

DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE LINHA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ESCALA REDUZIDA PARA APLICAÇÃO EM LABORATÓRIO

Lucas Rosa Bastos (IC) e Cleber Roberto Guirelli (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

Visando desenvolver um modelo prático de linha de transmissão de energia para uso em laboratório, foi realizada uma pesquisa para a reprodução de um sistema de potência em escala reduzida, para que fosse possível a visualização dos fenômenos a ela envolvidos, tornando a visualização mais didática. Para isso, foi escolhida uma linha de transmissão a ser reproduzida, efetuado os cálculos necessários para determinar um parâmetro de escala envolvendo os efeitos da linha a fim de determinar os componentes a serem instalados em um circuito de modelo da linha capaz de reproduzir os efeitos de uma linha real. Os principais fenômenos envolvidos em uma linha de transmissão são causados por acúmulo de energia elétrica, chamado de efeito de capacitância, e acúmulo de energia magnética, chamado de indutância e a reflexão de ondas, ligado diretamente ao comprimento de onda e a frequência do sistema. O aumento da frequência permite que se construa um modelo em escala bem menor que se usada a frequência nominal do sistema elétrico, 60Hz. Para a modelagem da linha foi utilizado um circuito π . Ao construir o modelo encontrou-se uma série de problemas práticos como: a necessidade de construção de indutores com os valores necessários por não existirem comercialmente, distorções nas medições devido a interferências captadas pelo circuito em certas frequências de medição, distorções das ondas de tensão e corrente em certas frequências possivelmente devido a ressonâncias no circuito.

Palavras-chave: Modelo de linha em escala reduzida, linha de transmissão, sistemas de potência em escala reduzida.

ABSTRACT

Aiming to develop a practical model of a transmission power line for use in laboratory, a research was done to model a power system in a reduced scale to visualize the phenomena involved, making it more didactic. To do so, a transmission power line was chosen to be modeled, making the necessary calculations to determine a scale parameter involving the effects of the line in order to determine the components to be installed in a line model circuit capable of reproducing the effects of a real line. The main

phenomena involved in a transmission power line are the accumulation of electrical energy, called capacitance, accumulation of magnetic energy, called inductance, and the reflection of travelling waves, connected directly to the wavelength and frequency of the system. Increasing the frequency allows to build a much smaller scale model than with nominal frequency (60Hz). For the line model, a π circuit was used. When building the scale model, a number of practical problems were encountered: the need to build our own inductors in order to obtain the necessary values because they do not exist commercially, distortions in the measurements due to interferences captured by the circuit in certain measurement frequencies, distortions of the voltage and current waves at certain frequencies, possibly due to resonances in the circuit.

Keywords: Small scale power line model, transmission power lines, power system scaled scale.

1. INTRODUÇÃO

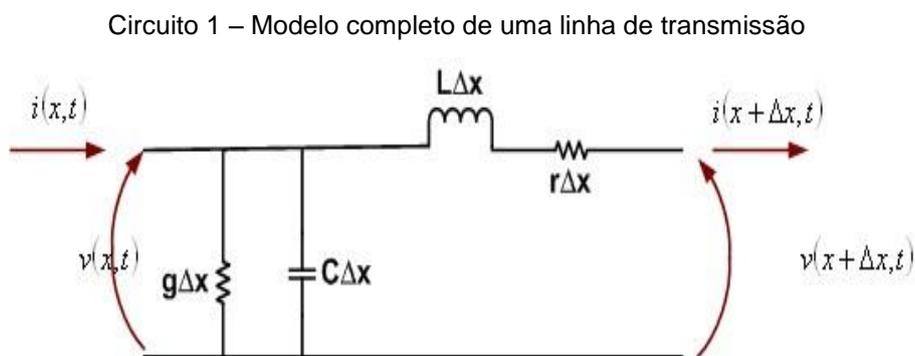
Entender um sistema elétrico é importante para a manipulação da energia elétrica para as mais diversas atividades. O transporte de energia elétrica do ponto de geração até o ponto de subestações abaixadoras de tensão. Visando isto, foi desenvolvido um sistema elétrico de potência que reproduzisse uma linha de transmissão de forma precisa, de forma didática e de fácil operação, focando em um modelo prático, ao invés de uma simulação em computador.

