

2018

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

THAINÁ GUIMARÃES PEREIRA

**Modelo Físico de Linhas de Transmissão: Desenvolvimento em Placas de Circuito
Impresso**

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2018

THAINÁ GUIMARÃES PEREIRA

**Modelo Físico de Linhas de Transmissão: Desenvolvimento em Placas de Circuito
Impresso**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
como requisito para obtenção de título de Bacharel em
Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Afonso José do Prado

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada à fonte.

Pereira, Thainá Guimarães

Modelo físico de linhas de transmissão: desenvolvimento em placas de circuito impresso / Thainá Guimarães Pereira. -- São João da Boa Vista, 2018.
45 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. Circuitos elétricos 2. Linhas de transmissão 3. Sistemas lineares 4. Telecomunicações 5. 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 DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Modelo Físico de Linhas de Transmissão: Desenvolvimento em Placas de Circuito
Impresso**

Aluno: Thainá Guimarães Pereira

Orientador: Prof. Dr. Afonso José do Prado

Banca Examinadora:

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

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 45/2018)

São João da Boa Vista, 19 de dezembro de 2018

DADOS CURRICULARES

THAINÁ GUIMARÃES PEREIRA

NASCIMENTO

01/03/1996 – Belo Horizonte / MG

FILIAÇÃO

Silvio Pereira

Heliana Grijó Guimarães Pereira

2014/2018

Curso de Graduação – Engenharia de Telecomunicações

Campus Experimental de São João da Boa Vista

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Dedico este trabalho aos meus avós Hédio e Nathail, pois, sem vocês, nada disso seria possível. Obrigada por acreditarem no meu potencial e me apoiarem nessa decisão. Eu amo vocês e que Deus lhes abençoe.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus por estar sempre presente em minha vida, me iluminando e protegendo. Por me fortalecer nos momentos mais difíceis e nas decisões mais importantes. Agradeço também à minha mãe, Heliana, por sua dedicação exclusiva durante toda minha vida, pelo apoio, conselho, amor. Sem você não teria forças para seguir adiante. Agradeço à minha irmã, Luanna, pelo incentivo, amor e paciência durante todos esses anos. Obrigada por me permitir ser madrinha do nosso maior tesouro, Liz, que mudou as nossas vidas desde o momento da descoberta da sua gravidez e por ela, o meu amor é incondicional. Agradeço aos meus avós por me permitirem realizar esse sonho. Sem vocês isso não seria possível. Agradeço ao meu pai, Silvio, e a todo o restante da minha família pela confiança, apoio e torcida. Vocês me incentivam ser uma pessoa melhor. Agradeço a todos os meus amigos que lutaram comigo durante todos esses anos. Muito obrigada a todos os professores e funcionários da UNESP – São João da Boa Vista. E por fim, não menos importante, ao meu orientador Afonso José do Prado. Obrigada por todos os conselhos, incentivo e carinho durante 3 anos de orientação. Você se tornou muito especial na minha vida e nunca irei esquecer tudo que fez por mim. A minha jornada acadêmica, sem dúvidas será marcada por seus ensinamentos e parceria. Muito obrigada!

Este trabalho contou com o apoio da seguinte entidade:

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo cujo número do processo é 2016/02559-3.

“O Senhor é o meu pastor, nada me faltará.” –
Salmo 23

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de módulos de um modelo físico de linha de transmissão. O modelo usa representação monofásica baseada em circuitos π modificados. A estrutura do circuito π clássico não considera a influência de frequência e isso causa erros significativos nos cálculos de correntes e tensões propagadas pela linha, principalmente em fenômenos transitórios ou para fenômenos de alta frequência. Assim, na estrutura clássica do circuito, blocos RL paralelos podem ser inseridos para simular a influência da frequência nos parâmetros da linha de transmissão. No estágio atual de desenvolvimento do trabalho, vinte e quatro unidades de circuito π foram modeladas em placas de circuito impresso (PCB) e além disso, duzentas e cinquenta unidades π de circuito foram modeladas no software HFSS. Uma comparação foi feita entre os resultados obtidos pelo modelo físico e pelos resultados referentes ao software. As características de resistência e indutância dos parâmetros longitudinais foram obtidas em função da frequência. Os diagramas de Bode (módulo e ângulo) também foram obtidos para a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada das unidades de circuito π . No software, apenas os diagramas de Bode foram obtidos.

Uma maneira de modelar as linhas de transmissão é aplicar cascatas de circuito π . Na prática, é impossível realizar testes em linhas reais que transmitam grandes blocos de energia elétrica. Este modelo pode consistir em resistores, indutores e capacitores.

Com o incremento do número de circuitos π aumenta a precisão dos resultados obtidos, pois uma unidade do circuito π não representa uma linha de transmissão.

Palavras-chave: Transitórios eletromagnéticos, sistema linear, modelo de linha de transmissão, circuito π .

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the behavior of modules of a physical transmission line model. The model uses single-phase representation based on modified π circuits. The classical π -circuit structure does not consider frequency fluency and this causes significant errors in the calculations of currents and voltages propagated by the line mainly in transients or for high-frequency phenomena. Thus, in the classical circuit structure π parallel RL blocks can be inserted to simulate the influence of the frequency on the transmission line parameters. In the current stage of development of the work, twenty four π circuit units were assembled in printed circuit board (PBC) and two hundred and fifty π circuit units were assembled in software HFSS for comparison. The resistance and inductance characteristics of the longitudinal parameters were obtained as a function of frequency. The Bode (module and angle) diagrams were also obtained for the relation between the output voltage and the input voltage of the π circuit units. In the software just the Bode diagrams were obtained.

One way to model the transmission lines is applying π circuit cascades. In practice, it is impossible to carry out tests in actual lines that transmit large blocks of electrical power. This model may consist of resistors, inductors and capacitors.

Increasing the number of π circuits increases the accuracy of the obtained results. For a unit of the circuit π does not represent a transmission line.

Keywords: Transients eletromagnetics, linear systems, transmission line modelling, π circuit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Linha de transmissão representada por cascata de circuitos π com parâmetros independentes da frequência.....	19
Figura 2 – Inserção do efeito da frequência em uma unidade do circuito π	19
Figura 3 – Circuito utilizado na síntese dos parâmetros unitários da linha.....	20
Figura 4 – Unidade do circuito π completa.....	21
Figura 5 – Variação da resistência da parte longitudinal do circuito π em função da frequência.....	23
Figura 6 – Variação da indutância da parte longitudinal do circuito π em função da frequência.....	24
Figura 7 – Função transferência em função da frequência de uma unidade de circuito π	24
Figura 8 – Ângulo de defasagem em função da frequência de 1 unidade de circuito π	26
Figura 9 – Comparação entre duas unidades do circuito π referentes à função transferência em função da frequência.....	27
Figura 10 – Placas de circuito impresso com 6 unidades de circuito π por placa.....	29
Figura 11 – Diferença de fase entre a entrada e a de saída. (a) Frequência em 10 kHz e com fase de 2,88 graus. (b) Frequência de 100 kHz e com fase de -159 graus.....	29
Figura 12 – Sinal em frequência do canal 1 – sinal de entrada do sistema. (a) frequência de 300 kHz. (b) frequência de 370 kHz.....	30
Figura 13 – Sinal em frequência do canal 2 – sinal de saída do sistema. (a) frequência de 300 kHz. (b) frequência de 370 kHz.....	30
Figura 14 – Função transferência pela frequência para 6 unidades do circuito π	31
Figura 15 – Sinal de entrada e saída no domínio do tempo para 100 kHz.....	31
Figura 16 – Sinal de entrada e saída no domínio do tempo para 200 kHz.....	33
Figura 17 – Função transferência em função da frequência de 12 unidades do circuito π	33
Figura 18 – Função transferência em função da frequência de 18 unidades do circuito π	35
Figura 19 – Função transferência em função da frequência de 24 unidades do circuito π	35
Figura 20 – Circuito π montado no software HFSS.....	37

Figura 21 – Resultado da função transferência em função da frequência para uma unidade do circuito π no software HFSS.....	38
Figura 22 – Diagrama de Bode para 24 unidades do circuito π	38
Figura 23 - Todas as unidades do circuito π construídas em laboratório.....	39
Figura 24 – Todas as unidades do circuito π montadas no software HFSS.....	39
Figura 25 – Comparação entre o resultado de 6 unidades do circuito π montadas no laboratório com o software HFSS.....	40
Figura 26 – Comparação entre o resultado de 12 unidades do circuito π montadas no laboratório com o software HFSS.....	40
Figura 27 – Comparação entre o resultado de 24 unidades do circuito π montadas no laboratório com o software HFSS.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos elementos R e L utilizados nos cálculos dos parâmetros unitários da linha.....	20
Tabela 2 - Elementos R e L de uma linha de 100 km representada por 150 circuitos π ...	21
Tabela 3 - Elementos R e C de uma linha de 100 km representada por 150 circuitos π ...	21
Tabela 4 - Valores de tensão de entrada e saída, defasagem e função transferência do circuito π montado em laboratório.....	25
Tabela 5 – Valores referentes a 6 unidades do circuito π	28
Tabela 6 – Valores referentes a 12 unidades do circuito π	32
Tabela 7 – Valores referentes a 18 unidades do circuito π	34
Tabela 8 – Valores referentes a 24 unidades do circuito π	36

LISTA DE SÍMBOLOS

π	Letra grega Pi
R	Resistência
L	Indutância
G	Condutância
C	Capacitância
R'	Resistência por unidade de comprimento
L'	Indutância por unidade de comprimento
G'	Condutância por unidade de comprimento
C'	Capacitância por unidade de comprimento
d	Comprimento da linha de transmissão
n	Quantidade de circuitos π na cascata
Z	Impedância elétrica
X	Reatância indutiva
Ω	Unidade de medida de resistência – ohm
km	Unidade de medida de distância – quilômetros
°	Unidade de medida angular – graus
mH	Unidade de medida de indutância – milihenry
nF	Unidade de medida de capacitância – nanofarad
Hz	Unidade de medida de frequência – Hertz
MHz	Megahertz
dB	Decibéis
RF	Rádio frequência
V _{en}	Tensão de entrada
V _s	Tensão de saída
H	Função transferência
EMTP	Electromagnetic Transient Programs
HFSS	High Frequency Structure Simulator
ANSYS	Analysis Systems Inc
FFT	Fast Fourier Transform
RMS	Root Mean Square
PCB	Printed Circuit Board

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO TEÓRICA	17
1. 1 Introdução ao circuito π	18
2 DESENVOLVIMENTO	22
2. 1 Análise de uma unidade do circuito π	23
2. 2 Análises de diferentes unidades do circuito π	26
2. 3 Circuito π construído no software HFSS	37
2. 4 Comparação entre o modelo físico e o modelo simulado no software HFSS	38
3 CONCLUSÃO	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

Linhas de transmissão são sistemas usados para transmitir energia eletromagnética entre localidades distantes. Essas linhas podem transmitir apenas energia elétrica ou servirem como canal de comunicação, onde trafegam dados. Para a transmissão de energia elétrica é necessária uma alta potência, porém uma baixa frequência. Já para o caso de uma transmissão de dados, é necessária que o sinal tenha alta frequência e uma baixa potência. Podemos dizer que essa transmissão não é irradiada, sendo assim, guiada de uma fonte geradora para uma carga consumidora através de fios torcidos ou paralelos, cabos coaxiais ou um guia de onda.

