construído em laboratório e também simulações para que uma maior quantidade de circuitos pudessem ser observados em cascata. Como as linhas podem ter extensões de centenas de quilômetros, são necessárias grandes quantidades de circuitos π para que a análise se torne o mais próxima possível do observado em situações reais. Foi observado que o modelo construído é uma boa aproximação para sistemas PLC em banda estreita, nos quais a transmissão de dados é feita na faixa de frequências entre 9 e 95 kHz.

Palavras-chave: linha de transmissão, transitório eletromagnético, Power Line Communication.

ABSTRACT

Transmission lines can be modeled simply and restricted to a series of constraints as a cascade of π circuits. For analysis of electromagnetic transients and PLC (Power Line Communication) systems, some changes in line representation are necessary, as these phenomena necessarily depend on the frequency influence for their analysis. The change that allows the study of these situations is the inclusion of blocks consisting of a resistor and an inductor placed in parallel in the model. In this paper, two approaches to study the transmission line model will be presented. Analyzes were made in a physical model built in the laboratory and also simulations so that a larger number of circuits could be observed in cascade. These lines can span hundreds of kilometers, so large numbers of π circuits are required to make the analysis as close as possible to what is observed in real situations. It was observed that the built model is a good approximation for narrowband PLC systems, where data transmission is in the frequency range between 9 and 95 kHz.

Keywords: transmission line, electromagnetic transient, power line communication.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Unidade de circuito π sem a influência da frequência	19
Figura 2 - Cascata de circuitos π sem considerar a influência da frequência	19
Figura 3 – Circuito π modificado a partir da inserção da influência da frequência	20
Figura 4 - Inserção da influência da frequência a partir de blocos RL.....	23
Figura 5 - Parcela longitudinal do modelo físico construída em protoboard	24
Figura 6 - Sinais senoidais em 20 Hz mostrando diferença de tensão entre as senoides	25
Figura 7 - Forma da FFT em 30 kHz na qual não há presença de ruído significativo	26
Figura 8 – Resistência da linha aumenta em função da frequência	26
Figura 9 – Impedância da linha aumenta em função da frequência	27
Figura 10 - Representação da fase da linha em função da frequência	27
Figura 11 - Gráfico de representação da indutância da linha em função da frequência	28
Figura 12 - Função transferência de uma unidade de circuito π	29
Figura 13 - Representação da fase de uma unidade de circuito π	29
Figura 14 - FFT com pouca presença de ruído em 900 kHz	30
Figura 15 - Montagem de 2 circuitos π em cascata	31
Figura 16 - Entrada e saída em 40 Hz mostrando que não há diferença de tensão entre as senoides	33
Figura 17 - Entrada e saída em 700 Hz onde ainda não há diferença de tensão entre senoides	34
Figura 18 - Entrada e saída em 4 MHz mostrando diferença de tensão significativa entre senoides.....	34
Figura 19 - Gráfico da função transferência de duas unidades de circuito π	35
Figura 20 - Gráfico da fase de duas unidades de circuito π	36
Figura 21 - Projeto de uma unidade de circuito em placa de circuito impresso.....	37
Figura 22 - Circuito montado no HFSS para simulação de grandes quantidades de circuitos π	39
Figura 23 – Unidade de circuito π mostrando atenuação de -10 dB em 1 MHz.....	40
Figura 24 - Cascata de 5 circuitos π mostrando atenuação de -55 dB em 1 MHz	40

Figura 25 - Cascata de 20 circuitos π mostrando atenuação de -250 dB de atenuação em 1 MHz	41
Figura 26 - Cascata de 40 circuitos π analisado contendo -500 dB de atenuação em 1 MHz.....	41
Figura 27 - Cascata de 100 circuitos π analisado contendo -1500 dB de atenuação em 1 MHz.....	42
Figura 28 - Cascata de 150 circuitos π com atenuação de – 2000 dB em 1 MHz	43
Figura 29 - Cascata de 200 circuitos π mostrando atenuação de -3000 dB em 1 MHz	43
Figura 30 - Cascata de 250 circuitos π com atenuação de -3000 dB em 1 MHz	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos elementos R e L utilizados nos cálculos dos parâmetros longitudinais da linha	20
Tabela 2 - Elementos transversais da linha.....	21
Tabela 3 - Elementos adquiridos para a montagem da placa.	38
Tabela 4 - Tensão, corrente e defasagem angular na parte longitudinal do modelo físico	50
Tabela 5 - Dados obtidos a partir da análise de 2 circuitos π em cascata	51

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

PLC	Power Line Communication
EMTP	Eletromagnetic Transients Program
ATP	Alternative Transient Program
PSCAD	Power System Computer Aided Design
R	Resistência (dada em Ohm, Ω)
L	Indutância (dada em Henry, H)
C	Capacitância (dada em Farad, F)
G	Condutância (dada em Ohm, Ω)
R'	Resistência por unidade de comprimento (Ω/km)
L'	Indutância por unidade de comprimento (H/km)
G'	Condutância por unidade de comprimento (Ω/km)
C'	Capacitância por unidade de comprimento (F/km)
n	Quantidade de circuitos π na cascata
Z	Impedância elétrica (dada em Ohm, Ω)
X_L	Reatância indutiva (dada em Ohm, Ω)
Ω	Unidade de medida de resistência
Hz	Unidade de medida de frequência
dB	Decibéis
FFT	Fast Fourier Transform
R_0	Resistência inicial
L_0	Indutância inicial
Vpp	Valor de pico a pico
EMTDC	Electro-Magnetic Transient Design and Control

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO	17
3. MODELO EXPERIMENTAL E FORMAS DE ANÁLISE	19
4. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS PARA ANÁLISE	23
4.1 PARCELA LONGITUDINAL DO MODELO FÍSICO	23
4.2 ADIÇÃO DA PARCELA TRANSVERSAL DO MODELO FÍSICO	28
4.3 ANÁLISE DE DUAS UNIDADES DE CIRCUITO π EM CASCATA	31
4.4 CONSTRUÇÃO DE MODELO PARA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	37
5. SIMULAÇÕES REALIZADAS A PARTIR DO MODELO	39
6. CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXO I	49

1. INTRODUÇÃO

Linhas de transmissão são estruturas guiantes longitudinais que podem ser utilizadas para transporte de energia ou de pacotes de dados. A teoria de linhas de transmissão também pode ser aplicada em sistemas de baixa potência para o transporte de informação. Por exemplo, em sistemas de telecomunicações, na comunicação e troca de dados entre diferentes porções de circuitos integrados e processadores e também em situações que utilizam alta potência para transporte de energia elétrica em sistemas de alta tensão. A transmissão de energia elétrica ou dados é guiada de uma fonte geradora para uma carga consumidora através de fios torcidos ou paralelos, cabos coaxiais ou um guia de onda. Para fins de estudo e pesquisa, a modelagem dessas linhas de transmissão pode ser feita de forma relativamente simples, convertendo os parâmetros distribuídos do circuito estudado em parâmetros concentrados, ao utilizar grandes quantidades desses elementos.

Uma linha de transmissão cujos parâmetros são considerados independentes da frequência pode ser representada, de maneira aproximada e obedecendo a uma série de restrições, como sendo uma cascata de circuitos π . Essa modelagem converte seus parâmetros distribuídos em uma grande quantidade de parâmetros concentrados. Para que seja possível visualizar a propagação de ondas de tensão ao longo da linha de transmissão, deve-se mostrar, em um dado instante de tempo, o valor da tensão em cada ponto da linha, sendo que, para que se tenha uma boa visualização do fenômeno, é necessária a utilização de uma grande quantidade de circuitos π (Andrade et al, 2013).

A representação da linha pode ter seu desenvolvimento feito no domínio do tempo ou no domínio da frequência, sendo o último mais simples de ser implementado ao considerar apenas a linha de transmissão. Porém, a linha de transmissão é inserida em sistemas elétricos que possuem elementos não lineares que devem ser considerados nas simulações. Esses elementos não lineares tornam a representação da linha no domínio da frequência mais complicada. Sendo assim, há a preferência por modelos que são desenvolvidos diretamente no domínio do tempo (Marti, 1988).

Um dos percursos do desenvolvimento da representação da linha de transmissão diretamente no domínio do tempo foi H. W. Dommel (Dommel, 1969).

Ele utilizou o método das características, ou método de Bergeron combinado com o método de integração trapezoidal. Esse procedimento numérico pode ser aplicado na resolução de equações diferenciais e sistemas. A integração trapezoidal consiste em uma forma aperfeiçoada do método da tangente, também conhecido como método de Euler (Dommel, 1969).

Para análises de redes elétricas, têm-se rotinas numericamente estáveis ao se utilizar a integração trapezoidal. De forma simplificada, a integração trapezoidal determina a área abaixo de uma curva, aproximando-a por meio de soma de trapezóides infinitesimais.

O trabalho desenvolvido por Dommel resultou em um algoritmo capaz de simular o comportamento de transitórios eletromagnéticos em redes com parâmetros discretos ou distribuídos (Dommel, 1969). O algoritmo desenvolvido sofreu diversas modificações, sendo a principal delas a migração do computador de grande porte (*mainframe*) para o microcomputador. Conhecido e utilizado há mais de 25 anos, o algoritmo atualmente é conhecido como *Eletromagnetic Transients Program* (EMTP) (Nelms et al, 1989).

Os principais programas digitais utilizados para análise e simulações de fenômenos em linhas de transmissão empregam a integração trapezoidal, considerando o tempo como variável independente. Tais programas podem ser classificados como do tipo EMTP (MICROTRAN, ATP, PSCAD/EMTDC).

Programas do tipo EMTP são de difícil utilização e apresentam custo elevado. Outro inconveniente desses programas é que os mesmos limitam a quantidade de circuitos π que podem ser utilizados para representar a linha. Desse modo, dependendo do comprimento da linha a ser representada, a qualidade dos resultados obtidos a partir das simulações podem ficar comprometidos. Devido a essas dificuldades, foram criadas alternativas apresentadas em artigos escritos por autores como Nelms (1989), Mamis (2003), Mamis e Nacaroglu (2003) e Mácias (2005). Esses autores sugerem que as correntes e tensões na cascata de circuitos π , como representado na Figura 1, localizada no item 3 deste trabalho (Modelo experimental e formas de análise) sejam representadas por variáveis de estado. Com essa representação, seria possível utilizar qualquer linguagem computacional para resolver as equações de diferenças.

Essa solução se mostrou adequada para ensino de conceitos básicos de propagação de ondas em linhas de transmissão (Nelms, 1989) e na análise da

distribuição de correntes e tensões ao longo da linha (Mamis e Nacaroglu, 2003). Porém, todas essas representações foram feitas em sistemas nos quais as linhas de transmissão possuem parâmetros longitudinais considerados constantes e independentes da frequência.

O estudo apresentado nesse trabalho necessariamente depende da influência da frequência devido ao estudo de transitórios eletromagnéticos e sistemas PLC (*Power Line Communication*). A introdução da influência da frequência no modelo de linha de transmissão é feita pela inserção de ramos que consistem em uma associação em paralelo de um resistor e um indutor, que se forem escolhidos adequadamente, representam a impedância longitudinal de uma linha de transmissão. Os métodos utilizados para determinar os resistores e indutores são descritos por Sarto (2001) e Lima (2005).

Transitórios eletromagnéticos podem ser definidos como eventos momentâneos indesejáveis que alteram subitamente as condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Os sistemas elétricos estão sujeitos a inúmeros fenômenos transitórios, variando desde as oscilações eletromecânicas (baixas frequências) até as rápidas variações de tensões e correntes causadas por chaveamentos ou mudanças bruscas de estado. A duração de um transitório geralmente é muito curta, mas de grande importância visto que podem danificar permanentemente equipamentos presentes no sistemas elétricos, ao serem submetidos as grandes solicitações de tensão ou corrente (Paulillo et al, 2013).

O conceito de PLC, ou comunicação via rede elétrica, surgiu pela primeira vez em trabalho publicado por Brown (1996). O estudo demonstrou que linhas de transmissão utilizadas para o transporte de baixa tensão poderiam ser utilizadas para carregar sinais de comunicação em alta frequência, acima de 1 MHz. O conceito de PLC pode ser utilizado em diversas aplicações, como uma rede de comunicação doméstica, análises na rede de energia elétrica e comunicação de carros elétricos com seus respectivos recarregadores para recarga em corrente contínua.

As aplicações de PLC podem ser feitas de forma simples, considerando que não há necessidade de infraestrutura adicional para o emprego da tecnologia. O Brasil possui atualmente 141.388 km de linhas de transmissão de energia elétrica, espalhadas por todo seu território.

Porém, diferentemente de outros meios de transmissão de sinais de

comunicação, como a fibra óptica, linhas de transmissão apresentam um ambiente extremamente desfavorável para sinais em alta frequência. Os três parâmetros que tornam o ambiente desfavorável para esse tipo de transmissão são ruído, impedância e atenuação. Esses efeitos são imprevisíveis e altamente variáveis com o tempo, frequência e localização. A alta variabilidade desses parâmetros justifica as análises e investigações nessa área.