É possível modelar essas linhas de transmissão por meio de circuitos elétricos relativamente simples, convertendo os parâmetros distribuídos, que são referentes à unidade de comprimento, em parâmetros concentrados. Os modelos mais conhecidos são o circuito π e o circuito T. Neste trabalho, é utilizada a representação da linha de transmissão por um circuito monofásico e constituído de circuitos π (MACÍAS, 2005). Esse circuito monofásico é determinado baseado em linhas trifásicas como sendo circuitos trifásicos equilibrados e balanceados.

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 uma boa análise do fenômeno, é necessária a utilização de uma grande quantidade de circuitos π .

Em estudos de linhas de transmissão em condições normais de tensão e potência, perdas são desconsideradas e a análise do sistema é feita em regime permanente, obtendo as equações telegráficas. Quando se leva em conta perdas e fenômenos transitórios (NOBRE, 2005), que fazem com que haja variações bruscas de frequência e amplitude em instantes aleatórios de tempo, já não é mais possível considerar tais equações. Entretanto, o estudo desses efeitos transitórios é indispensável, mesmo sendo inviável de ser testado em linhas de transmissão reais.

A proposta inicial foi analisar o comportamento de um modelo físico de linha de transmissão. O modelo utiliza uma representação monofásica de linhas de transmissão que é aproximada por meio de uma cascata de circuitos π (MACÍAS, 2005). Essa cascata é representada matematicamente por meio de equações de estado. No entanto, sabe-se que circuitos π descrevem parâmetros longitudinais de linhas de transmissão considerados constantes e independentes da frequência, causando erros significativos nos cálculos de correntes e tensões propagadas

pela linha, resultando em respostas que não condizem com a realidade. Foi feita então, a inserção de blocos RL em paralelo para simular o efeito da frequência nos parâmetros da linha de transmissão (NELMS, 1989, MAMIS, 2000). Inserido esse efeito, foi investigada a faixa de frequência em que tal modelagem atinge a saturação.

O modelo físico construído foi baseado em um modelo matemático. Esse modelo é solucionado utilizando a técnica de variáveis de estado em conjunto com o método numérico de integração trapezoidal. Os resultados dessa modelagem matemática foram comparados com resultados obtidos pelos principais programas computacionais utilizados para simulações de transitórios em redes elétricas. São programas do tipo EMTP (Electromagnetic Transient Programs).

1. 1 INTRODUÇÃO AO CIRCUITO π

Um dos objetivos da análise de módulos do modelo físico é gerar resultados para a comparação com os resultados do modelo matemático mencionado (DOMMEL, 1984, PRADO, 2014, CHRYSOCHOS, 2015). Baseando em tais comparações, haverá dados para que o modelo matemático seja ratificado e, se possível, aprimorado. A equação de variável de estado pode ser descrita de acordo com um sistema linear:

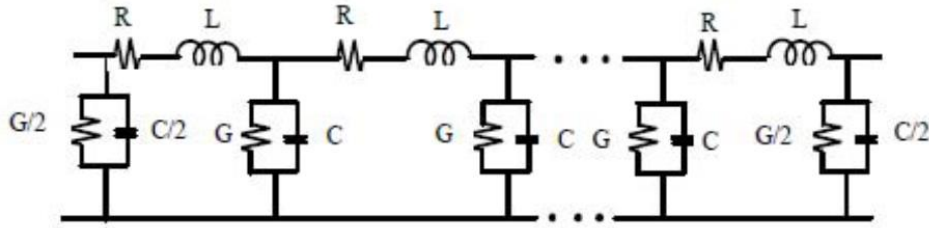
$$\dot{x} = [A]x + [B]u \quad (1)$$

Foi construída a parte inicial do modelo físico, composta de uma unidade de circuito π relacionada primeiramente aos parâmetros longitudinais da linha e posteriormente adicionando os parâmetros transversais.

O circuito obtido deveria transmitir qualquer conteúdo em uma faixa de frequência ampla que incluía a frequência nominal da linha representada. O sinal deveria chegar ao destino com as mesmas características iniciais. O que poderia acontecer é um atraso no tempo entre o sinal de entrada e o sinal de saída.

Na figura 1, os parâmetros R e L são resistência e indutância longitudinais da linha, respectivamente, e os parâmetros G e C são condutância e capacitância transversais de linha, respectivamente.

Figura 1 - Linha de transmissão representada por cascata de circuitos π com parâmetros independentes da frequência.



Fonte: Pereira, 2017.

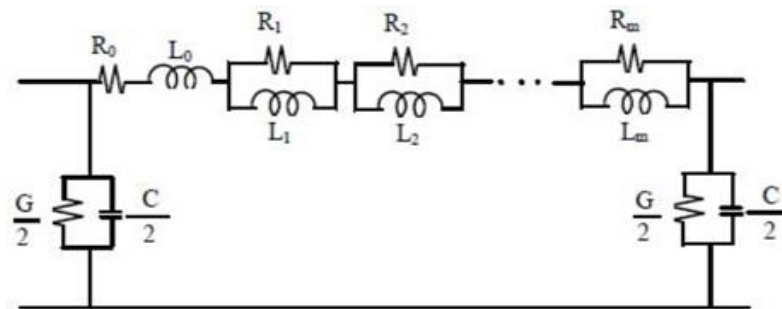
$$R = R' \frac{d}{n} \quad L = L' \frac{d}{n} \quad (2)$$

$$G = G' \frac{d}{n} \quad C = C' \frac{d}{n} \quad (3)$$

Em (2) e (3), R' , L' , G' e C' são os parâmetros longitudinais da linha por unidade de comprimento.

Ao levar em conta o efeito da frequência, cada circuito π da cascata é representado por meio de um circuito da figura 2, onde o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais da linha é representado por meio de associações RL em paralelo (NGUYEN, 2002, ANDRADE, 2013).

Figura 2 - Inserção do efeito da frequência em uma unidade do circuito π .

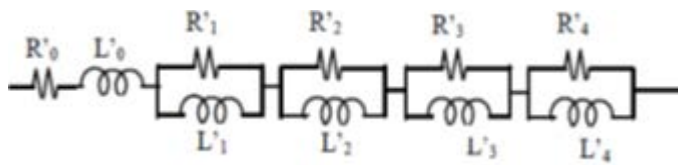


Fonte: autor.

É considerado uma boa aproximação que os parâmetros longitudinais da linha, por unidade de comprimento, podem ser sintetizados por um circuito constituído de um bloco RL série conectado em série com quatro blocos RL paralelos (NGUYEN, 2002, ANDRADE, 2013),

conforme mostra a figura 3.

Figura 3 - Circuito utilizado na síntese dos parâmetros unitários da linha.



Fonte: Pereira, 2017.

Os valores dos elementos R e L utilizados para sintetizar o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais da linha foram obtidos utilizando os valores mostrados na tabela 1. Os parâmetros transversais unitários da linha mostrada na figura 2 são $G' = 0,556\mu\text{S/km}$ e $C' = 11,11\text{nF/km}$.

Uma vez que os valores dos elementos R e L da cascata de circuitos π que descrevem a linha são conhecidos, podemos montar as equações de estado que descrevem o comportamento das correntes e tensões ao longo da mesma.

As simulações com o modelo proposto neste trabalho foram realizadas no ambiente MatLab.

Tabela 1 - Valores dos elementos R' e L' utilizados nos cálculos dos parâmetros unitários da linha.

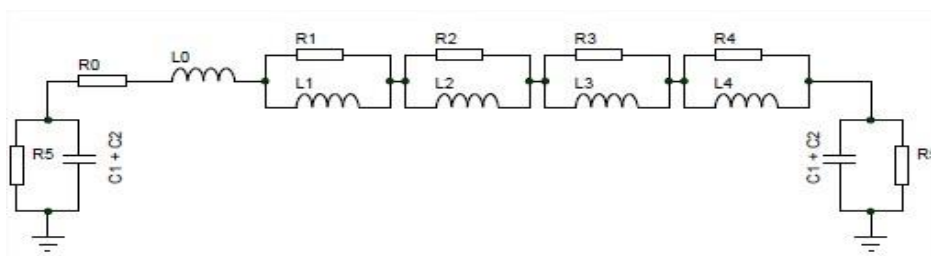
Resistores (Ω/km)		Indutores (mH/km)	
R_0	0,026	L_0	2,209
R_1	1,470	L_1	0,740
R_2	2,354	L_2	0,120
R_3	20,149	L_3	0,100
R_4	111,111	L_4	0,050

Considerando os parâmetros da linha independentes da frequência, o circuito da figura 1 é reduzido somente a R_0 e L_0 . Nesse caso, os valores são: $R_0 = 0.05 \Omega/\text{km}$ e $L_0 = 1\text{mH/km}$. Após a análise de simulações foi montado uma unidade de circuito π da maneira como é mostrado na figura 3. Os valores de resistências e indutâncias comerciais para uma linha de transmissão de 100 km representada por 150 circuitos π está de acordo com a tabela 2. Utilizando esse circuito π , foram medidas tensão e corrente considerados 10 valores de frequência por

década, entre 10 Hz e 1 MHz. Depois da análise da parte longitudinal, foi adicionada a parte transversal para que a unidade de circuito π esteja completa e, para isso, os valores de resistência e capacitância são referentes à tabela 3.

Os parâmetros para a unidade do circuito π são apresentados nas tabelas 1, 2 e 3 e, a partir disso, sua construção física pode ser realizada (PEREIRA, 2017). Inicialmente, a construção foi realizada em uma placa protoboard para a análise do comportamento do circuito. Posteriormente, foi construída em uma placa de circuito impresso. Com isso, foi possível realizar comparação entre o modelo físico construído em laboratório com a simulação realizada pelo software HFSS – ANSYS o qual será apresentada ao longo do trabalho.

Figura 4 - Unidade do circuito π completa



Fonte: autor

Tabela 2 - Elementos R e L de uma linha de 100 km representada por 150 circuitos π .

Resistores (Ω)		Indutores (mH)	
R ₀	2,10	L ₀	0,100
R ₁	1,30	L ₁	0,460
R ₂	1,70	L ₂	0,099
R ₃	15,00	L ₃	0,062
R ₄	80,70	L ₄	0,031

Tabela 3 - Elementos R e C de uma linha de 100 km representada por 150 circuitos π .

Resistores ($M\Omega$)		Capacitores (nF)	
R ₅	6,02	C ₀	2,20
		C ₁	1,50

A comparação é feita utilizando o diagrama de Bode que é o gráfico da função transferência pela frequência. Visto que a função transferência é obtida por meio de (4) que representa

a tensão de saída pela tensão de entrada no circuito.

$$H = \frac{V_s}{V_{en}} \quad (4)$$

Porém, os gráficos gerados em unidades de decibéis. Para a conversão da função transferência em (4) para unidades de decibéis é utilizada a relação (5).

$$H \text{ (dB)} = 20 \log (H) \quad (5)$$

O software HFSS da ANSYS foi desenvolvido para simular estruturas eletromagnéticas a partir dos métodos de elementos finitos. O HFSS é uma das ferramentas comerciais da ANSYS para o design de elementos complexos de circuitos eletrônicos de RF (radiofrequência), incluindo filtros, linhas de transmissão, entre outros. Esse software é a principal ferramenta atual de eletromagnetismo para prototipagem e design virtual. Possui um alto grau de confiabilidade e precisão.

O HFSS é um software para projetar e simular produtos eletrônicos de alta frequência e alta velocidade.

2 DESENVOLVIMENTO

Para a modelagem com circuitos π , foi necessário o estudo da representação dos parâmetros distribuídos presentes em uma linha de transmissão real em parâmetros concentrados. A determinação dos valores distribuídos presentes na linha é baseada em grandezas geométricas das torres da linha de transmissão e na resistência de terra da região por onde passa a linha considerada (FUCHS, 1977, STEVENSON, 1986).

Neste projeto, utiliza-se ainda uma linha monofásica equivalente para modelar as linhas de transmissão trifásicas. O cálculo para essa equivalência é realizado com o auxílio do método das imagens e a utilização de grandezas geométricas para resultar em matrizes de ordem três que dependem da geometria da torre e da resistência em corrente contínua do cabo utilizado na linha (FUCHS, 1977, STEVENSON, 1986).

2. 1 ANÁLISE DE UMA UNIDADE DO CIRCUITO π

Inicialmente, foi montada a parte longitudinal do sistema e obtido os valores de tensão, corrente e defasagem entre as ondas de entrada e saída do circuito. Assim, é possível determinar os valores de impedância e indutância do circuito para cada frequência, bem como, valores de resistência e indutância que serão apresentados nas figuras 5 e 6.

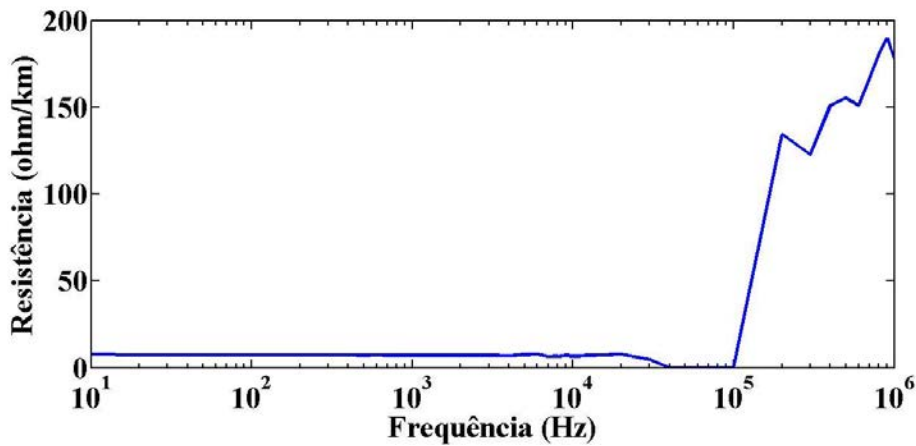
$$Z = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}} \quad (6)$$

$$R(\Omega) = Z * \cos\left(\frac{\pi * defasagem}{180}\right) \quad (7)$$

$$X = Z * \sin\left(\frac{\pi * defasagem}{180}\right) \quad (8)$$

$$L(H) = \frac{X}{2 * \pi * frequência} \quad (9)$$

Figura 5 - Variação da resistência da parte longitudinal do circuito π em função da frequência.

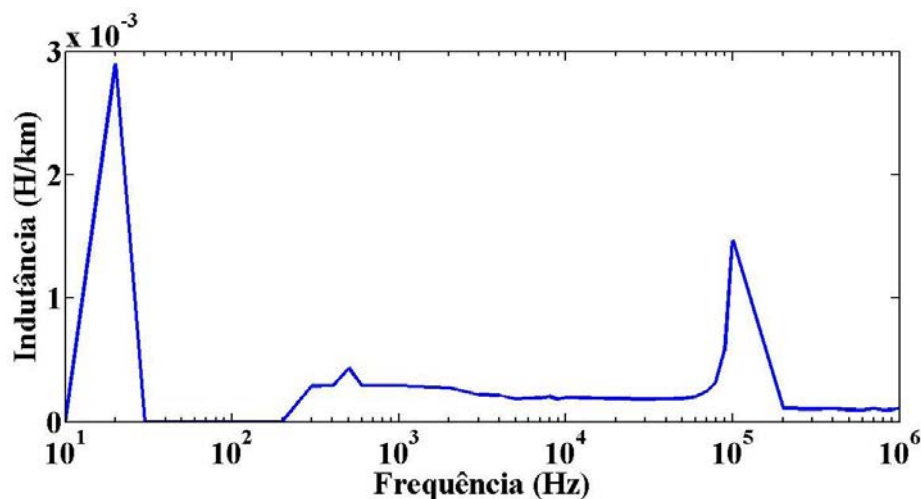


Fonte: autor

Dando sequência ao projeto, foi adicionada a parte transversal ao circuito para que sejam analisadas as tensões de entrada e saída e sua defasagem. Foram também obtidas os espectros em FFT para que sejam analisadas as interferências das harmônicas no sistema. Varredura de frequência foi realizada e, a cada década de frequência, foram analisados os valores de tensão

de entrada e saída para que seja determinada a função transferência do circuito para cada valor de frequência, bem como, o valor de defasagem entre ambas as ondas no domínio do tempo.

Figura 6 - Variação da indutância da parte longitudinal do circuito π em função da frequência.

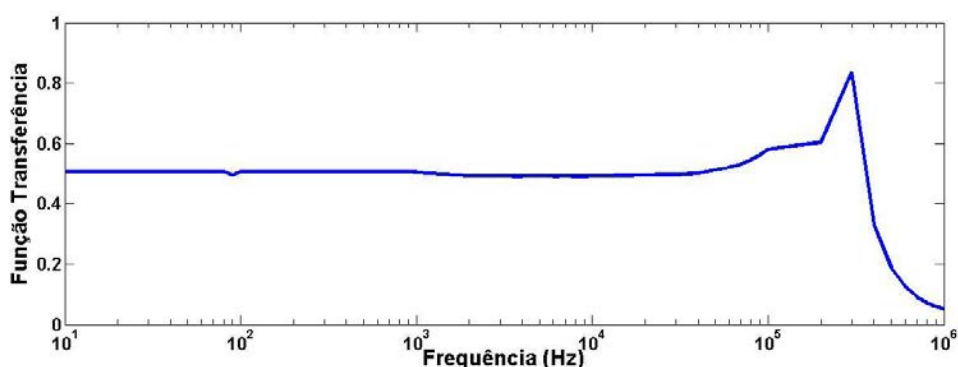


Fonte: autor

À medida que o valor da frequência vai aumentando, o valor da função transferência vai diminuindo, pois, a potência do sinal cai com o aumento da frequência. No entanto, é possível identificar o sinal recebido, devido a relação sinal ruído. A defasagem entre a onda de entrada com a de saída aumenta com relação ao valor da frequência.

Para entender o comportamento do circuito, foi realizado gráficos comparando os valores da função transferência em função da frequência e do ângulo de defasagem em função da frequência após a varredura da frequência para apenas 1 unidade do circuito π .

Figura 7 - Função transferência em função da frequência de uma unidade de circuito π .

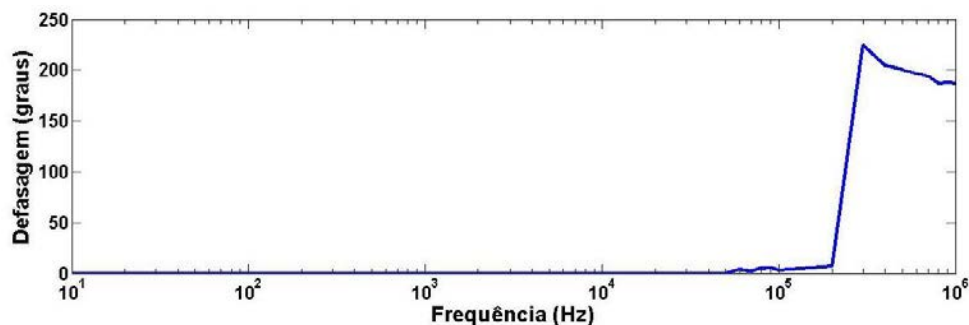


Fonte: autor

Tabela 4 - Valores de tensão de entrada e saída, defasagem e função transferência do circuito π montado em laboratório.

Frequência (Hz)	V _{en} (V)	V _s (V)	Defasagem (°)	H(jw)
10	3,76	3,75	0	0,9973
20	3,72	3,70	0	0,9946
30	3,72	3,70	0	0,9946
40	3,72	3,71	0	0,9973
50	3,73	3,68	0	0,9865
60	3,70	3,66	0	0,9892
70	3,65	3,63	0	0,9945
80	3,65	3,63	0	0,9945
90	3,53	3,51	0	0,9943
100	3,73	3,68	0	0,9866
200	3,70	3,66	0	0,9892
300	3,70	3,65	0	0,9865
400	3,70	3,66	0	0,9892
500	3,73	3,67	0	0,9839
600	3,69	3,65	0	0,9892
700	3,68	3,63	0	0,9864
800	3,70	3,65	0	0,9864
900	3,70	3,66	0	0,9892
1000	3,69	3,65	0	0,9892
2000	3,66	3,65	0	0,9973
3000	3,66	3,65	0	0,9973
4000	3,66	3,65	0	0,9973
5000	3,66	3,65	0	0,9973
6000	3,66	3,65	0	0,9973
7000	3,66	3,64	0	0,9945
8000	3,66	3,64	0	0,9945
9000	3,58	3,57	0	0,9972
10000	3,66	3,64	0	0,9945
20000	3,66	3,66	0	1,0000
30000	3,65	3,70	0	1,0137
40000	3,65	3,73	0	1,0219
50000	3,63	3,80	0	1,0468
60000	3,62	3,86	8,64	1,0663
70000	3,60	3,93	10,08	1,0917
80000	3,59	4,03	8,64	1,1225
90000	3,50	4,04	9,72	1,1543
100000	3,52	4,24	10,80	1,2045
200000	2,40	5,90	37,44	2,4583
300000	2,67	4,05	144,72	1,5168
400000	3,20	1,97	149,76	0,6156
500000	3,20	1,13	158,40	0,3531
600000	3,08	0,71	162,00	0,2331
700000	3,00	0,49	163,80	0,1633
800000	2,75	0,35	164,16	0,1269
900000	2,49	0,25	168,48	0,0992
1000000	2,43	0,19	165,60	0,0794

Figura 8 - Ângulo de defasagem em função da frequência de uma unidade de circuito π .