O objetivo deste trabalho é modelar linhas de transmissão nas quais energia elétrica ou dados possam ser transmitidos utilizando cascatas de circuitos π modificados para introduzir a influência da frequência nos parâmetros da linha. A modelagem numérica é feita no domínio do tempo. Os resultados obtidos com as simulações a partir do modelo físico serão utilizados para analisar a adaptabilidade desse modelo para a análise de fenômenos transitórios e sistemas PLC.

2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo experimental construído foi baseado em um modelo matemático desenvolvido anteriormente (Prado et al, 2014). As equações de estado podem ser representadas por meio de um sistema linear, como mostrado em (1).

Na equação (1), x representa o vetor de variáveis de estado, sendo representado no domínio do tempo, u é o vetor de entrada de dados, A é a matriz que representa o sistema e B é o vetor responsável por introduzir as fontes independentes do circuito analisado.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

Aplicando o método de integração trapezoidal em (1) é possível obter (2).

$$x_{k+1} - x_k = \frac{T}{2} (Ax_{k+1} + Bu_{k+1} + Ax_k + Bu_k) \quad (2)$$

Em (2) T é o passo de integração utilizado para resolver o sistema. Rearranjando (2), é possível obter (3).

$$x_{k+1} = x_k + \frac{T}{2} (Ax_{k+1} + Bu_{k+1} + Ax_k + Bu_k) \quad (3)$$

A equação (3) é melhor representada ao reescrever o sistema como mostrado em (4).

$$\left[I - \frac{T}{2} A \right] x_{k+1} = \left[I + \frac{T}{2} A \right] x_k + \frac{T}{2} B [u_k + u_{k+1}] \quad (4)$$

Em (4), I é a matriz identidade de ordem $(2n \times 2n)$. Sendo n o número de circuitos π a serem analisados. Fazendo simplificações em (4), é possível obter (5).

$$x_{k+1} = A'' x_k + B' [u_k + u_{k+1}] \quad (5)$$

Em (5), A' , A'' e B' são matrizes. Essas matrizes são descritas em (6) na qual T é o passo de tempo.

$$A' = \left[I - \frac{T}{2} A \right]^{-1}; \quad A'' = A' \cdot \left[I + \frac{T}{2} A \right]; \quad B' = A' \cdot \frac{T}{2} B \quad (6)$$

Os parâmetros relacionados à resistência (R) e indutância (L) longitudinais da linha são indispensáveis para a observação do comportamento da linha ao ser submetida a transitórios eletromagnéticos.

Os parâmetros de resistência e indutância são representados, assim como a condutância (G) e capacitância (C) transversais da linha. Essas grandezas são representadas em função de R' , L' , G' e C' que são parâmetros longitudinais da linha por unidade de comprimento.

$$R = R' \frac{d}{n}; \quad L = L' \frac{d}{n}; \quad G = G' \frac{d}{n} \quad C = C' \frac{d}{n} \quad (7)$$

3. MODELO EXPERIMENTAL E FORMAS DE ANÁLISE

Uma linha de transmissão para análises onde a dependência da frequência não é um parâmetro fundamental pode ser representada como sendo uma cascata de circuitos π . Uma única unidade de circuito π pode ser observada na Figura 1.

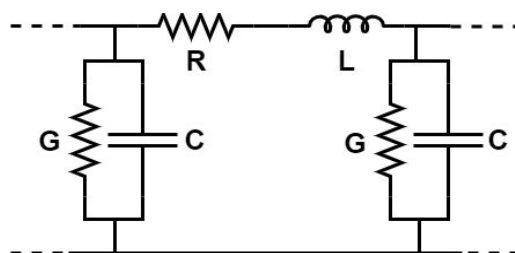


Figura 1 - Unidade de circuito π sem a influência da frequência

Fonte: Autor

A representação da linha por meio de uma cascata de circuitos π , conforme a Figura 2 permite que as correntes e tensões ao longo da linha sejam calculadas diretamente no domínio do tempo.

A estrutura clássica de circuitos π não considera a influência da frequência, o que causa erros significativos nos cálculos das correntes e tensões propagadas pela linha fora da situação de regime permanente ou para fenômenos de alta frequência.

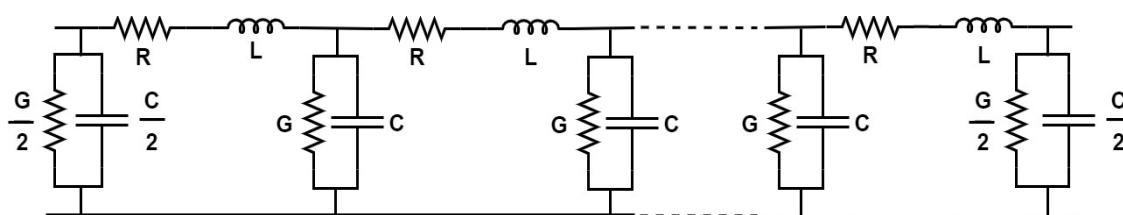


Figura 2 - Cascata de circuitos π sem considerar a influência da frequência

Fonte: Autor

Dessa forma, na estrutura clássica do circuito π são inseridos blocos RL paralelos para simular a influência da frequência nos parâmetros da linha de transmissão, como mostrado na Figura 3.

A inserção da influência da frequência na modelagem de linhas de transmissão é fundamental para a análise de transitórios eletromagnéticos, que podem retirar a linha de sua situação de regime permanente causando diversos

prejuízos às concessionárias de energia. Dessa forma, tais empresas estão cada vez mais interessadas na análise desses fenômenos.

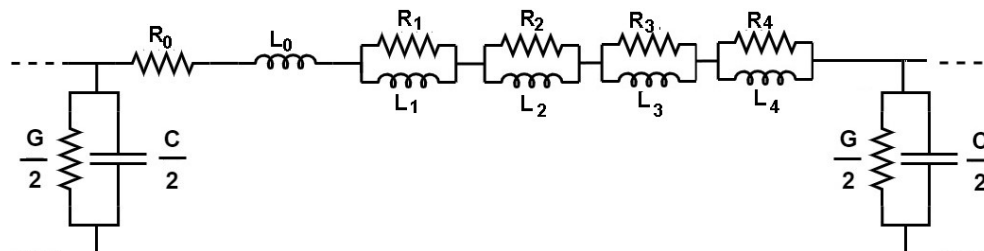


Figura 3 – Circuito π modificado a partir da inserção da influência da frequência

Fonte: Autor

O primeiro modelo para análise foi construído, e consiste na montagem da parcela longitudinal do circuito mostrado na Figura 3. A partir de uma varredura em frequências e da inserção de um resistor conhecido na entrada do circuito, foi possível obter os gráficos de resistência e indutância do circuito analisado. Os gráficos serão apresentados posteriormente, no item 4.1. Foram aplicados ao circuito os componentes comerciais cujos valores mais se aproximavam dos mostrados na Tabela 1

Uma vez que os valores dos elementos R e L da cascata de circuitos π que descrevem a linha são conhecidos, é possível montar as equações de estado que descrevem o comportamento das correntes e tensões ao longo da mesma. Os valores de resistência e indutância iniciais foram escolhidos para que o modelo físico de linhas de transmissão pudesse ser utilizado para análise de sistemas PLC.

Tabela 1 - Valores dos elementos R e L utilizados nos cálculos dos parâmetros longitudinais da linha

Resistores (Ω)		Indutores (mH)	
R_0	1,2	L_0	0,0082
R_1	1,1	L_1	0,4760
R_2	1,6	L_2	0,1000
R_3	15,0	L_3	0,0600
R_4	79,6	L_4	0,0350

Para a modelagem com circuitos π , foi necessário o estudo da representação dos parâmetros distribuídos presentes em uma linha de transmissão real e sua

respectiva conversão em parâmetros concentrados. A determinação precisa dos valores distribuídos presentes na linha deve ser baseada nas grandezas geométricas das torres da linha de transmissão e na resistência de terra da região por onde passa a linha. Os dados utilizados são baseados em análises de linhas de transmissão feitas em trabalhos publicados anteriormente (Prado, 2017).

Após a análise da parte longitudinal do circuito isolada, como mostrado na Figura 3, a parte transversal do circuito foi adicionada utilizando os valores de resistência e capacitância mostrados na Tabela 2. O circuito utilizado foi montado como o circuito completo da Figura 3.

Utilizando esse circuito, foram medidos os valores de tensão de entrada, tensão de saída e a defasagem entre tais tensões. A análise abrange a faixa de frequências de 10 Hz a 5 MHz, sendo considerados 10 valores de frequência por década. Os valores obtidos foram utilizados para a obtenção do gráfico da função transferência de uma unidade completa de circuito π (módulo e fase). O gráfico será apresentado no item 4.2.

Após a análise de uma unidade de circuito π completa em *protoboard*, foi adicionada mais uma unidade de circuito em cascata à anterior para que os gráficos obtidos pudessem ser comparados aos obtidos ao analisar apenas uma unidade de circuito. A forma de análise foi exatamente a mesma. O gráfico da função transferência (módulo e fase) de duas unidades de circuito π em cascata será apresentado no item 4.3.

Para introduzir a construção da segunda unidade de circuito π , é importante fazer referência à Figura 2. É possível notar que os elementos localizados na parte transversal central do circuito são diferentes dos observados nas duas extremidades. Assim, serão introduzidos novos componentes. Esta relação pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2 - Elementos transversais da linha

Resistores (M Ω)		Capacitores (nF)	
R5	6.02	C1	2.20
		C2	1.50
R6	12.24	C3	5.70
		C4	1.84

Os elementos R5, C1 e C2 são referentes às extremidades da linha. Os elementos intermediários (devido à adição da unidade adicional de circuito) nesse caso são compostos pelo resistor R6 e os capacitores C3 e C4 sendo colocados em paralelo. Os elementos longitudinais da linha, como vistos na Tabela 1 permanecem os mesmos na primeira e na segunda unidade de circuito π .

A montagem em *protoboard* provou que há uma série de complicações, pois essas placas são destinadas preferencialmente ao ensino e não a soluções definitivas, devido às limitações de corrente e principalmente frequência para a análise pretendida. Dessa forma, foi feito um projeto para construção dos circuitos em placa de circuito impresso, o projeto será apresentado no item 4.4.

Como o objetivo deste trabalho é analisar a maior quantidade de circuitos π possível em cascata, foi decidido que seriam efetuadas simulações para observar o comportamento do modelo ao serem analisadas mais unidades de circuitos π e o quanto essa análise seria satisfatória ao considerar linhas de transmissão nas quais energia elétrica ou dados possam ser transmitidos. As simulações são melhor detalhadas no item 5.

4. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS PARA ANÁLISE

4.1 PARCELA LONGITUDINAL DO MODELO FÍSCO

Para a realização de simulações nas quais a influência da frequência seria considerada, primeiramente foi construído em *protoboard* o circuito representado na Figura 4.

Neste modelo, os valores de resistores e indutores são escolhidos de forma a sintetizar o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais. Foram aplicados ao circuito os componentes comerciais cujos valores mais se aproximavam dos mostrados na Tabela 1. Assim, as tensões e correntes podem ser calculadas no domínio do tempo. Os resistores e indutores colocados em paralelo como indicado na figura inserem a influência da frequência relacionada aos parâmetros da linha de transmissão. Os elementos R_0 e L_0 representam a resistência e indutância iniciais da linha, respectivamente.

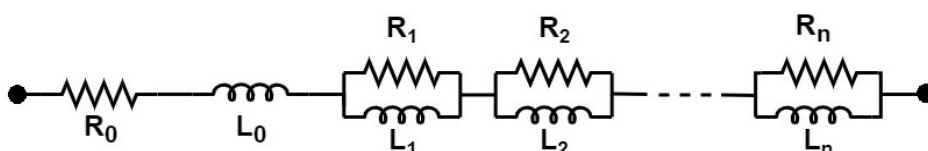


Figura 4 - Inserção da influência da frequência a partir de blocos RL

Fonte: Autor

Essa adaptação permite que seja feita uma análise mais realista dos fenômenos observados em linhas de transmissão. Utilizando a parcela longitudinal do circuito π , assim como mostrado na Figura 4, valores de tensão e corrente foram medidos, sendo considerados 10 valores de frequência por década, de 10 Hz a 1 MHz.

Os valores de corrente foram obtidos indiretamente, por meio da medida de tensão sobre um resistor *shunt* de 1 Ω na entrada do circuito.

Os valores obtidos na simulação foram armazenados em planilha, e posteriormente foram inseridos em rotinas do MatLabTM para obtenção de gráficos que permitissem a análise dos parâmetros desejados (resistência e indutância) em função da frequência.