Fonte: autor

A partir desses gráficos, é possível fazer uma melhor análise do comportamento de uma unidade. Com relação à função transferência percebe-se um pico ressonante entre as frequências 10^5 e 10^6 Hz e nessa mesma faixa de frequência, pode ser analisada também uma alteração no comportamento do ângulo de defasagem. Ambos os gráficos eram constantes ao longo da frequência, quando se atinge uma determinada frequência ocorre o pico. Esse comportamento pode ser mais bem explicado por meio da teoria de filtros, pois um circuito π é um filtro passa faixa.

A linha de transmissão se comporta como filtros em cascata. Na parte transversal passam as frequências altas e na parte longitudinal as frequências baixas. O resultado da função transferência é, na verdade, a medição das tensões que passam nos filtros. Portanto, o valor pode ser maior do que 1, pois o valor de tensão de entrada é 10 V. Logo $f_A + f_B \leq 10V$. Dependendo da frequência de corte de cada filtro, irá passar mais tensão em f_A do que em f_B resultando na diferença obtida nas medidas. Sendo que f_A é considerada a parte transversal e f_B a parte longitudinal.

2. 2 ANÁLISES DE DIFERENTES UNIDADES DO CIRCUITO π

Após a análise inicial de uma unidade do circuito π , foi possível acrescentada à primeira unidade uma segunda unidade do circuito e com isso, os resultados obtidos podem ser comparados para que confirmasse o comportamento do sistema.

Neste caso, foi utilizada uma placa de circuito impresso já construída anteriormente em

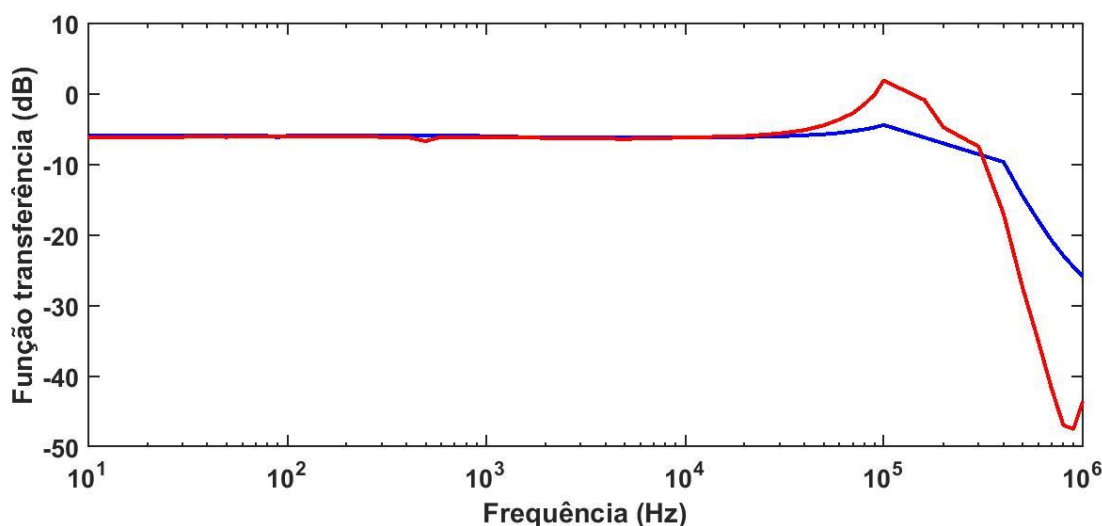
outro projeto, porém foram trocados os indutores construídos manualmente por indutores comerciais mostrado na figura 10. Foram construídas 24 unidades de circuito π separadas em 4 placas com 6 unidades cada uma. Primeiramente, foi analisada 1 placa, posteriormente 2 placas e assim por diante.

Os componentes foram comprados com o auxílio da bolsa FAPESP, a qual foi recebida durante os anos de Iniciação Científica.

Para a primeira placa, foi feita a análise da função transferência por década de frequência, variando de 10Hz a 1MHz com uma tensão de 10V na entrada.

Na saída, com o aumento da frequência, a tensão vai diminuindo até chegar um ponto em que não é possível diferenciar o sinal do ruído. Portanto, não é possível identificar sinal até a frequência de 1MHz. À medida que aumenta a quantidade de unidades do circuito π , a tensão cai mais rapidamente e o valor em frequência do último sinal identificado é sempre menor, como pode ser observado nas tabelas 5, 6, 7 e 8.

Figura 9 - Comparação entre duas unidades do circuito π referentes à função transferência em função da frequência.



Fonte: autor.

A análise das placas é feita utilizando um osciloscópio digital. Esse equipamento permite visualizar a onda de entrada e a onda de saída da placa, além de identificar a diferença temporal entre essas ondas, permitindo identificar a fase da onda e o espectro. O espectro, nesse caso é utilizado para identificar a quantidade de ruído no canal e poder comparar a potência do sinal com a do ruído. Para as frequências baixas a amplitude do sinal é significativamente maior

do que a do ruído. Porém, com o aumento da frequência, a amplitude do sinal decai até que o sinal se mistura com o ruído e não é mais possível identificá-lo.

Tabela 5 – Valores referentes a 6 unidades do circuito π .

Frequência (Hz)	V _{en} (V)	V _s (V)	H (dB)
10	3,60	3,63	-5,95
20	3,61	3,63	-5,97
30	3,61	3,63	-5,97
40	3,65	3,63	-6,07
50	3,66	3,66	-6,02
60	3,65	3,66	-5,99
70	3,78	3,80	-5,97
80	3,65	3,66	-5,99
90	3,54	3,54	-6,02
100	3,66	3,66	6,02
200	3,65	3,63	-6,07
300	3,65	3,63	-6,07
400	3,64	3,63	-6,04
500	3,65	3,62	-6,09
600	3,64	3,63	-6,04
700	3,77	3,77	-6,02
800	3,64	3,63	-6,04
900	3,53	3,51	-6,07
1000	3,65	3,63	-6,07
2000	3,63	3,63	-6,02
3000	3,62	3,65	-5,95
4000	3,61	3,68	-5,85
5000	3,61	3,70	-5,81
6000	3,60	3,74	-5,69
7000	3,56	3,78	-5,50
8000	3,55	3,82	-5,38
9000	3,41	3,73	-5,25
10000	3,52	3,92	-5,09
20000	3,21	4,83	-2,47
30000	2,30	5,86	-2,10
40000	1,72	5,59	-4,22
50000	2,35	4,43	-0,51
60000	2,83	3,58	-3,98
70000	3,20	3,16	-6,13
80000	3,15	2,84	-6,92
90000	3,01	2,74	-6,84
100000	2,96	3,01	-5,87
200000	2,66	2,03	-8,37
300000	3,01	0,66	-19,16
400000	3,24	0,01	-54,94
500000	3,14	0,004	-63,15

Figura 10 – Placas de circuito impresso com 6 unidades de circuito π por placa.

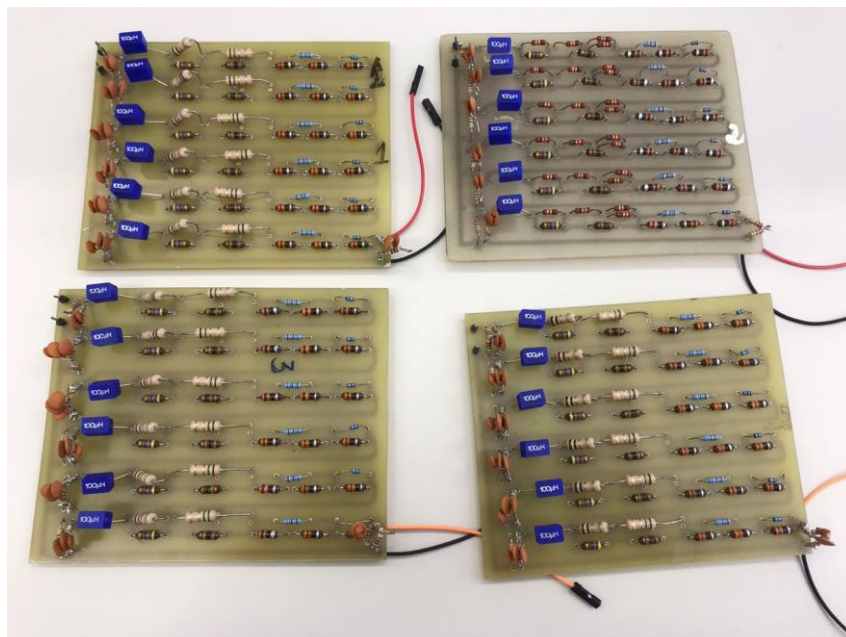
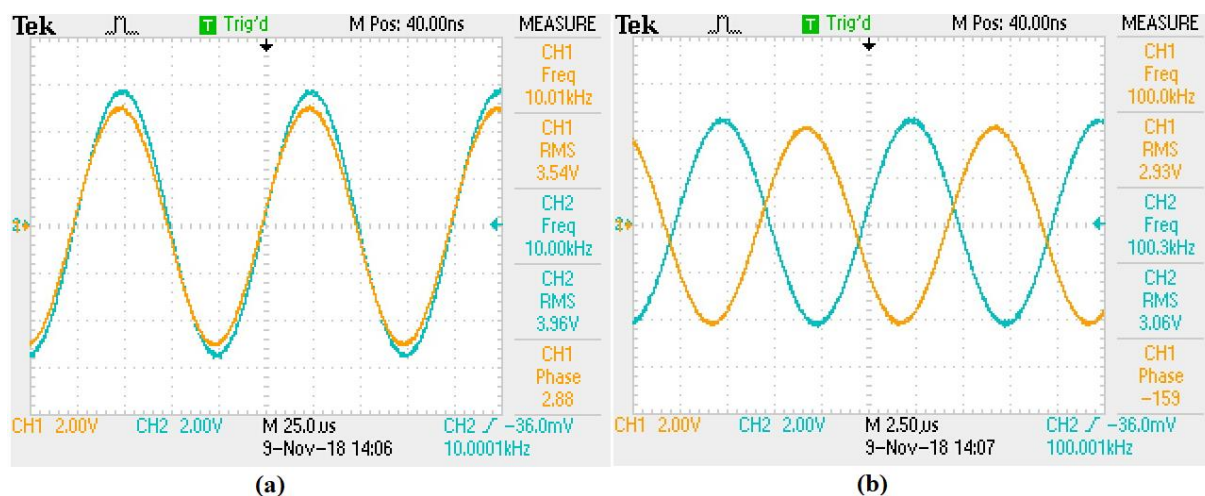


Figura 11 – Diferença de fase entre a entrada e a de saída. (a) Frequência em 10 kHz e com fase de 2,88 graus. (b) Frequência de 100 kHz e com fase de -159 graus.