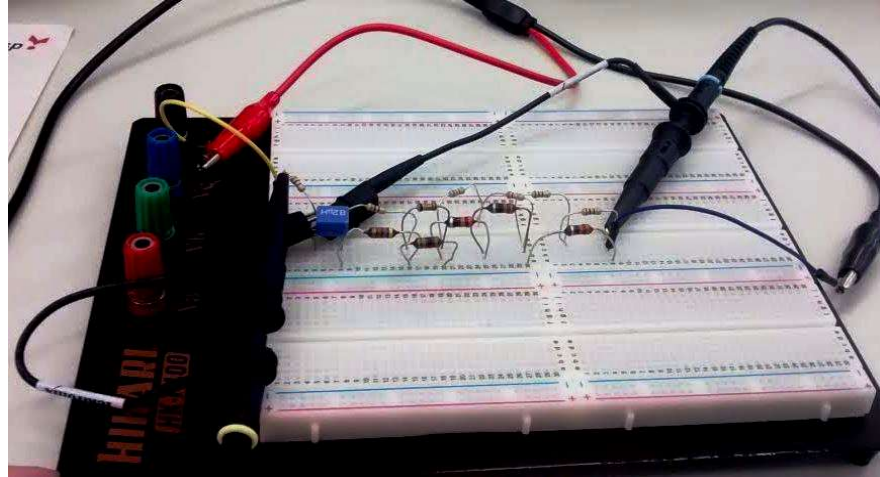


Figura 5 - Parcela longitudinal do modelo físico construída em protoboard

Fonte: Autor

Os valores de tensão, corrente e defasagem entre tais grandezas foram medidos. Também se obteve curvas de FFT para se observar a interferência das harmônicas. O circuito utilizado para as simulações é mostrado na Figura 5. Os valores obtidos a partir das simulações são mostrados na Tabela 4, localizada no ANEXO I.

Utilizando os valores obtidos de tensão, corrente e defasagem angular é possível determinar os valores de impedância e indutância do circuito para cada frequência. São utilizadas as seguintes equações:

$$Z = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}} \quad (8)$$

$$R(\Omega) = Z \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t_{DEFASAGEM}}{180}\right) \quad (9)$$

$$X(\Omega) = Z \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t_{DEFASAGEM}}{180}\right) \quad (10)$$

$$L(H) = \frac{X}{2\pi f} \quad (11)$$

Tais valores serão considerados para a obtenção de gráficos desses parâmetros em função da frequência. Como dito anteriormente, o primeiro passo do projeto foi analisar apenas a parcela longitudinal do circuito π , conforme modelo apresentado na Figura 4 e utilizando os componentes comerciais que mais se

aproximavam do mostrado na Tabela 1. Para a análise, foi aplicada uma tensão de 10 Vpp na entrada do circuito.

Na análise da parcela longitudinal do circuito é possível observar que os valores de tensão na entrada e saída do circuito apresentam diferenças desde o início da análise.

Os valores da tensão na saída do circuito apresentam oscilações entre 40 kHz e 4 MHz, porém as oscilações observadas eram bem inferiores à tensão de entrada. A diferença de tensão entre entrada e saída se deve ao consumo de energia pelo circuito. Na Figura 6, a análise estava sendo feita na frequência de 20 Hz e a tensão de saída já se mostrava menor do que a de entrada.

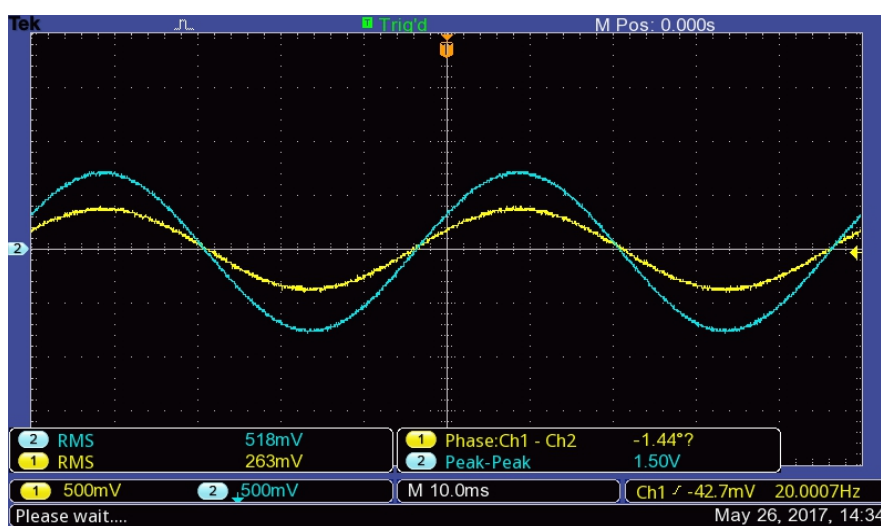


Figura 6 - Sinais senoidais em 20 Hz mostrando diferença de tensão entre as senoides

Fonte: Autor

A partir da varredura em frequências, foi possível notar em laboratório que não houve presença significativa de ruído no sistema. Esse comportamento se repete em toda a análise de frequências no sistema. No osciloscópio, o comportamento do circuito de acordo com a Transformada Rápida de Fourier (em inglês *Fast Fourier transform*, ou FFT) também foi analisado, para observar a presença de ruídos relacionados com a frequência sendo utilizada na simulação, que podem prover do tipo de ferramenta usada para a construção do circuito, no caso, a *protoboard*.

O sinal de saída da FFT mostra como o sinal não tem interferência de suas harmônicas e a componente fundamental está exatamente no valor de frequência do

sinal de entrada, um exemplo de sinal no qual não foram observadas quantidades significativas de ruído pode ser visto a seguir, na Figura 7.

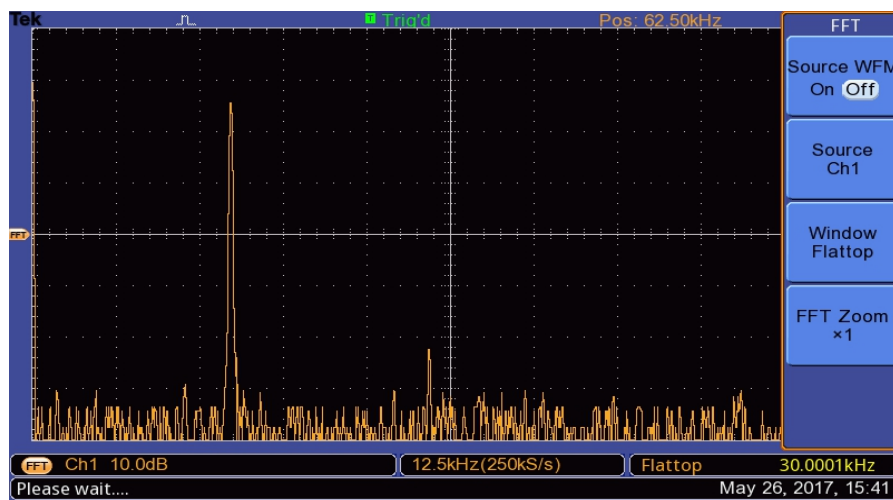


Figura 7 - Forma da FFT em 30 kHz na qual não há presença de ruído significativo

Fonte: Autor

Os gráficos apresentados a seguir foram obtidos a partir da coleta de dados no osciloscópio, e posterior manipulação dos dados utilizando a ferramenta computacional MatLab™. Utilizando os valores de resistência e impedância calculados a partir das equações 9 e 10, respectivamente, é possível plotar gráficos dos dados obtidos em laboratório em função da frequência.

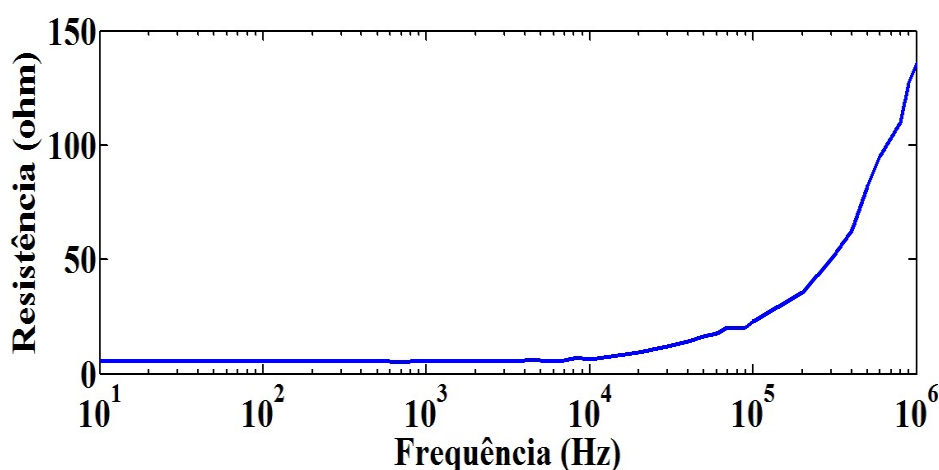


Figura 8 – Resistência da linha aumenta em função da frequência

Fonte: Autor

Em ambos os gráficos, apresentados na Figura 8 e na Figura 9, é possível

observar um aumento da resistência e impedância da linha conforme a frequência aumenta. Isso é equivalente a dizer que um raio, que é caracterizado por um evento de alta frequência, ao cair na linha, enfrentaria uma resistência maior que um evento de baixa frequência, como a transmissão de energia elétrica (Berardo, 2012).

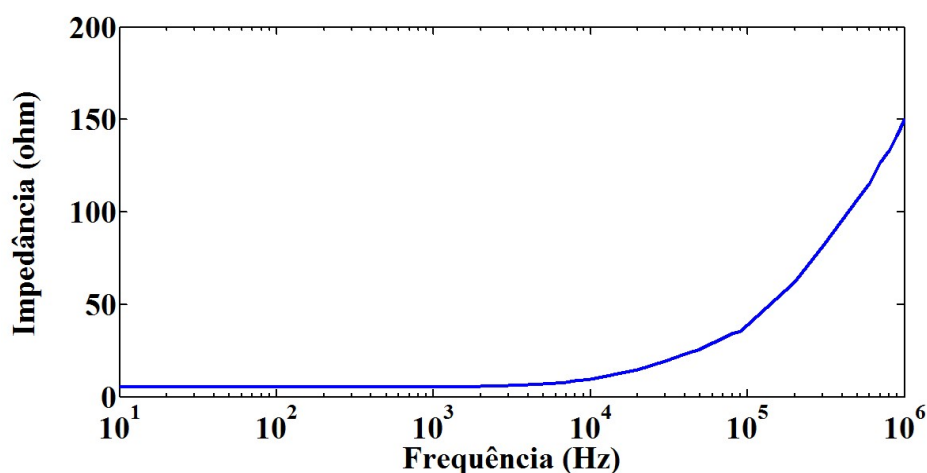


Figura 9 – Impedância da linha aumenta em função da frequência

Fonte: Autor

A diferença de fase entre dois sinais senoidais de mesma frequência é denominada defasagem. A defasagem entre as duas senoides foi medida através do osciloscópio e a partir destes valores o ângulo de defasagem pôde ser obtido, seu gráfico pode ser visto na Figura 10.

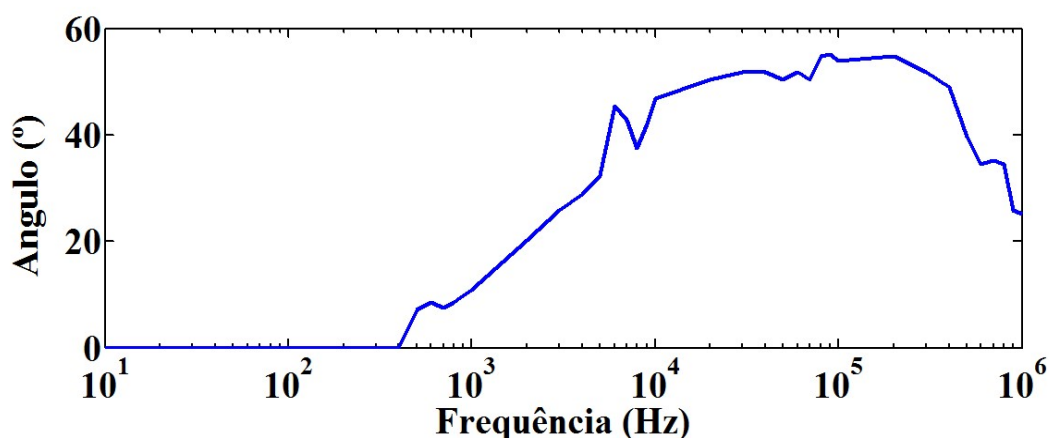


Figura 10 - Representação da fase da linha em função da frequência

Fonte: Autor

Nota-se que inicialmente a fase é nula para frequências abaixo de 500 Hz e para valores de frequência muito acima dessas, a fase aumenta chegando a 57° . Os valores de fase calculados começam a diminuir novamente para valores a partir de 100 kHz.

Utilizando a equação 11, foi possível gerar o gráfico da indutância do circuito analisado em função da frequência. O gráfico obtido é mostrado na Figura 11. Em baixas frequências, o indutor apresenta baixa reatância e tende a se comportar como um curto circuito.

A indutância tem seu pico em valores próximos a 1 kHz e, após essa frequência, a indutância diminui novamente até tornar-se nula para a frequência de 1 MHz. O comportamento observado no gráfico é o esperado ao analisar linhas de transmissão. A indutância tende ao valor de L_0 .