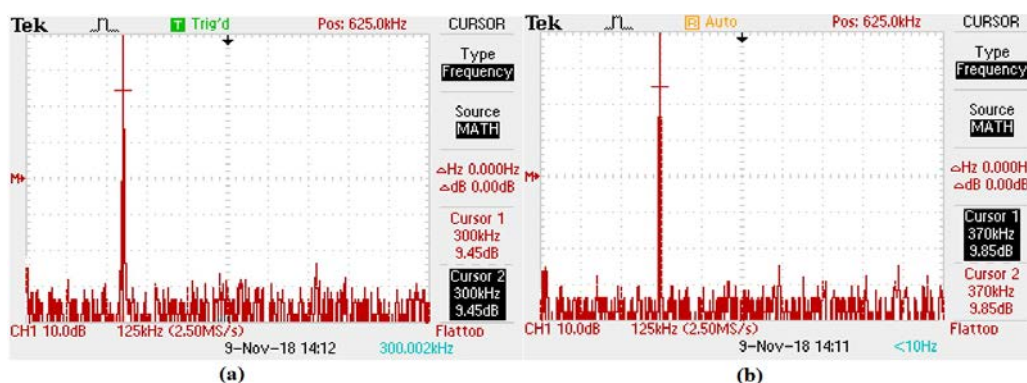
Fonte: autor.

A diferença de fase pode ser observada na figura 11, mostrando que a partir do momento em que a frequência aumenta, a fase entre o sinal de entrada e o sinal de saída aumenta. Na figura 11.a, a frequência é de 10 kHz e apresenta uma fase de 2,88 graus. Antes dessa frequência, a fase é praticamente nula. A partir dessa frequência, a defasagem entre as ondas vai aumentando com o aumento da frequência, como pode ser observado na figura 11.b, em 100 kHz com uma fase de 159 graus entre os sinais.

Para a figura 12, o sinal no domínio da frequência, FFT, é observado no canal 1. Ou seja, na entrada do sistema. Percebe-se que a amplitude do sinal é grande o suficiente para não sofrer interferência do ruído na entrada do sistema. A medida que aumenta a frequência, a amplitude do sinal não decai para o canal 1, pois é sempre o sinal que está sendo emitido, e o nível do ruído é o mesmo.

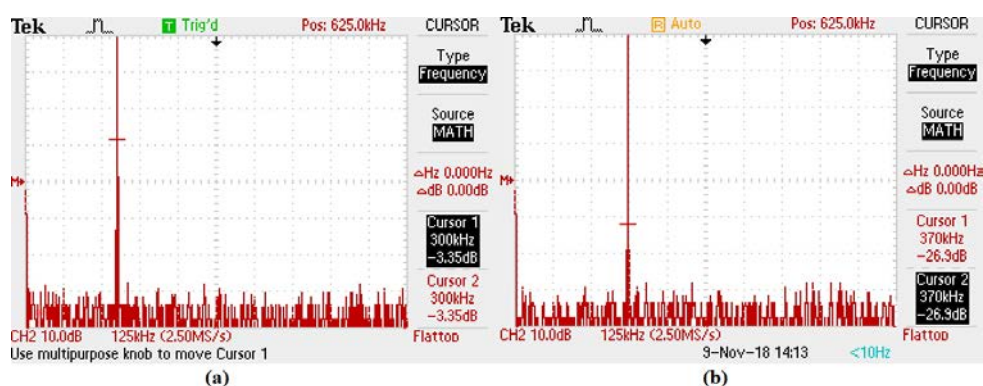
A figura 13 apresenta o sinal no domínio da frequência para o canal 2, ou seja, sinal de saída do sistema. Pode-se observar que para 300 kHz, figura 13.a, o sinal apresenta relação sinal ruído alta, sendo possível a leitura da informação transmitida. Porém, para 370 kHz, ou figura 13.b, a relação sinal ruído é baixa. Se continuar aumentando a frequência, o sinal se mistura com o ruído e não é possível identificá-lo visualmente pelo osciloscópio, porém existem outras maneiras de recuperar o sinal, no entanto, não foi utilizada para a realização do projeto.

Figura 12 – Sinal em frequência do canal 1 – sinal de entrada do sistema. (a) frequência de 300 kHz. (b) frequência de 370 kHz.



Fonte: autor.

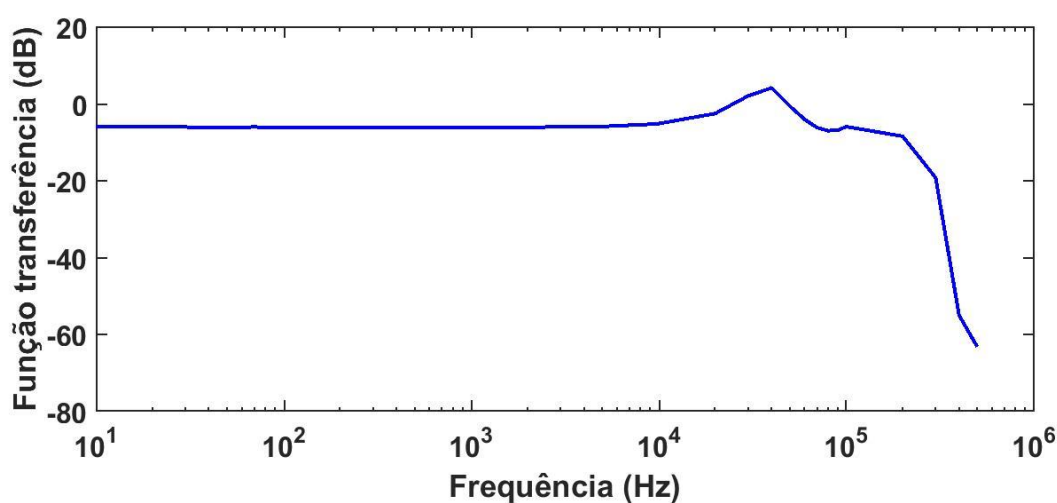
Figura 13 – Sinal em frequência do canal 2 – sinal de saída do sistema. (a) frequência de 300 kHz. (b) frequência de 370 kHz.



Fonte: autor.

Com a obtenção desses resultados, é possível gerar gráficos referentes à função transferência em função da frequência. Esses gráficos são gerados de maneira semelhante às realizadas quando o circuito estava em protoboard, pois apresentam o mesmo comportamento. No entanto, na figura 14, o valor da função transferência está em unidades de decibéis (dB) enquanto, na figura 9, são utilizados valores adimensionais.

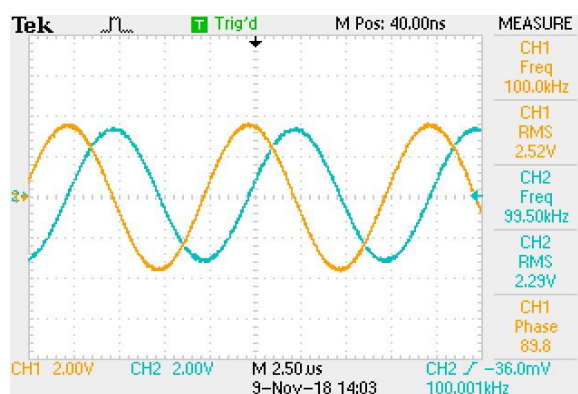
Figura 14 – Função transferência pela frequência para 6 unidades do circuito π .



Fonte: autor.

O mesmo comportamento se repete para a segunda placa, com 12 unidades do circuito π . À medida que aumenta a frequência, a amplitude do sinal de saída diminui até que se torna impossível identifica-lo. É possível visualizar essa queda de amplitude tanto na FFT, no domínio da frequência, quanto no domínio do tempo, como pode ser observado nas figuras 15 e 16.

Figura 15 – Sinal de entrada e saída no domínio do tempo para 100 kHz.



Fonte: autor.

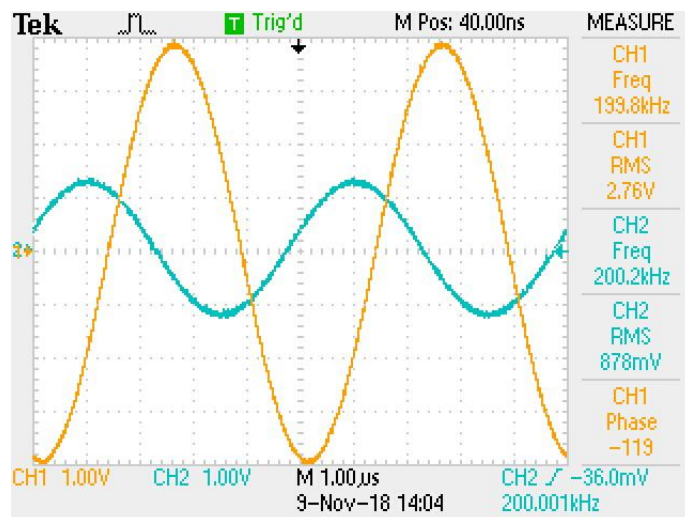
Tabela 6 – Valores referentes a 12 unidades do circuito π .

Frequência (Hz)	V _{en} (V)	V _s (V)	H (dB)
10	3,63	3,62	-6,04
20	3,63	3,63	-6,02
30	3,63	3,63	-6,02
40	3,63	3,63	-6,02
50	3,64	3,63	-6,04
60	3,63	3,63	-6,02
70	3,63	3,63	-6,02
80	3,63	3,63	-6,02
90	3,53	3,52	-6,04
100	3,64	3,63	-6,04
200	3,63	3,63	-6,02
300	3,63	3,63	-6,02
400	3,63	3,63	-6,02
500	3,63	3,63	-6,02
600	3,63	3,62	-6,04
700	3,75	3,78	-5,95
800	3,62	3,64	-5,97
900	3,52	3,52	-6,02
1000	3,63	2,65	-5,97
2000	3,60	3,69	-5,80
3000	3,58	3,77	-5,57
4000	3,56	3,88	-5,27
5000	3,52	3,97	-4,98
6000	3,47	4,10	-4,57
7000	3,37	4,21	-4,09
8000	3,32	4,43	-3,51
9000	3,21	4,63	-2,83
10000	3,08	4,83	-2,11
20000	2,16	4,75	-0,82
30000	2,97	3,10	-5,65
40000	3,03	2,84	-6,58
50000	2,53	3,11	-4,23
60000	2,46	2,73	-5,11
70000	2,85	2,15	-8,47
80000	2,93	1,98	-9,42
90000	2,61	2,08	-7,99
100000	2,50	2,22	-7,05
200000	2,81	0,77	-17,19
300000	3,00	0,01	-54,73

Na figura 15, o sinal de entrada e o sinal de saída apresenta aproximadamente os mesmos valores de tensão. Ou seja, as ondas possuem as mesmas amplitudes. Com o aumento da frequência, a tensão da onda de saída decai, devido à impedância encontrada no circuito, como pode ser observado na figura 16. Para 200 kHz, a onda de saída possui uma tensão 73% inferior à tensão da onda de entrada. Para frequências maiores, pode não ser possível medir o sinal de

saída pelo osciloscópio.