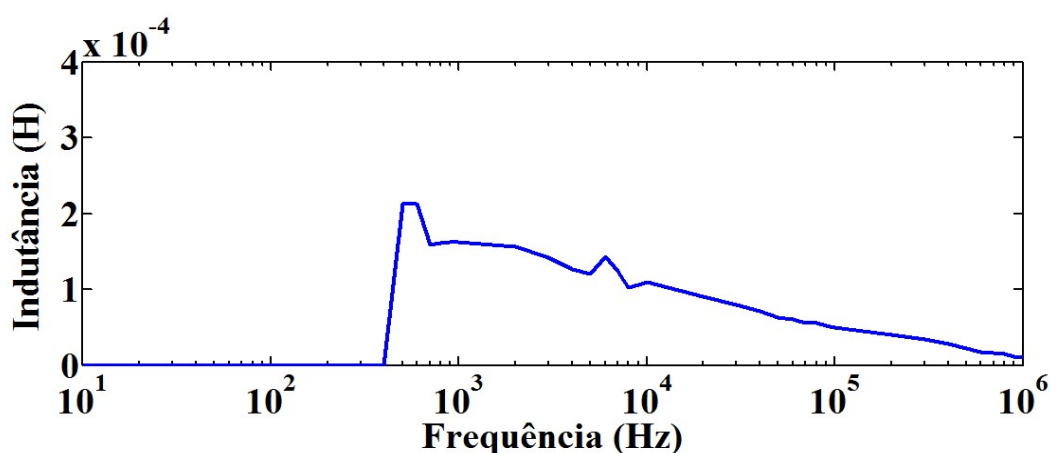


Figura 11 - Gráfico de representação da indutância da linha em função da frequência

Fonte: Autor

4.2 ADIÇÃO DA PARCELA TRANSVERSAL DO MODELO FÍSICO

Dando sequência ao trabalho, foi adicionada a parcela transversal do circuito para que fossem analisadas as tensões de entrada e saída e sua defasagem. Foram também obtidas as formas de onda em FFT para que seja analisada a interferência das harmônicas no sistema.

Utilizando esse circuito foi feita uma varredura de frequência e a cada década de frequência foram analisados os valores de tensão de entrada e saída para que a função transferência do circuito fosse encontrada para cada valor de frequência de

acordo com Tabela 5, encontrada no ANEXO I. Nessa tabela, Entrada_1, Saída_1 e Def_1 correspondem à tensão de entrada, tensão de saída e tempo de defasagem obtidos para apenas uma unidade de circuito π .

A função transferência, cujo gráfico pode ser visto na Figura 12, pôde ser estabelecida experimentalmente introduzindo entradas senoidais conhecidas e analisando as saídas correspondentes.

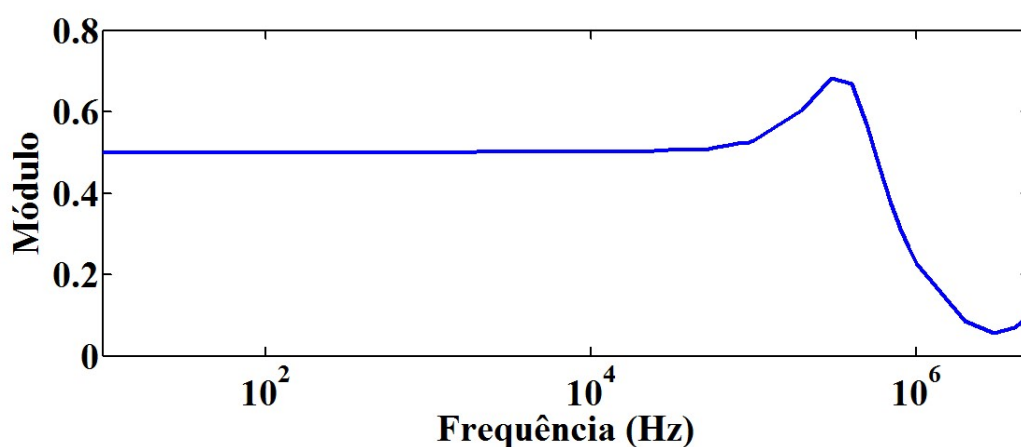


Figura 12 - Função transferência de uma unidade de circuito π

Fonte: Autor

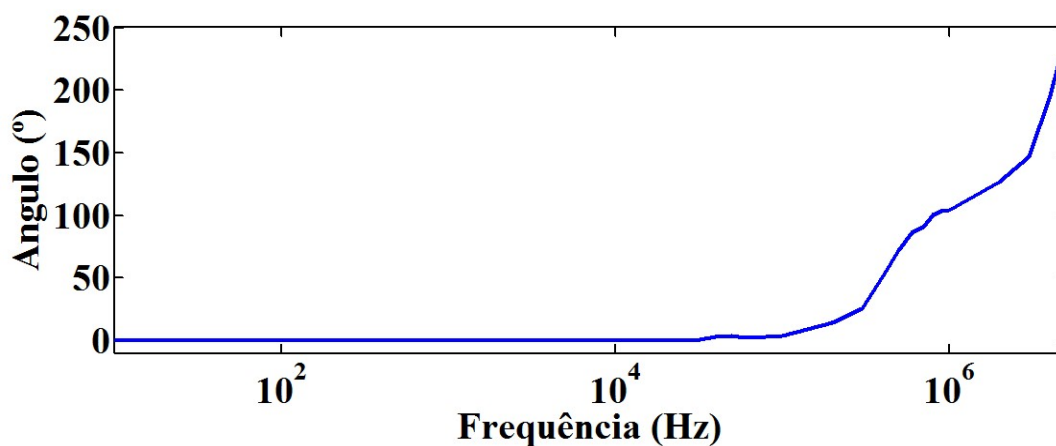


Figura 13 - Representação da fase de uma unidade de circuito π

Fonte: Autor

Analisando o diagrama de Bode, representado pela Figura 12 e pela Figura 13, é possível notar que o módulo da função transferência gerada pelo circuito da Figura 3 é constante e próximo de 0,5 para a maior parte das frequências analisadas.

Observando os dados coletados é possível afirmar que o polo dessa função ocorre para valores de frequência analisadas de 300 kHz. A função tende para valores muito próximos de zero na frequência de 3 MHz.

A fase, apresentada na Figura 13, é nula para valores de frequência menores que 10 kHz e, a partir deste valor, a fase aumenta em comportamento próximo ao exponencial chegando a 250° nas frequências finais de análise.

Na Figura 14, a seguir, a frequência fundamental se encontra exatamente na frequência de análise atual de 900 kHz, contendo ruído com baixa amplitude ao seu redor.

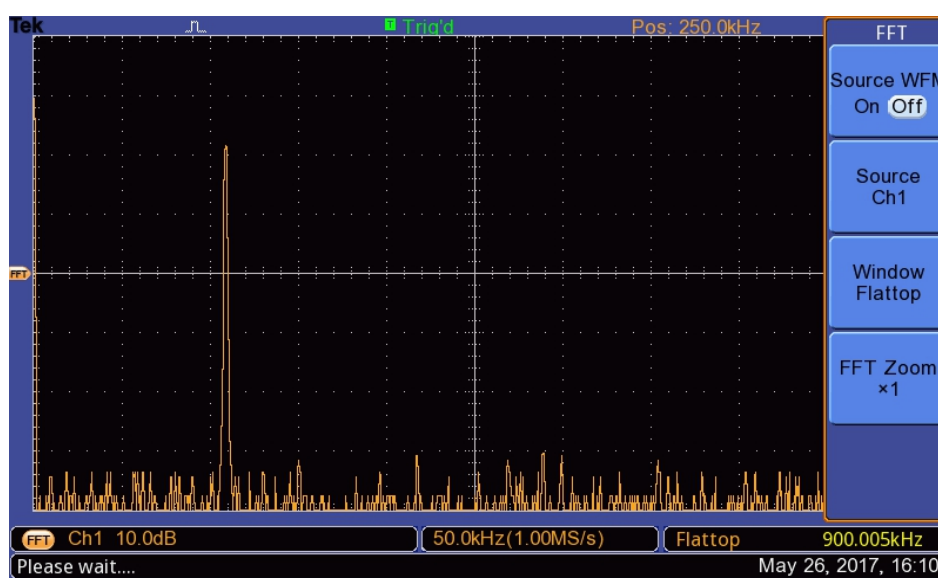


Figura 14 - FFT com pouca presença de ruído em 900 kHz

Fonte: Autor

Com a adição da parcela transversal do circuito π , o sistema apresentava ruído em certas frequências, diferentemente do que foi visto quando apenas a parcela longitudinal do circuito foi analisada. A incidência desse ruído foi observada em laboratório, a partir da análise das formas da FFT obtidas por meio do osciloscópio, como exemplificado pela Figura 14.

Em frequências mais altas nas quais o circuito foi analisado, a partir de 1 MHz até a frequência de 5 MHz, a frequência fundamental do sinal já não podia ser distinguida devido ao ruído presente em grande quantidade ao seu redor. Durante a análise, observou-se que o ruído tomava proporções cada vez maiores conforme a frequência aumentava.

4.3 ANÁLISE DE DUAS UNIDADES DE CIRCUITO π EM CASCATA

Após a análise de uma unidade completa de circuito π , foi feita a montagem da segunda unidade de circuito π , sendo colocada em cascata com a primeira unidade já montada. Foram aplicados ao circuito os componentes comerciais cujos valores mais se aproximavam dos mostrados na Tabela 1 e na Tabela 2. Como dito anteriormente, a adição da segunda unidade de circuito π faz com que novos componentes sejam adicionados devido à associação em cascata entre as unidades.

O modelo citado foi montado em uma *protoboard*, destinada para montagem de circuitos elétricos experimentais. Os dois circuitos, montados em cascata, obedecem à forma de posicionamento conforme Figura 15, de forma com que na unidade transversal intermediária os componentes foram alterados assim como mostrado na Tabela 2.

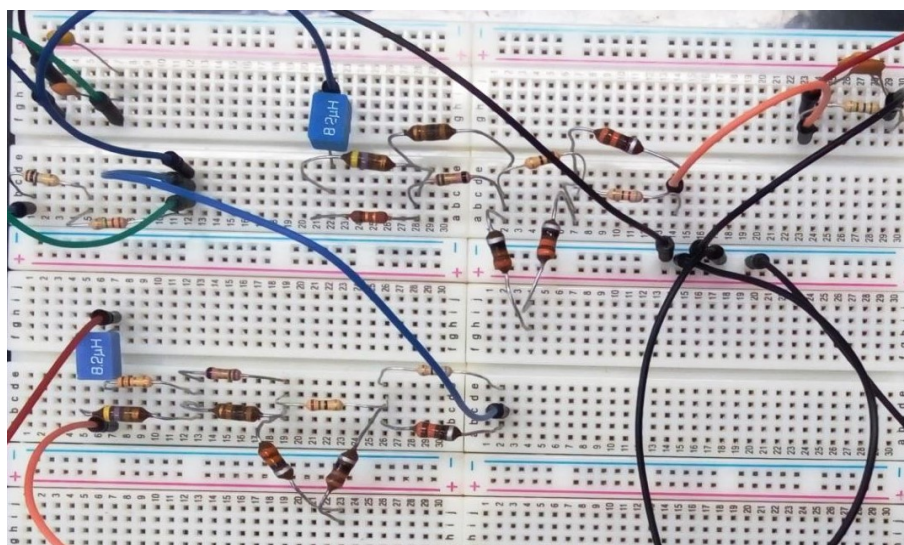


Figura 15 - Montagem de 2 circuitos π em cascata

Fonte: Autor

A *protoboard* é uma base para construção de protótipos de circuitos eletrônicos. Sua grande vantagem na montagem de circuitos eletrônicos é a facilidade de inserção de componentes, uma vez que não há a necessidade de soldagem.

As *protoboards* são projetadas para a realização de montagens

experimentais, porém possuem limitações de ordem prática: baixa capacidade de corrente (cerca de 1A), capacitância e resistência dos contatos internos consideráveis, susceptibilidade à captação de ruídos e interferências, dentre outros fatores.

A susceptibilidade à captação de ruído já constituía um sério problema ao analisar apenas uma unidade de circuito π . Ao observar o comportamento de duas unidades em torno de 5 MHz no osciloscópio, a quantidade de ruído e interferências observadas já foi bastante considerável. É possível que esse comportamento ocorra pois a análise excede as frequências máximas de análise em *protoboard* de aproximadamente 1 MHz.

Outro ponto importante a ser observado é o tamanho do circuito, pois para a análise de linhas de transmissão longas e para que o fenômeno observado fosse o mais próximo possível da realidade, uma maior quantidade de circuitos π deveria ser analisada em cascata. Considerando essa possibilidade, a montagem em *protoboard* de uma quantidade maior de circuitos π seria inviável devido às limitações apontadas anteriormente.

Desta forma, uma vez comprovado o funcionamento de um circuito, o mesmo deveria ser montado em uma placa de circuito impresso, para utilizá-lo em definitivo. Placas de circuitos impressos multicamadas têm melhor desempenho eletromagnético, possibilitam equipamentos menores.

Utilizando as 2 unidades de circuito π em cascata, os valores de tensão de entrada, tensão de saída e o tempo de defasagem entre os sinais foram medidos, sendo considerados 10 valores de frequência por década, de 10 Hz a 5 MHz para que a função transferência do conjunto pudesse ser levantada e comparada com a obtida com apenas uma unidade de circuito π .

A tensão de entrada aplicada foi de 10 Vpp. Estes valores obtidos podem ser vistos e comparados com o obtido com apenas 1 unidade de circuito π na Tabela 5, encontrada no ANEXO I.

Nessa tabela, os valores encontrados para uma unidade de circuito π são comparados com os encontrados para a análise de 2 unidades. Na tabela, Entrada_2, Saída_2 e Def_2 correspondem à tensão de entrada, tensão de saída e tempo de defasagem, obtidos para as duas unidades conectadas em cascata.

Os dados referentes à tensão de entrada, tensão de saída e tempo de defasagem entre as senoides, obtidos a partir do osciloscópio, foram aplicados no

software MatLab. Estes dados são suficientes para a determinação de dois gráficos fundamentais: função transferência dos módulos integrados e seu ângulo.

A seguir serão mostradas as análises efetuadas a partir da inserção de sinais senoidais na entrada do circuito. É interessante observar estas figuras para melhor entendimento dos gráficos futuramente e uma forma de visualizar os dados obtidos na Tabela 5.

Na Figura 16 na qual a análise é feita na frequência de 40 Hz é possível notar que, em frequências consideradas baixas para a prática deste projeto, onde as frequências mais altas apresentam maior importância para o estudo devido aos transitórios eletromagnéticos e o estudo do PLC, não há diferença de tensão entre a senoide de entrada e a senoide de saída. Nessa figura, é impossível distinguir a entrada e a saída do circuito a partir da análise das senoides por esse motivo.

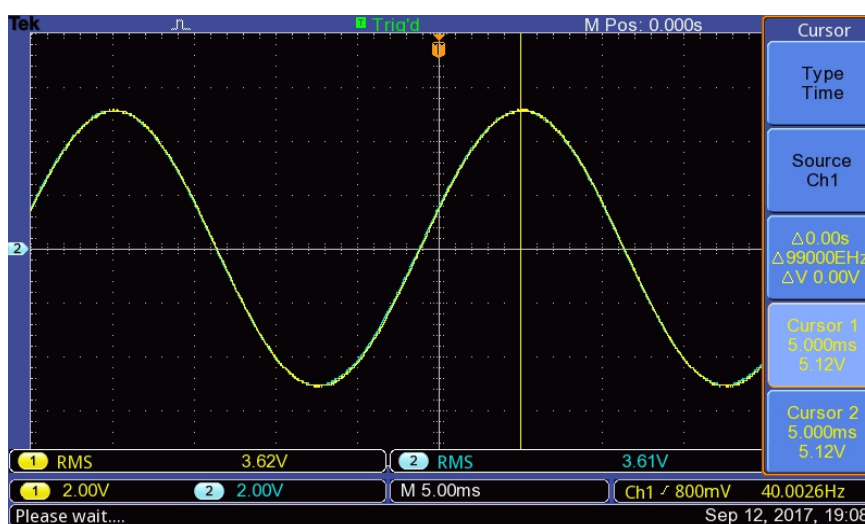


Figura 16 - Entrada e saída em 40 Hz mostrando que não há diferença de tensão entre as senoides

Fonte: Autor

O tempo de defasagem determinará a curva referente ao ângulo da função transferência. A tensão é um ponto a ser observado, pois influenciará diretamente no gráfico de função transferência obtido posteriormente. Na Figura 17, na qual a análise foi feita em 700 Hz, a tensão na entrada e na saída do circuito continuam a mesma.

Este comportamento, de tensões invariáveis na entrada e saída do circuito, permanece até a análise em 1 kHz. Devido a esse comportamento, será observada uma reta no gráfico referente à função transferência. Conforme a frequência

aumenta, neste caso em torno de 700 Hz, é possível medir uma pequena defasagem de tempo entre as ondas de entrada e saída.

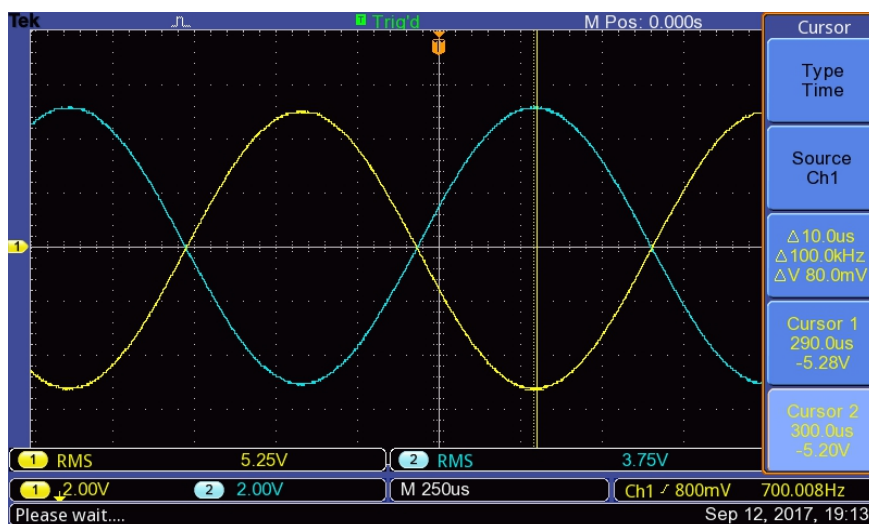


Figura 17 - Entrada e saída em 700 Hz onde ainda não há diferença de tensão entre senoides

Fonte: Autor

A defasagem indica o quanto uma senoide está deslocada no tempo (defasada) em relação à outra tomada como referência. Na Figura 17, a defasagem é de 180° entre a senoide de entrada e a de saída. Nessa imagem, a tensão de entrada é a que apresenta maior amplitude e a tensão de saída é a que apresenta menor amplitude.

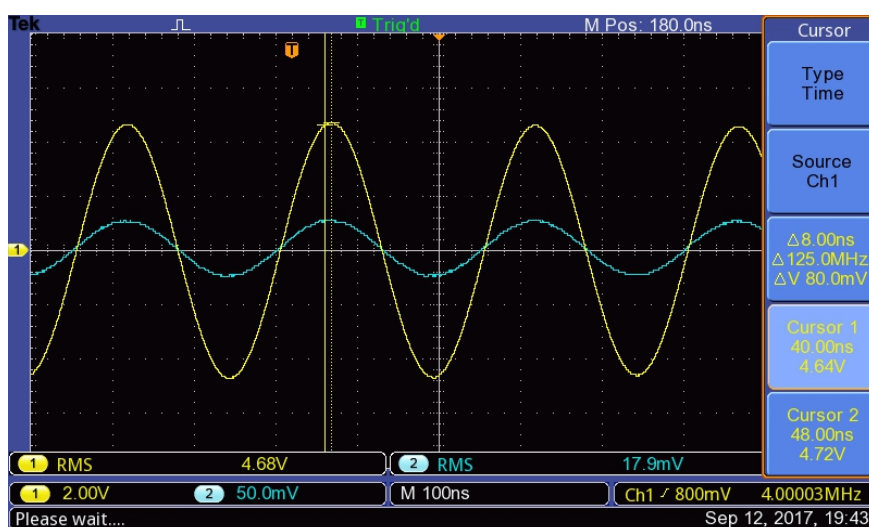


Figura 18 - Entrada e saída em 4 MHz mostrando diferença de tensão significativa entre senoides

Fonte: Autor

Nos valores de frequência finais de testes, em torno de 4 MHz, a defasagem entre as senoides é muito próxima de zero. A diferença na tensão, por sua vez é significativa. A tensão medida é em torno de 4,6 V na entrada e de 0,0182 V na saída.

Ao comparar os dados obtidos com um e dois circuitos π em cascata, é possível notar que as características de funcionamento são semelhantes. A tendência é de que a tensão de saída diminua com o aumento da frequência.

A tensão de saída da primeira e da segunda unidade do circuito π deve ser dividida por 2 ao ser gerado o gráfico de função transferência, devido ao circuito estar em aberto então a corrente na saída é nula.

No osciloscópio, o comportamento do circuito de acordo com a transformada rápida de Fourier (FFT) também foi analisado. A varredura em frequências mostrou que duas unidades em cascata apresentam mais ruído do que quando foi analisada uma única unidade de circuito π . No entanto, continua sendo um ruído desprezível, descartando o que foi observado nas frequências acima de 1 MHz, onde o ruído atingia grandes proporções devido às limitações da *protoboard*.

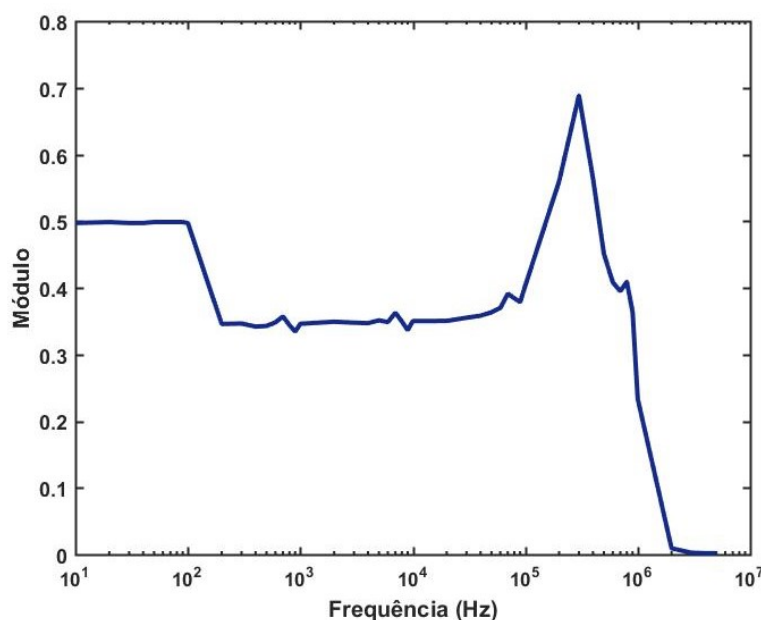


Figura 19 - Gráfico da função transferência de duas unidades de circuito π

Fonte: Autor

O módulo da função transferência, cujo gráfico pode ser visto na Figura 19 pôde ser estabelecido experimentalmente introduzindo entradas senoidais

conhecidas e analisando as saídas correspondentes.

A função transferência obtida com apenas um circuito π , representada na Figura 12, apresentava módulo igual a 0,5 até a frequência de 10 kHz. Ao analisar dois circuitos, a função obtém o módulo de 0.5 apenas até a frequência aproximada de 100 Hz. Acima de 100 Hz, o módulo da função sofre diminuição e se aproxima de 0,3 nas frequências próximas a 250 Hz até 100 kHz passando por leves oscilações. O polo da função do conjunto de circuitos analisado é encontrado na frequência de 300 kHz, o mesmo encontrado para a análise de apenas um circuito π . Após essa frequência, os valores caem gradativamente e são nulos em 2 MHz.

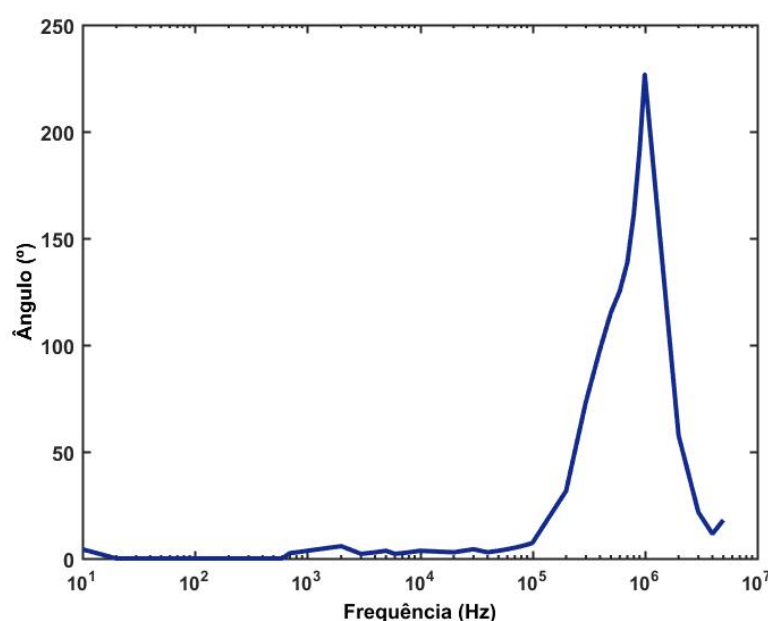


Figura 20 - Gráfico da fase de duas unidades de circuito π

Fonte: Autor

A fase, apresentada na Figura 20 é nula porém apresenta variações mínimas até a frequência de 100 kHz e, a partir deste valor, a fase aumenta chegando em 240° em 1 MHz. Após esse valor de frequência a fase decresce rapidamente, chegando a valores próximos a zero nas últimas frequências analisadas, em torno de 5 MHz.