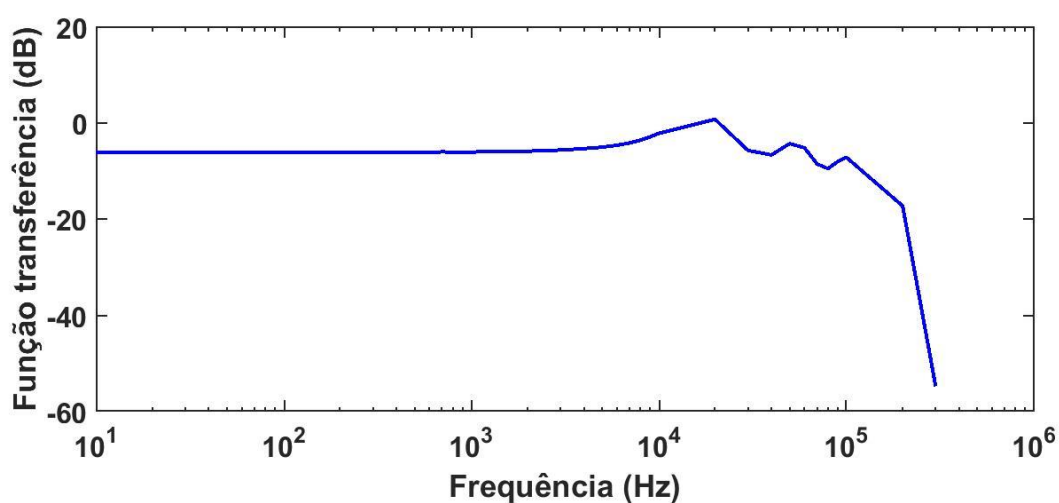
Figura 16 – Sinal de entrada e saída no domínio do tempo para 200 kHz.



Fonte: autor.

É possível, utilizando dos valores obtidos pelo osciloscópio, gerar um gráfico da função transferência pela frequência de duas placas. Pode-se observar um comportamento semelhante às funções transferência apresentadas anteriormente.

Figura 17 – Função transferência pela frequência de 12 unidades do circuito π .



Fonte: autor.

Tabela 7 – Valores referentes a 18 unidades do circuito π .

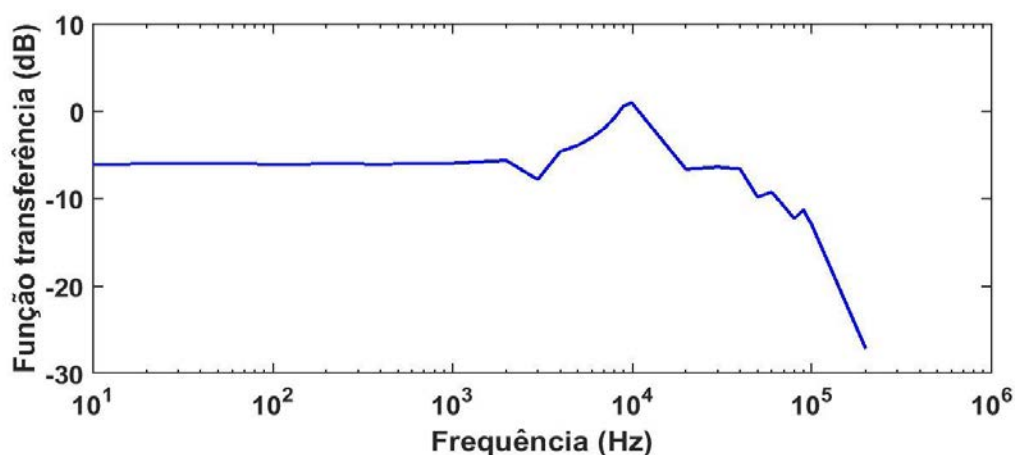
Frequência (Hz)	V _{en} (V)	V _s (V)	H (dB)
10	3,63	3,62	-6,04
20	3,63	3,63	-6,02
30	3,63	3,63	-6,02
40	3,63	3,63	-6,02
50	3,63	3,63	-6,02
60	3,63	3,63	-6,02
70	3,76	3,77	-5,99
80	3,63	3,63	-6,02
90	3,52	3,51	-6,04
100	3,64	3,63	-6,04
200	3,62	3,62	-6,02
300	3,62	3,62	-6,02
400	3,63	3,62	-6,04
500	3,63	3,63	-6,02
600	3,63	3,63	-6,02
700	3,75	3,78	-5,95
800	3,62	3,64	-5,97
900	3,51	3,53	-5,97
1000	3,62	3,65	-5,95
2000	3,57	3,74	-5,61
3000	3,52	2,87	-7,79
4000	3,44	4,05	-4,60
5000	3,33	4,26	-3,88
6000	3,17	4,49	-2,99
7000	2,92	4,66	-1,96
8000	2,67	4,90	-0,75
9000	2,33	5,01	-0,62
10000	2,21	4,95	-0,98
20000	3,01	2,81	-6,62
30000	2,78	2,67	-6,37
40000	2,50	2,34	-6,59
50000	2,84	1,84	-9,79
60000	2,62	1,81	-9,23
70000	2,70	1,55	-10,84
80000	2,83	1,38	-12,26
90000	2,60	1,42	-11,27
100000	2,71	1,22	-12,95
200000	2,82	0,25	-27,17

As 3 placas, ou seja, 18 unidades do circuito impresso apresentam os mesmos comportamentos mostrados anteriormente para 1 e 2 placas, 6 e 12 unidades, referentes a diminuição de amplitude com o aumento da frequência. A partir do momento em que aumentam as unidades do circuito π , a queda da amplitude do sinal se torna cada vez mais rápida, e com isso, o valor

de frequência para identificação do sinal de saída sem interferência significativa de ruído diminui cada vez mais. Como no caso de 1 placa, a última identificação de sinal foi com 500 kHz. Já para 2 placas, foi com 300 kHz e, para 3 e 4 placas, foi com 200 kHz.

Também foi gerado o gráfico da função transferência em função da frequência em decibéis como é mostrado na figura 18.

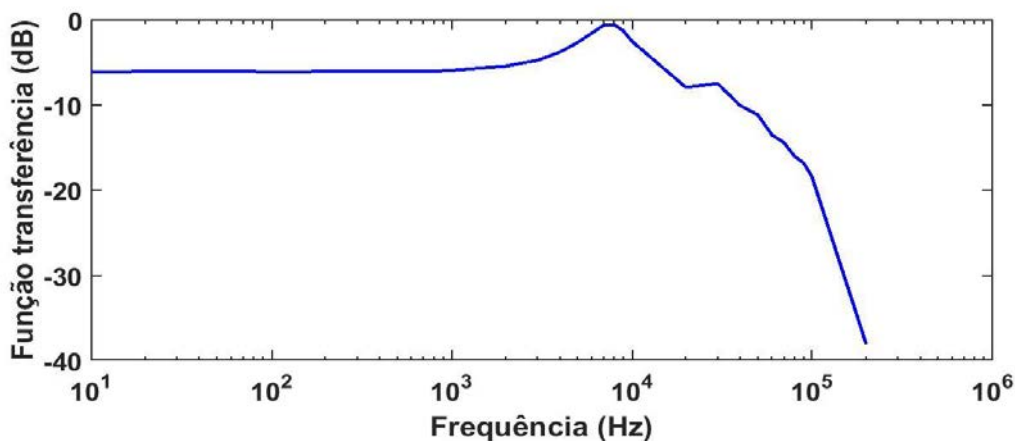
Figura 18 – Função transferência em função da frequência de 18 unidades do circuito π .



Fonte: autor.

O mesmo que ocorre anteriormente para as outras placas, ocorre para a análise das 4 placas ou 24 unidades de circuito π . Na figura 19, é mostrado o gráfico da função transferência em função da frequência em decibéis de acordo com os dados apresentados na tabela 8.

Figura 19– Função transferência em função da frequência de 24 unidades do circuito π .



Fonte: autor.

Tabela 8 – Valores referentes a 24 unidades do circuito π .

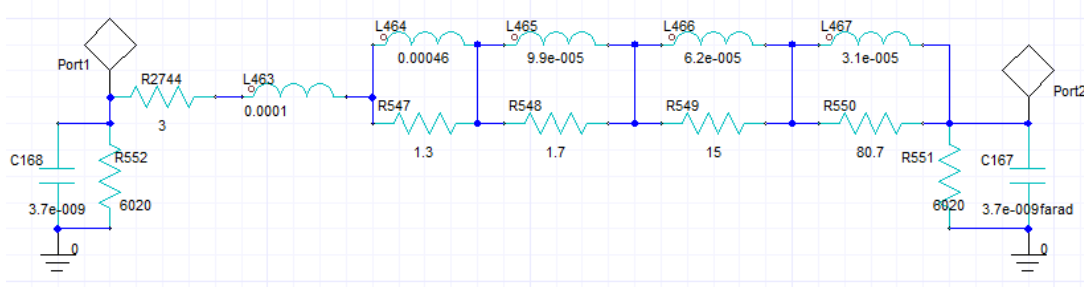
Frequência (Hz)	Ven (V)	Vs (V)	H (dB)
10	3,63	3,61	-6,07
20	3,63	3,62	-6,04
30	3,63	3,62	-6,04
40	3,63	3,62	-6,04
50	3,63	3,62	-6,04
60	3,63	3,62	-6,04
70	3,63	3,62	-6,04
80	3,63	3,62	-6,04
90	3,52	3,50	-6,07
100	3,64	3,62	6,07
200	3,63	3,62	-6,04
300	3,63	3,62	-6,04
400	3,63	3,62	-6,04
500	3,63	3,62	-6,04
600	3,63	3,62	-6,04
700	3,63	3,62	-6,04
800	3,63	3,62	-6,04
900	3,50	3,53	-5,95
1000	3,61	2,66	-5,90
2000	3,52	3,78	-5,40
3000	3,42	3,97	-4,72
4000	3,23	4,19	-3,76
5000	2,98	4,39	-2,66
6000	2,69	4,51	-1,53
7000	2,41	4,50	-0,60
8000	2,29	4,31	-0,53
9000	2,32	4,02	-1,25
10000	2,45	3,70	-2,44
20000	2,98	2,40	-7,90
30000	2,58	2,19	-7,44
40000	2,76	1,74	-10,03
50000	2,62	1,46	-11,10
60000	2,76	1,17	-13,48
70000	2,67	1,02	-14,38
80000	2,77	0,88	-15,99
90000	2,74	0,79	-16,78
100000	2,70	0,65	-18,38
200000	2,82	0,71	-38,05

Com a análise realizada e apresentada nas 4 placas ou 24 unidades de circuito π , necessita-se de uma ferramenta de comparação para poder dizer que o comportamento do circuito é exatamente esse apresentado e que a análise realizada está correta. Por isso, foi feita a análise pelo software HFSS que será apresentado na próxima sessão. Porém, observa-se que o comportamento é sempre semelhante entre as diferentes unidades de circuito π .

2. 3 CIRCUITO π CONSTRUÍDO NO SOFTWARE HFSS

O circuito π montado no software HFSS da ANSYS apresenta as mesmas características do modelo físico. Os mesmos valores de resistência, indutância e capacitância mostrados nas tabelas 2 e 3 são inseridos no software para gerar os resultados da função transferência para diversas unidades do circuito π . No software, na entrada e na saída, foram colocadas portas genéricas e feita a varredura no domínio da frequência de 10 Hz a 1 MHz utilizando 47 passos. A partir disso, foram gerados resultados por meio de um gerador de gráficos (*plot*) para a análise da função transferência com relação à porta de entrada e a porta de saída. Os valores são apresentados em unidades de decibéis (dB).

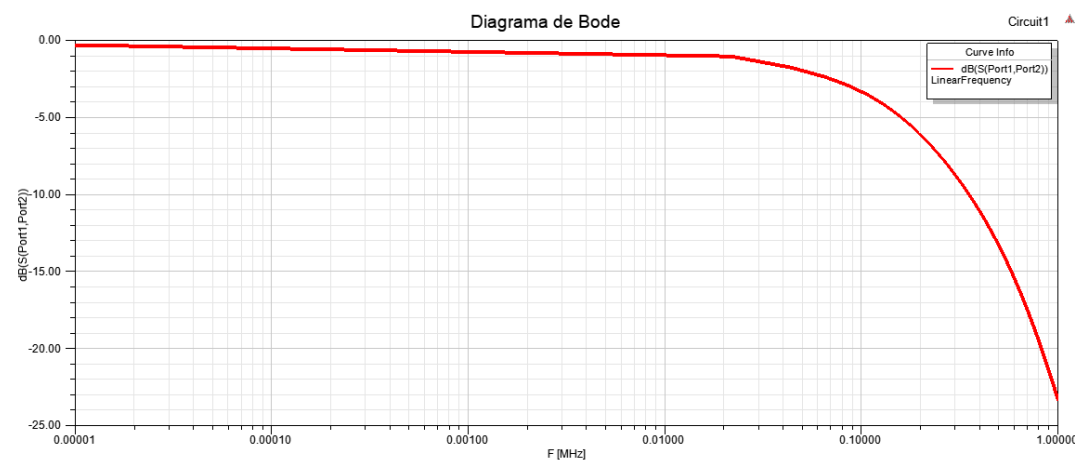
Figura 20 – Circuito π montado no software HFSS.



Fonte: autor.

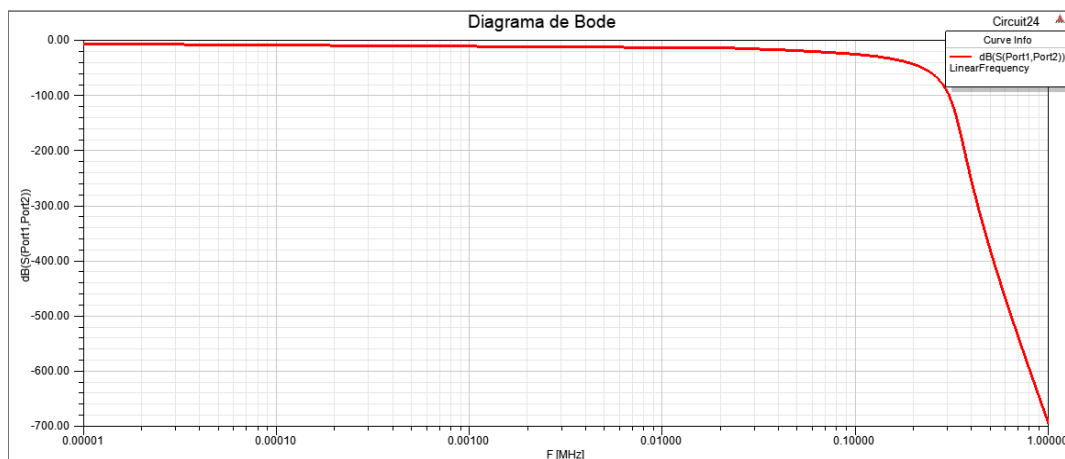
Na figura 20, é mostrado o esquema montado no software com os valores dos resistores, capacitores e indutores, além de mostrar a entrada e a saída representadas pelas portas 1 e 2, respectivamente. A partir dessas portas, foram gerados os resultados apresentados a seguir. A figura 21 representa o resultado da função transferência pela frequência para uma unidade do circuito π . O comportamento desse diagrama de Bode é semelhante ao observado na figura 9, que mostra o resultado de 1 e 2 unidades do circuito π montadas em laboratório. A figura 22 mostra o gráfico da função transferência em função da frequência para 24 unidades do circuito π . Comparando as figuras 21 e 22, pode-se observar que a queda na amplitude na frequência de 10^5 Hz é significativa, pois a medida que aumenta o número de unidades do circuito π , a queda no valor da amplitude se torna mais abrupta. Essa queda pode ser observada pela escala, em dB, do eixo Y. Nesse software, foram construídas e analisadas diversas unidades do circuito π . Essas unidades variam de 1 a 250 circuitos π .

Figura 21 – Resultado da função transferência em função da frequência para uma unidade do circuito π no software HFSS.



Fonte: autor

Figura 22 – Diagrama de Bode para 24 unidades do circuito π .



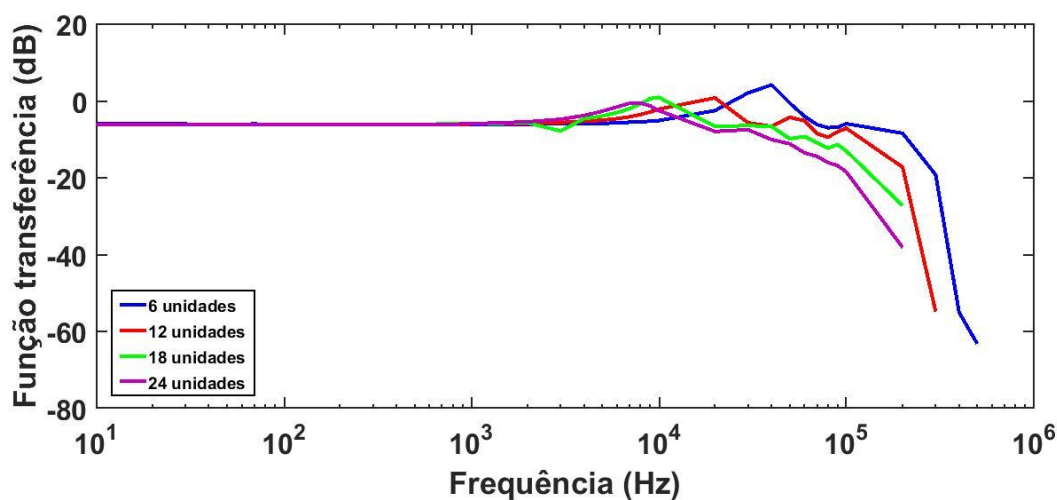
Fonte: autor.

2. 4 COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO FÍSICO E O MODELO SIMULADO NO SOFTWARE HFSS

Com base nas sessões anteriores, pode ser feita uma comparação entre o modelo físico e o circuito montado no software. Essa comparação serve para mostrar que há uma coerência entre os resultados obtidos no modelo laboratorial com o modelo inserido no software. Na figura 23, é apresentada a comparação entre as diversas unidades do circuito π montadas em

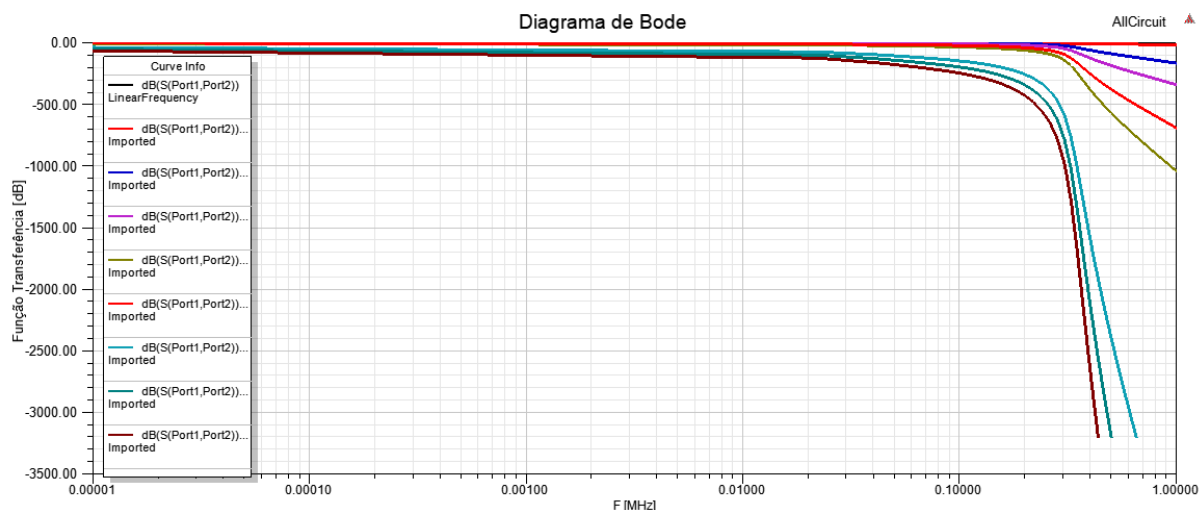
laboratório. Essas unidades apresentadas são: 1, 2, 6, 12 e 24 unidades. Já na figura 24 é apresentada a comparação entre as análises realizadas pelo software HFSS que apresentam resultados com 1, 6, 12, 24, 36, 144, 150, 200 e 250 unidades de circuitos π . A medida que aumenta a quantidade de circuitos π , a queda de amplitude da função de transferência se torna significativa. A queda ocorre em frequências menores para maiores quantidades de circuitos π .

Figura 23 - Todas as unidades do circuito π construídas em laboratório.



Fonte: autor

Figura 24 – Todas as unidades do circuito π montadas no software HFSS.

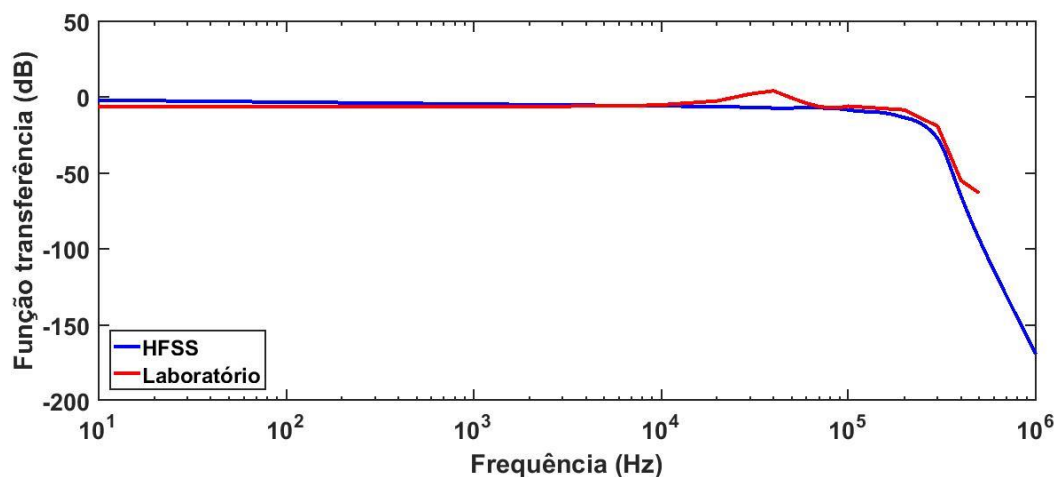


Fonte: autor.