Comparando com o obtido anteriormente, na análise de apenas uma unidade de circuito π , a fase, ao analisar duas unidades de circuito π permaneceu próxima de zero por mais tempo, permanecendo nula até frequências 10 vezes maiores do que as observadas para uma unidade de circuito π .

O valor máximo de fase foi muito próximo do observado para uma unidade de circuito π , porém ocorreu em 1 MHz. Devido aos problemas apresentados na *protoboard*, a sugestão apresentada consiste na montagem dos circuitos em placa de circuito impresso. O trabalho não contempla essa construção, porém disponibiliza o modelo para projetos futuros.

4.4 CONSTRUÇÃO DE MODELO PARA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Em uma *protoboard* foi possível montar duas unidades de circuito, com possibilidade de adicionar mais uma. Porém, ao considerar a montagem de mais unidades de circuito π é possível avaliar que o tamanho do circuito final seria bastante considerável.

O tamanho do circuito é um ponto importante, pois ao considerar a análise de linhas de transmissão, quanto mais unidades de circuitos π for possível analisar de uma só vez, melhor será a aproximação para linhas de transmissão reais. O modelo para a construção das placas de circuito impresso foi feito no software Proteus, utilizado para projeto de placas de circuito impresso.

O projeto de apenas uma unidade de circuito é mostrado na Figura 21. A placa final teria um tamanho final de 20x30 cm e os circuitos foram colocados no software de forma a ter o melhor aproveitamento de espaço da placa para que fosse possível inserir uma maior quantidade de elementos. A montagem da placa é realizada utilizando uma prototipadora.

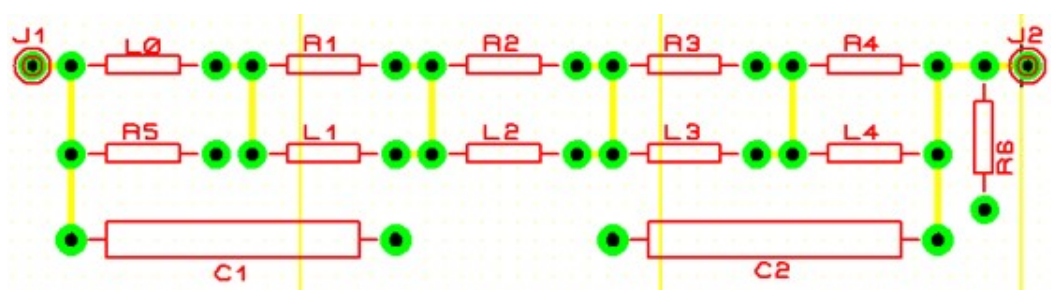


Figura 21 - Projeto de uma unidade de circuito em placa de circuito impresso

Fonte: Autor

O esquema de montagem foi feito de forma com que utilizando pequenos jumpers identificados na Figura 21 como J1 e J2 seria possível conectar uma

unidade à outra. Ou seja, há separação a cada unidade de circuito π .

Essa configuração de montagem é interessante ao serem considerados os objetivos do projeto, pois seria possível analisar a mudança dos gráficos de função transferência a cada unidade adicionada. Assim, seria possível observar o quanto essa análise começa a se aproximar do observado em linhas de transmissão reais conforme são adicionadas mais unidades de circuito π .

Na Tabela 3 pode ser observado um levantamento feito dos componentes comerciais adquiridos para a montagem da placa de circuito impresso. Os componentes são os mais próximos possíveis dos mostrados na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 3 - Elementos adquiridos para a montagem da placa.

Componente	Valor
Resistor	1 Ω
Resistor	1,5 Ω
Resistor	12 Ω
Resistor	82 Ω
Resistor	3 M Ω
Indutor de núcleo de ferrite	8.2 μ H
Indutor de núcleo de ferrite	0,470 mH
Indutor de núcleo de ferrite	0,100mH
Indutor de núcleo de ferrite	0,068mH
Indutor de núcleo de ferrite	0,033mH
Capacitor	7.5 nF

As unidades intermediárias apresentam valores diferentes devido aos componentes colocados em paralelo durante a montagem dos circuitos em cascata. Assim, os componentes comprados já são os equivalentes a essas associações. O projeto da placa está disponível para que novos projetos que contemplem essa análise possam utilizá-lo.

5. SIMULAÇÕES REALIZADAS A PARTIR DO MODELO

Foram realizadas simulações computacionais com o circuito da mesma maneira como ele seria construído em placa de circuito impresso. Uma possibilidade é que essas simulações computacionais feitas possam ser utilizadas para comparações futuras com o circuito impresso, que pode ser construído futuramente por outros alunos de iniciação científica, dando continuidade ao projeto. O circuito foi então montado no software de simulação HFSS (simulador de estruturas de alta frequência) como mostrado na Figura 22.

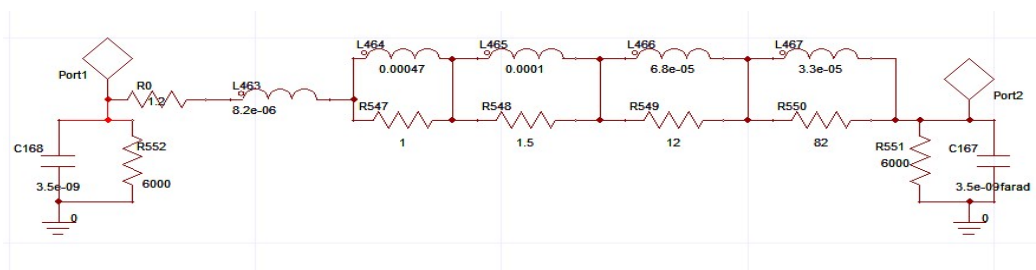


Figura 22 - Circuito montado no HFSS para simulação de grandes quantidades de circuitos π

Fonte: Autor

Os valores de capacitores, indutores e resistores utilizados na montagem do circuito utilizado nas simulações são os mesmos mostrados na Tabela 3. Utilizando o circuito mostrado na Figura 22, foram feitas simulações utilizando quantidades variadas de circuitos π .

No software, na entrada e na saída do circuito, foram colocadas portas genéricas e foi feita a varredura no domínio da frequência de 10 Hz a 5 MHz utilizando 47 pontos por década na varredura em frequência conforme será mostrado em cada análise posterior.

A partir disso, foram gerados resultados para a análise da função transferência com relação às tensões de saída e de entrada. Os valores são apresentados em unidades de decibéis (dB). Na Figura 23, é possível observar o gráfico obtido com a simulação de 1 unidade de circuito π . No gráfico é possível notar que houve um decaimento de -2 dB na frequência de 100 kHz, nessa análise o envio de dados via PLC em banda estreita seria possível.

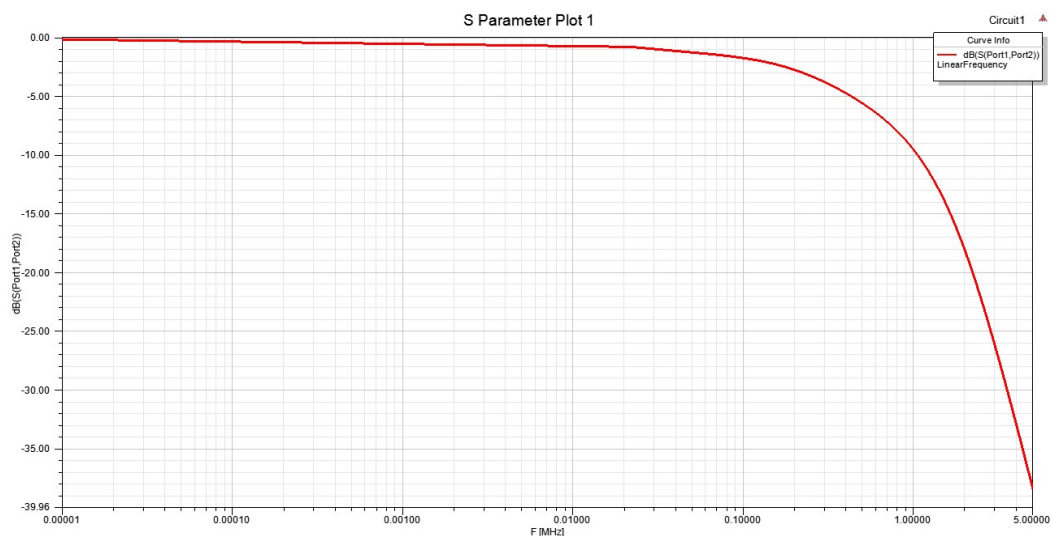


Figura 23 – Unidade de circuito π mostrando atenuação de -10 dB em 1 MHz

Fonte: Autor

Após ter sido feita a análise com 1 circuito π , foi analisada uma cascata contendo 5 circuitos, variando a frequência entre 10 Hz e 5 MHz foi possível obter o gráfico mostrado na Figura 24.

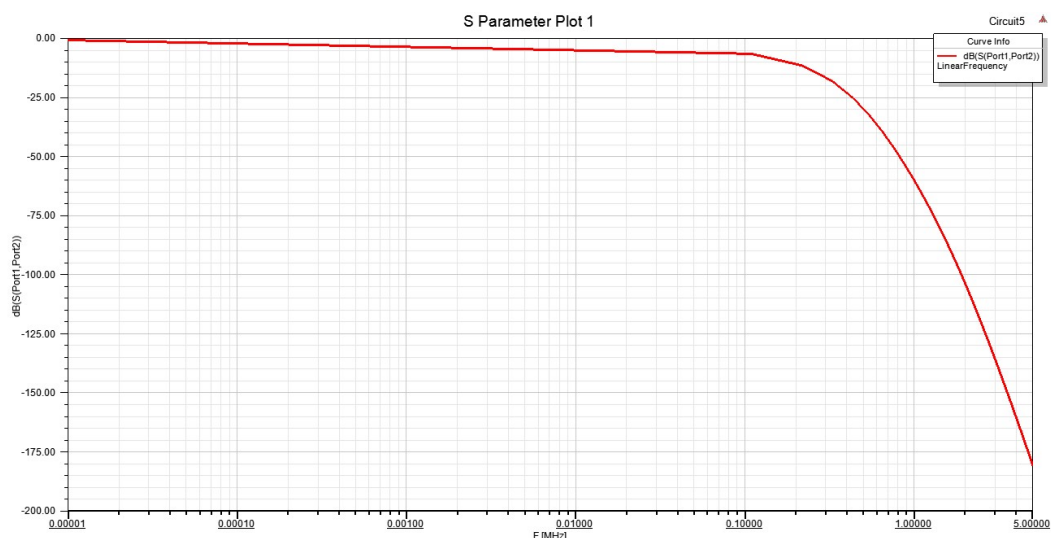


Figura 24 - Cascata de 5 circuitos π mostrando atenuação de -55 dB em 1 MHz

Fonte: Autor

Ao comparar a Figura 23 com a Figura 24, é possível observar que a faixa de frequências em que o gráfico apresenta comportamento linear é ligeiramente maior e o decaimento na amplitude é mais significativo do que o observado na Figura 23. Em 100 kHz, o decaimento é próximo de -10 dB, mais significativo do que o observado

com apenas 1 unidade de circuito π . Ao adicionar mais unidades de circuito π em cascata no modelo, o esperado é que esse comportamento continue, pois a quantidade de circuitos π é aumentada gradativamente e o circuito se comporta como um filtro.

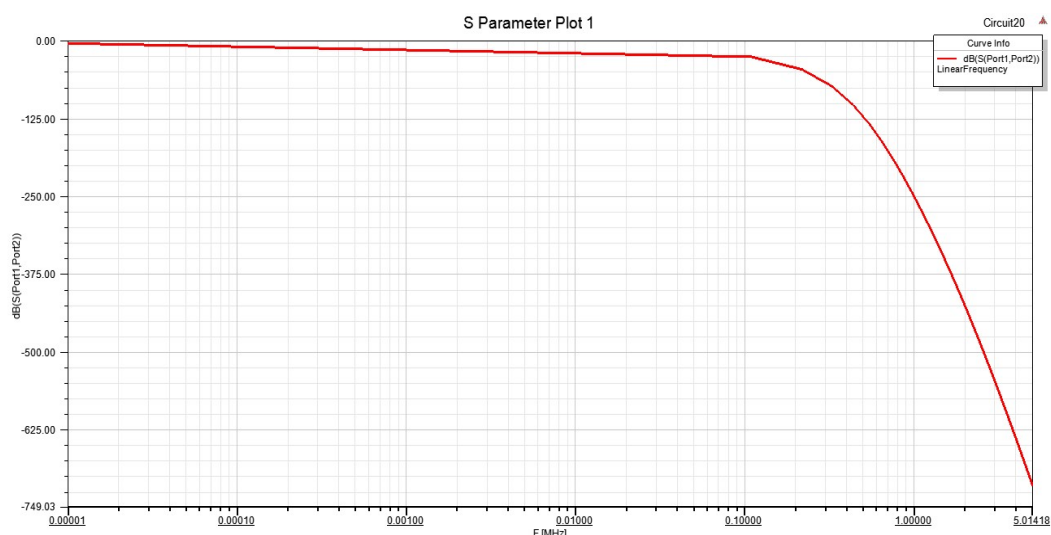


Figura 25 - Cascata de 20 circuitos π mostrando atenuação de -250 dB de atenuação em 1 MHz

Fonte: Autor

Ao observar o gráfico obtido a partir de simulações com 20 circuitos π , mostrado na Figura 25, é possível observar que a queda na amplitude é mais brusca do que ocorria anteriormente, tendo -250 dB de atenuação em torno de 1 MHz.

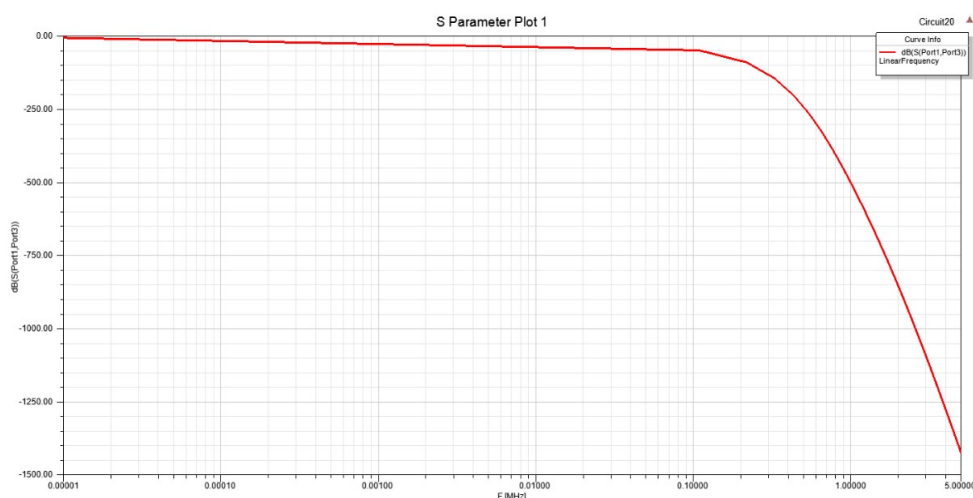


Figura 26 - Cascata de 40 circuitos π analisado contendo -500 dB de atenuação em 1 MHz

Fonte: Autor

Na Figura 26 é mostrada a análise de 40 circuitos em cascata. Nesse caso, o comportamento permanece como o observado nas outras simulações, com quantidades menores de circuitos π . A queda em amplitude é ainda mais brusca do que o observado anteriormente, sendo em torno de -500 dB em 1 MHz.

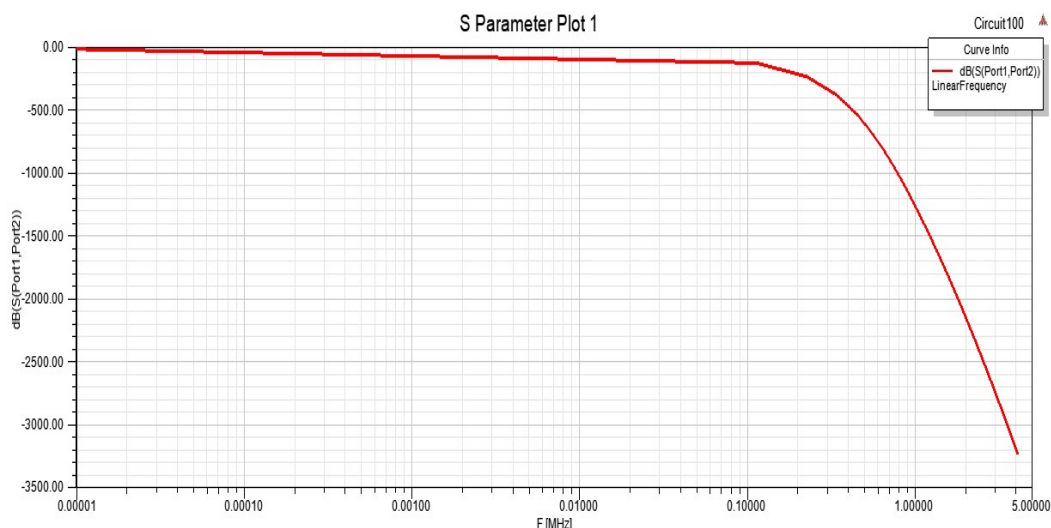


Figura 27 - Cascata de 100 circuitos π analisado contendo -1500 dB de atenuação em 1 MHz

Fonte: Autor

A análise de 100 circuitos π em cascata, como indicado na Figura 27, mostrou que o comportamento observado anteriormente se manteve. A queda em amplitude se torna cada vez maior, tornando o envio de dados uma tarefa impossível nestas condições, devido à altíssima atenuação percebida a partir dos gráficos, sendo em torno de -1300 dB em 1 MHz.

Os gráficos das simulações obtidas a partir da análise de 100 circuitos π em cascata foram incluídos nesse trabalho para fins de observação do comportamento do modelo na varredura em frequência, visto que essa atenuação é extremamente alta, o que inviabilizaria qualquer tipo de transmissão considerando o modelo analisado.

Todas as simulações que sucedem a análise de 100 circuitos π em cascata podem ser desconsideradas na análise da linha como sendo um meio para transmissão de dados. Uma possível justificativa para esse comportamento é o fato de que o projeto inicial desse trabalho foi feito de forma com que 150 circuitos π em cascata pudessem ser utilizados para representar uma linha de transmissão para transmissão de energia elétrica de 100 km de extensão. Dessa forma, as condições

iniciais previstas foram extrapoladas.

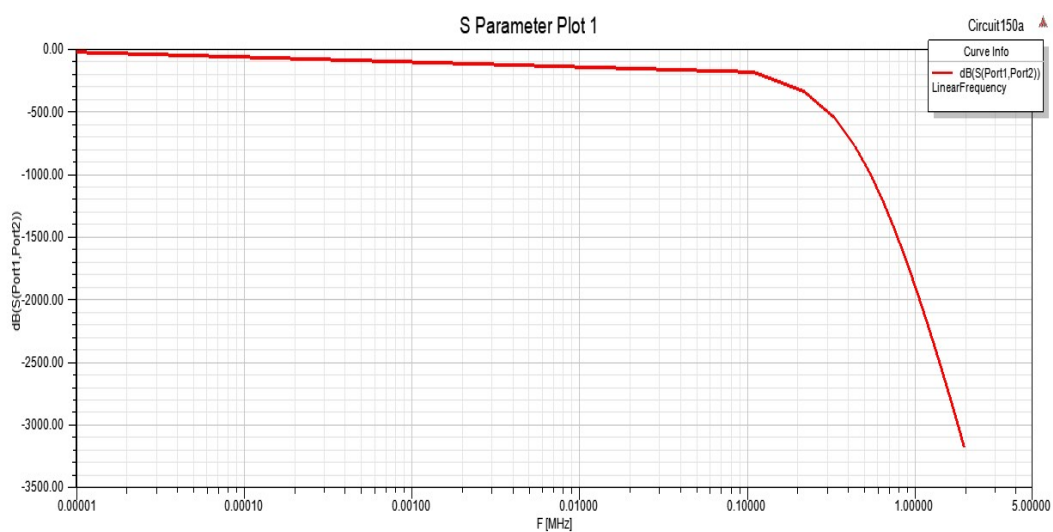


Figura 28 - Cascata de 150 circuitos π com atenuação de -2000 dB em 1 MHz

Fonte: Autor

Ao analisar 150 circuitos π em cascata, como visto na Figura 28, a atenuação observada na simulação é em torno de -2000 dB.

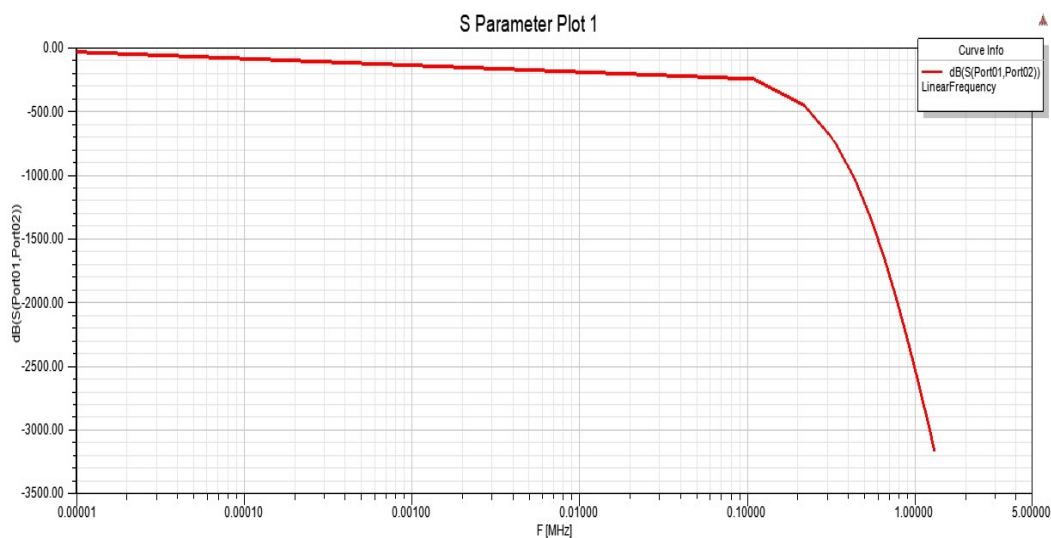


Figura 29 - Cascata de 200 circuitos π mostrando atenuação de -3000 dB em 1 MHz

Fonte: Autor

Seriam necessários estudos adicionais para verificar qual a modificação necessária na modelagem dessas linhas para que oferecesse uma boa aproximação para sistemas PLC.

No modelo utilizado nas simulações, não foi considerada nenhuma forma de recuperação do sinal, como o uso de repetidores. O comportamento permanece o mesmo ao analisar 200 e 250 circuitos π em cascata, como mostrado na Figura 29 e na Figura 30

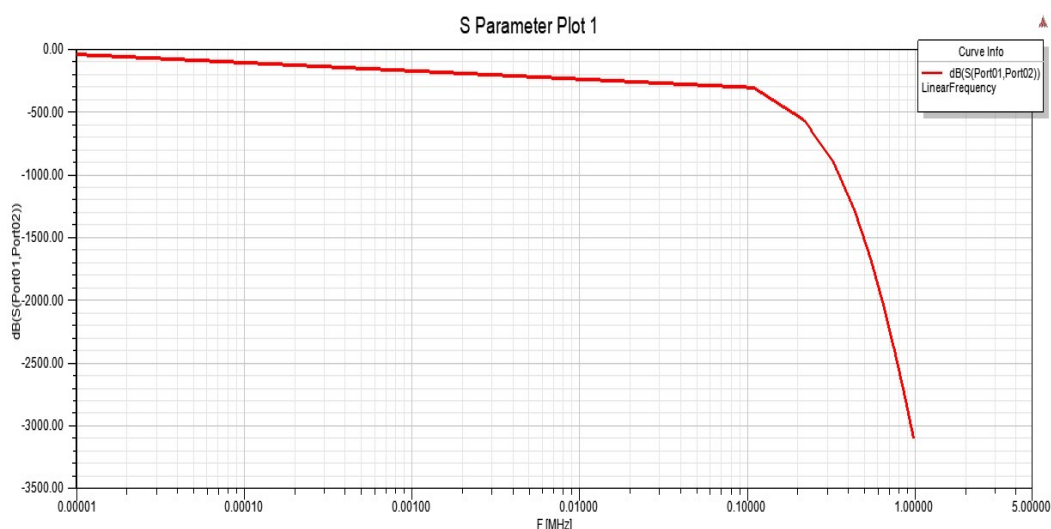


Figura 30 - Cascata de 250 circuitos π com atenuação de -3000 dB em 1 MHz

Fonte: Autor

Considerando que o circuito seja uma simulação de redes nas quais é feita a transmissão de energia elétrica, essa queda em amplitude observada nas simulações não causaria problemas visto que a transmissão de energia elétrica ocorre em baixas frequências, em torno de kHz

O trabalho apresenta uma aproximação satisfatória para a transmissão de sinais PLC em banda estreita, nos quais a transmissão de dados ocorre na faixa de frequências compreendida entre 9 e 95 kHz, na qual não foram observadas atenuações tão altas, que impossibilitariam por si só o envio de dados nessas frequências. Seria preciso verificar se há outras limitações na faixa de frequências analisada que impossibilitariam o envio de informações.

Porém, ao analisar o circuito como sendo uma aproximação para sistemas PLC em banda larga, nos quais os dados são transmitidos em altas frequências (HF), cuja faixa compreende as frequências entre 1 e 30 MHz, essa atenuação é bastante significativa, o que impossibilitaria o envio de dados.

6. CONCLUSÃO

Os estudos de linhas de transmissão têm grande importância, destacando entre outras análises, cálculos de fluxo de carga, determinação de níveis de curto-circuito e modelagem de fenômenos eletromagnéticos. A cascata de circuitos π utilizada neste trabalho é um modelo simples para linhas de transmissão que pode ser facilmente assimilado por alunos de graduação para o estudo de linhas pelas quais são conectados centros geradores e centros consumidores em sistemas de potência.