Analisando a figura 21 em relação à figura 24, a queda é insignificante. Para maiores quantidades de circuitos π , a queda se torna cada vez mais acentuada, fazendo com que a queda

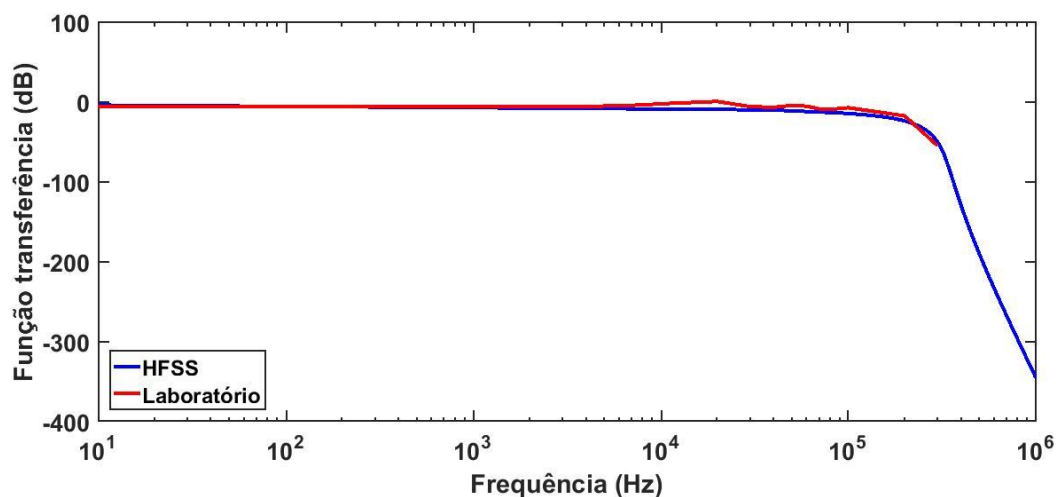
para apenas 1 unidade do circuito π seja insignificante perante as outras.

Figura 25 – Comparação entre o resultado de 6 unidades do circuito π montadas no laboratório com o software HFSS.



Fonte: autor.

Figura 26 – Comparação entre o resultado de 12 unidades do circuito π montadas no laboratório com o software HFSS.



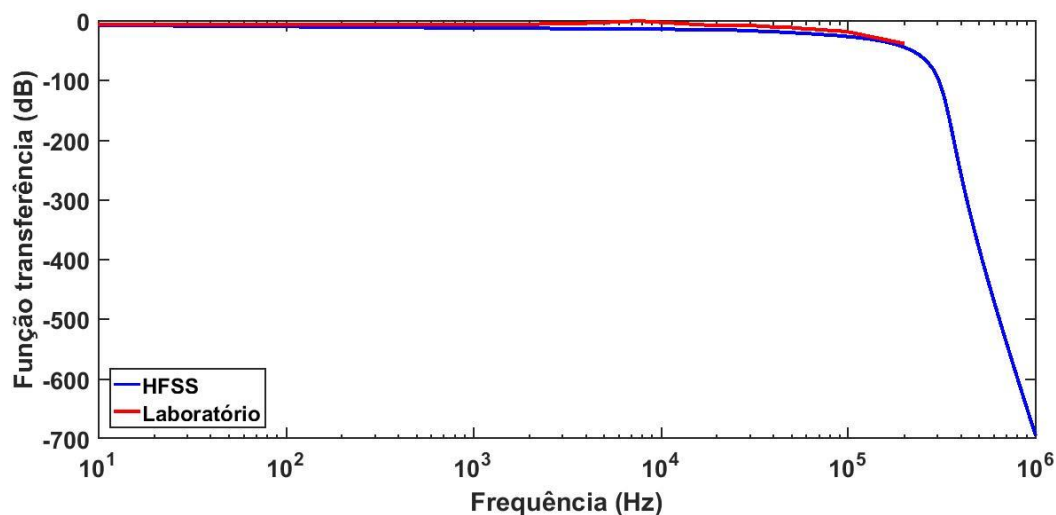
Fonte: autor

Como apresentado anteriormente, para 6 unidades do circuito π montados no laboratório não foi possível analisar até 1 MHz, portanto o gráfico laboratorial possui uma extensão inferior ao resultado do software. No entanto, o comportamento de ambos é semelhante.

Para a figura 26, com relação à curva referente aos resultados obtidos laboratorialmente

e os pelo software HFSS o comportamento é parecido. Como para nesse caso, a análise de interesse é para frequências baixas, toda potência transmitida é recebida. No entanto, para as frequências altas apresentam uma diferença.

Figura 27 – Comparação entre o resultado de 24 unidades do circuito π montadas no laboratório com o software HFSS.



Fonte: autor

A diferença entre as figuras 25, 26 e 27 perante à figura 24 é a escala, pois com isso fica possível identificar a queda se tornando mais abrupta com o aumento das unidades do circuito π .

A figura 27, representa à última possível comparação entre os resultados obtidos em laboratório com os resultados apresentados pelo software HFSS, devido à limitação de unidades montadas em laboratório. No entanto, para frequências baixas é possível observar que toda potência ou sinal enviado é transmitido sem perdas, porém para frequências altas isso não é possível, pois a perda de sinal e/ou potência é alta.

De acordo com a teoria, 1 unidade do circuito π não pode representar uma linha de transmissão. São necessárias mais unidades para uma representação real. No entanto, não há um número exato de circuitos π para representar a linha de transmissão. Quanto maior o número, melhor será o resultado e a simulação será próxima ao real para linhas de transmissão. Essa teoria pode ser comprovada de acordo com as figuras 23 e 24.

A transmissão de dados é feita em 50-60 Hz, dependendo do país. Nessa faixa de frequência, independentemente do número de circuitos π , toda a informação será transmitida conforme mostram os resultados obtidos nas figuras apresentadas.

3 CONCLUSÃO

A linha de transmissão trabalha em uma faixa de frequência específica. Os parâmetros da linha são calculados de acordo com o que é desejado e, para essa frequência, todo o sinal deve ser transmitido.

A teoria de linha de transmissão pode ser aplicada tanto em sistemas de fornecimento de energia ou em transmissão de sinais de dados. Para a transmissão de energia elétrica são necessárias alta potência e baixa frequência. Para uma transmissão de dados é necessária alta frequência.

Inicialmente, foi montada a parte longitudinal de circuito π para identificar os valores de resistência e indutância do circuito, visto que não é possível fazer essa identificação para o circuito π completo. Os valores de resistência e indutância são grandezas de bipolos e uma cascata de circuitos π pode ser analisada como quadripolo.

A partir dessa análise foi acrescentada a parte transversal do circuito para completar uma unidade de circuito π e então, feita a análise da função transferência para uma unidade. Posteriormente, a essa unidade foi incrementada mais uma unidade de circuito π na placa de protoboard e feita a mesma análise.

Para uma quantidade maior de circuitos π , foram utilizadas placas de circuito impresso. Devido a um problema na prototipadora, foram utilizadas placas construídas em um trabalho anterior, com valores dos componentes semelhantes aos utilizados nesse trabalho. Nessas placas, havia indutores bobinados em laboratório. Tais indutores foram trocados por indutores comerciais. Logo, foi possível fazer a análise de 24 unidades de circuito π , as quais estavam distribuídas em 4 placas com 6 unidades cada. Fez-se a análise da primeira placa com 6 unidades de circuito π , depois acrescentada uma segunda placa totalizando em 12 unidades de circuito π , e assim, até completar a análise das 24 unidades de circuito π .

Ao mesmo tempo, o circuito π foi montado no software HFSS, apresentando as mesmas características do modelo físico e foi feita a mesma análise no domínio da frequência. Devido a facilidade de implementação de grande quantidade de elemento no software, foram montadas mais unidades do circuito para análise e também, porque no modelo físico há limitação, devido a saturação do sistema.

Observando o modelo montado em laboratório, é possível determinar que com o au-

mento de circuitos π , há uma queda de tensão maior para altas frequências. Porém, essa percepção fica mais nítida no modelo inserido no software, pois apresenta maiores quantidades de circuito π . Com isso, é possível identificar que apenas 1 unidade do circuito π , não representa uma linha de transmissão.

Por fim, para simular linhas de transmissão, são necessárias muitas unidades de circuitos π . Quanto maior o número de circuitos π , mais se aproximará do comportamento real de linhas de transmissão. No entanto, a quantidade de circuitos π que apresenta a melhor relação entre precisão dos resultados e tempo de simulação varia de acordo com para cada linha de transmissão analisada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

J. A. R. Macías, A. G. Expósito, A. B. Soler, “**A comparison of techniques for state-space transient analysis of transmission lines**”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 894-903, April, 2005.

M. Nobre, W. C. Boaventura, W. L. A. Neves, “**Phase-Domain Network Equivalents for Electromagnetic Transient Studies**”, The 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 12-16 June 2005, CD ROM, San Francisco, USA.

J. A. R. Macías, A. G. Expósito, A. B. Soler, Correction to “**A comparison of techniques for state-space transient analysis of transmission lines**”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 20, no. 3, pp. 2358, July, 2005.

R. M. Nelms, G. B. Sheble, S. R. Newton, L. L. Grigsby, “**Using a personal computer to teach power system transients**”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 4, no. 3, pp. 1293-1294, August, 1989.

M. S. Mamis, M. Koksál, “**Solution of eigenproblems for state-space transient analysis of transmission lines**”, Electric Power Systems Research, vol. 55, no. 1, pp. 7-14, July, 2000.

H. W. Dommel, **Electromagnetic Transients Program - Rule Book**, Oregon, 1984.

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

I. Chrysochos, G. P. Tsolaridis, T. A. Papadopoulos, G. K. Papagiannis, “**Damping of oscillations related to lumped-parameter transmission line modeling**”, in Conf. on Power Systems Transients (IPST 2015), 7 pp., 2015.

T. G. Pereira, A. C. Moreira, M. O. Santos, L.H.Jús, A. A. Ferreira, A. J. Prado, “**Laboratory Tests with Model based on π Circuits considering the Introduction of Branches composing by RL Parallel Elements**”, The 12th Latin-American Congresso on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE 2017, CD-ROM, 12-15 de novembro de 2017, Mar del Plata, Argentina.

T. T. Nguyen, H. Y.; Chan, “**Evaluation of modal transformation matrices for overhead transmission lines and underground cables by optimization method**”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 17, no. 1, January 2002.

P. R. Andrade, R. C. Monzani, L. S. Lessa, T. Ingelbinck, A. J. Prado, J. Pissolato Filho, L. F. Bovolato, “**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., 6-9 de outubro de 2013, Viña del Mar, Chile.

T. G. Pereira, A. C. Moreira, A. J. Prado, A. A. Ferreira, J. Pissolato Filho, “**Laboratorial Tests with Transmission Line Model based on Modified π Circuits**”, Progress in Electromagnetics Research Symposium – PIERS 2017, vol. 1, 7 pp., 22-25 de maio de 2017, St. Petersburg, Russia.

FUCHS, R. D., “**Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas**”, Rio de Janeiro: LTC, 1977. 2 volumes.

STEVENSON, W. D., “**Elementos de análise de sistemas de potência**”, 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1986.