Para uma análise mais realista, foi considerada a inserção do efeito da frequência na linha, que foi realizada por meio da inclusão de blocos RL paralelo nos circuitos π . Para que os resultados apresentados sejam mais próximos da realidade observada em linhas de transmissão, foi sugerida a construção de uma cascata com quarenta unidades de circuitos π em placa de circuito impresso para diminuir os erros relacionados a ruídos e interferências observados quando a montagem foi feita em *protoboard*.

O estudo de transitórios eletromagnéticos é de grande importância, pois é possível, mediante uma proteção adequada, prevenir os danos que esses distúrbios causam no sistema elétrico. Por se tratar de um fenômeno imprevisível e de difícil solução analítica, utilizam-se programas computacionais capazes de simular essas ocorrências. Assim, é possível determinar as magnitudes das grandezas elétricas envolvidas para determinada situação, como um curto-circuito, e, assim, adotar medidas para a prevenção de possíveis danos decorrentes dessas situações.

Na análise dos circuitos a partir de software computacional, foi observada uma grande atenuação na faixa de frequências pretendida para a transmissão de dados por linhas de transmissão, considerando PLC em banda larga, quando a quantidade de circuitos π em cascata é aumentada. Essa atenuação impossibilita o envio de dados em PLC banda larga ao considerar o modelo atual analisado.

Dessa forma, considerando o envio de dados, seria preciso trabalhar em faixas de frequências mais baixas. Considerando o PLC em banda estreita no qual o envio de dados ocorre entre 9 e 95 kHz seria possível enviar dados por essas linhas considerando a possibilidade de uso de repetidores. Porém, seria necessário estudar a possibilidade de adequação do modelo para uma melhor representação da

linha, incluindo dispositivos para recuperação do sinal, se possível. O modelo desenvolvido pode ser considerado uma boa aproximação para linhas de transmissão em situações onde os dados serão enviados a curtas distâncias.

Além disso, a resistência inicial do modelo físico em desenvolvimento é alta quando comparada a linhas de transmissão. Uma opção seria buscar meios para diminuir a resistência inicial do modelo físico, adequando-a ao observado em sistemas reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMPERION INC (United States). Paul Anthony Brown. Electricity distribution and/or power transmission network and filter for telecommunication over power lines. USA nº US5684450A, 26 abr. 2004, 07 nov. 1996. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US5684450A/en>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

Andrade, P. R., Monzani, R. C., Lessa, L. S., Ingelbinck, T., Prado, A. J., Pissolato Filho, J., Bovolato, L. F. (2013), **“Physical model for representing transmission lines by undergraduate students”**, The 10th Latin-american Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2013, CD-ROM, 5 pp.

Berardo, Benício Luiz. **Estudo do aterramento dos pés de torres de linha de transmissão frente às descargas atmosféricas**. 2012. 58 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/87185>>.

Dommel, H. W. (1969). **“Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks”**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 4; pp. 388-399

Dommel, H. W. (1986). **“Electromagnetic Transients Program Reference Manual”**, Department of Electrical Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Lima, A. C. S., A. B. Fernandes and S. Carneiro (2005). **“Rational Approximation of Frequency Domain Responses in the S and Z Planes”**. Proc. of the 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, California, USA.

Mácias, J. A. R., A. G., Expósito and A. B. Soler (2005). **“A Comparison of Techniques for State-Space Transient Analysis of Transmission Lines”**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2; pp. 894-903.

Mamis, M. S. (2003). **“Computation of Electromagnetic Transients on Transmission Lines with Nonlinear Components”**. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 150, NO. 2; pp. 200-203.

Mamis, M. S. and A. Nacaroglu (2003). **“Transient Voltage and Current Distributions on Transmission Lines”**. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149, NO. 6; pp. 705-712.

Marti, L. (1983). **“Low-Order Approximation of Transmission Line Parameters for Frequency-Dependent Models”**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 11; pp. 3582-3589.

Marti, L. (1988). **“Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices”**.

Meng, H. & Guan, Yong & Law, Choi & So, P.L. & Gunawan, E. & Lie, Tek Tjing. (2002). **“A transmission line model for high-frequency power line communication channel”**. 2. 1290 - 1295 vol.2. 10.1109/ICPST.2002.1047610.

Moreira, A. C.; Pereira, T.G.; Jús, L.H.; Santos, M.O.; Prado, A. J. (2017). **“Physical model of transmission lines with additional branches to introduce the influence of the frequency”**. XII Latin american Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2017, CD-ROM, 5 pp.

Nelms, R. M., G. B. Sheble, S. R. Newton and L. L. Grigsby (1989). **“Using a Personal Computer to Teach Power System Transients”**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3; pp. 1293-1297.

Paulillo, G. Teixeira, D. Bacca, Ivandro. **Transitórios**. O Setor Elétrico. Ed. 94, Cap XI. 2013.

Pereira, T. G., Moreira, A. C., Grilo, C. V. C., Menzinger, J. S., Ferreira, A. A., Prado, A. J., Scheuer, R. (2018). **“Laboratory tests with model based on π circuits considering the introduction of branches composing by RL parallel elements”**, International Telecommunications Energy Conference - INTELEC 2018, 6 pp..

Pereira, T. G., Moreira, A. C., Prado, A. J., Ferreira, A. A., Pissolato Filho, J. (2017). **“Laboratorial tests with transmission line model based on modified π circuits”**, The 38th Progress in Electromagnetics Research Symposium - PIERS 2017, 2017, CD-ROM, vol.1, 7 pp., 22-25.

Prado, A. J., . Besspalhulk, K. J., Silva, B. F, Conceição, K. O., . Cargnin-Stieler, M., Gennaro, E. M., Pissolato Filho, J. (2017). **“Influences of Damping Resistances on Transient Simulations in Transmission Lines”**, Progress Electromagnetics Research B –PIER B, vol. 75, no. 1, pp. 27-39.

Prado, A. J., Lessa, L. S., Monzani, R. C., Bovolato, L. F., Pissolato Filho, J. (2014). **“Modified routine for decreasing numeric oscillations at associations of lumped elements”**, Electric Power Systems Research, vol. 112, no. 1, pp. 56-64.

Quantos quilômetros de linha de transmissão de energia temos no Brasil. CBIE, 18 de abril de 2019. Disponível em: < <https://cbie.com.br/artigos/quantos-quilometros-de-linha-de-transmissao-de-energia-temos-no-brasil/>>. Acesso em: 04 de novembro de 2019.

Sarto, M. S., A. Scarlatti and C. L. Holloway (2001). **“On the Use of Fitting Models for the Time-Domain Analysis on Problems with Frequency-Dependent Parameters”**. Proc. of the 2001 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Montreal, Canada, pp. 588-593.

Técnicas Utilizadas pelo PLC. Teleco. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialbpl1/pagina_3.asp>. Acesso em: 04 de novembro de 2019.

ANEXO I

Tabela 4 - Tensão, corrente e defasagem angular na parte longitudinal do modelo físico

Frequência (Hz)	Vrms (V)	Irms (A)	Defasagem(°)
1E+01	1,42	0,15	1,44
2E+01	1,42	0,15	2,88
3E+01	1,46	0,14	4,32
4E+01	1,36	0,14	5,76
5E+01	1,42	0,15	3,6
6E+01	1,32	0,15	4,32
7E+01	1,32	0,15	5,04
8E+01	1,34	0,16	5,76
9E+01	1,38	0,15	6,48
1E+02	1,38	0,15	7,2
2E+02	1,38	0,15	5,76
3E+02	1,36	0,15	4,32
4E+02	1,38	0,15	5,76
5E+02	1,4	0,15	7,2
6E+02	1,38	0,15	8,64
7E+02	1,36	0,15	10,08
8E+02	1,36	0,14	11,52
9E+02	1,38	0,14	12,96
1E+03	1,42	0,14	14,4
2E+03	1,54	0,14	20,16
3E+03	1,72	0,14	30,24
4E+03	1,88	0,14	28,8
5E+03	2,02	0,14	36
6E+03	2,14	0,14	34,56
7E+03	2,24	0,14	35,28
8E+03	2,3	0,13	40,32
9E+03	2,36	0,13	38,88
1E+04	2,42	0,13	43,2
2E+04	2,98	0,13	50,4
3E+04	3,64	0,13	60,48
4E+04	4,2	0,11	74,88
5E+04	4,72	0,10	79,2
6E+04	5,2	0,09	86,4
7E+04	5,68	0,07	95,76
8E+04	6,08	0,08	92,16
9E+04	6,24	0,03	97,2
1E+05	6,4	0,02	50,4
2E+05	6,88	0,06	14,4
3E+05	7,04	0,01	12,96
4E+05	7,12	0,00	17,28
5E+05	7,2	0,01	18
6E+05	7,28	0,01	21,6
7E+05	7,44	0,01	20,16
8E+05	7,44	0,01	23,04
9E+05	7,52	0,01	25,92
1E+06	7,6	0,01	28,8

Tabela 5 - Dados obtidos a partir da análise de 2 circuitos π em cascata

Frequência (Hz)	Entrada_1	Entrada_2	Saida_1	Saida_2	Def_1	Def_2
1E+01	3,62	3,62	3,64	3,6	0	0
2E+01	3,63	3,62	3,62	3,61	0	0
3E+01	3,63	3,62	3,62	3,6	0	0
4E+01	3,63	3,62	3,62	3,6	0	0
5E+01	3,63	3,62	3,62	3,61	0	0
6E+01	3,63	3,62	3,62	3,61	0	0
7E+01	3,63	3,62	3,62	3,61	0	0
8E+01	3,63	3,62	3,62	3,61	0	0
9E+01	3,5	3,62	3,49	3,61	0	0
1E+02	3,63	3,63	3,62	3,61	0	0
2E+02	3,63	5,22	3,62	3,61	0	0
3E+02	3,63	5,21	3,62	3,61	0	0
4E+02	3,62	5,28	3,61	3,61	0	0
5E+02	3,62	5,28	3,61	3,62	0	0
6E+02	3,62	5,2	3,61	3,62	0	0
7E+02	3,62	5,25	3,61	3,75	0	1,00E-005
8E+02	3,61	5,26	3,61	3,62	0	1,00E-005
9E+02	3,66	5,25	3,65	3,51	0	1,00E-005
1E+03	3,61	5,23	3,61	3,62	0	1,00E-005
2E+03	3,6	5,27	3,61	3,68	0	8,00E-006
3E+03	3,6	5,32	3,61	3,7	0	2,00E-006
4E+03	3,6	5,36	3,61	3,72	0	2,00E-006
5E+03	3,6	5,31	3,61	3,73	0	2,00E-006
6E+03	3,6	5,35	3,61	3,73	0	1,00E-006
7E+03	3,6	5,35	3,61	3,88	0	1,00E-006
8E+03	3,6	5,35	3,61	3,74	0	1,00E-006
9E+03	3,6	5,38	3,61	3,62	0	1,00E-006
1E+04	3,6	5,34	3,61	3,74	0	1,00E-006
2E+04	3,6	5,38	3,62	3,77	0	4,00E-007
3E+04	3,59	5,35	3,63	3,8	0	4,00E-007
4E+04	3,59	5,36	3,64	3,84	2,00E-007	2,00E-007
5E+04	3,59	5,34	3,64	3,88	2,00E-007	2,00E-007
6E+04	3,56	5,3	3,65	3,92	1,00E-007	2,00E-007
7E+04	3,55	5,28	3,67	4,13	1,00E-007	2,00E-007
8E+04	3,53	5,23	3,68	4,02	1,00E-007	2,00E-007
9E+04	3,49	5,19	3,65	3,93	1,00E-007	2,00E-007
1E+05	3,48	5,11	3,69	4,12	1,00E-007	2,00E-007
2E+05	3,04	3,84	3,68	4,3	2,00E-007	4,40E-007
3E+05	2,46	2,44	3,36	3,36	2,40E-007	6,80E-007
4E+05	2,1	2,1	2,81	2,37	3,60E-007	6,80E-007
5E+05	2	1,95	2,27	1,76	4,00E-007	6,40E-007
6E+05	2,01	1,69	1,85	1,38	4,00E-007	5,80E-007
7E+05	2,03	1,38	1,52	1,09	3,60E-007	5,50E-007
8E+05	2,03	1,11	1,27	9,08E-001	3,50E-007	5,60E-007
9E+05	2,02	1,05	1,08	7,64E-001	3,20E-007	5,90E-007
1E+06	1,98	1,27	9,05E-001	5,93E-001	2,90E-007	6,30E-007
2E+06	1,29	3,84	2,19E-001	7,11E-002	1,76E-007	8,00E-008
3E+06	7,00E-001	4,7	7,70E-002	2,45E-002	1,36E-007	2,00E-008
4E+06	3,06E-001	4,68	4,22E-02	1,82E-002	1,36E-007	8,00E-009
5E+06	1,80E-001	4,5	3,62E-02	1,62E-002	1,36E-007	1,00E-008