Para a reprodução da linha de transmissão, foi realizado um estudo da teoria de linhas e ondas, focando no tema desta pesquisa. Para a reprodução da linha, foi adotado o modelo Pi (π) por este representar mais fielmente uma linha de transmissão de grande magnitude e permitir sua construção em escala de laboratório (MELIOPOULOS et al., 2009). O circuito recebe este nome devida a sua configuração física, assemelhando-se à letra Pi.

O estudo realizado neste artigo foca no comportamento da onda ao longo de uma linha de transmissão desde o ponto de geração até o ponto de distribuição, levando em conta os fenômenos eletromagnéticos envolvidos devido aos campos elétrico e magnético chamados respectivamente de capacitância e indutância.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O comportamento de uma linha de transmissão pode ser descrito através do modelo de circuito elétrico em Circuito 1.



Fonte: Fuchs, 1977, p. 70

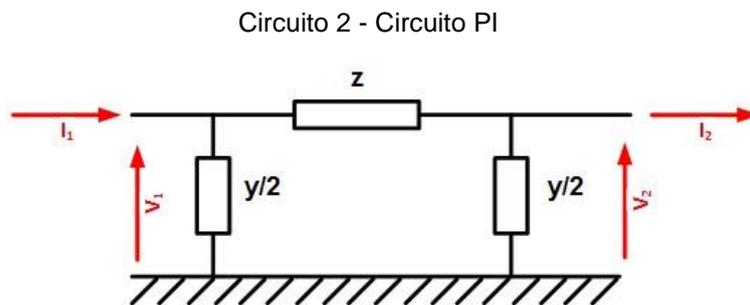
O equacionamento que descreve o comportamento desse circuito é dado pelas equações:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = r_g v + r_c \frac{\partial v}{\partial x} + L_g \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = r_g i + r_c \frac{\partial i}{\partial x} + L_g \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (2)$$

A complexidade dessas equações levou ao desenvolvimento de modelos mais simples, mas que ainda representam adequadamente o comportamento das linhas.

Um desses modelos é o circuito PI (π). O circuito PI recebe este nome pela sua semelhança física de configuração dos componentes com a letra grega Pi. O Circuito 2 mostra um diagrama de um circuito π .



Fonte: Do autor

Onde: z Impedância de cada fase da linha:

$$z = r + j\omega L \text{ (}\Omega/\text{km)}$$

Onde: r Resistência de cada fase da linha (Ω/km)

ω Velocidade angular, $\omega = 2\pi f$

f Frequência do sistema (Hz)

L Indutância de cada fase da linha (H/km)

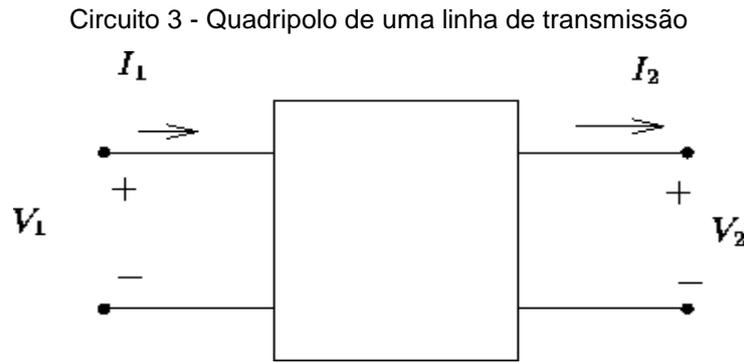
y Admitância de cada fase da linha:

$$y = j\omega C \text{ (}\mathcal{S}/\text{km)}$$

Onde: C Capacitância de cada fase da linha (F/km)

- V_1 Fasor da tensão de entrada da linha
- V_2 Fasor da tensão de saída da linha
- I_1 Fasor da corrente de entrada da linha
- I_2 Fasor da corrente de saída da linha

O mesmo circuito pode ser representado através de um quadripolo (Guirelli, 2014), conforme o Circuito 3.



Fonte: Do autor

A relação entre as tensões e corrente de entrada e saída é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde A, B, C e D são chamadas de constantes generalizadas da linha de transmissão e podem ser calculadas por:

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} \quad (4)$$

$$B = Z \quad (5)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4} \right) \quad (6)$$

Para linhas de extra alta tensão (>230kV) e comprimentos acima de 200km, é necessária uma modelagem mais complexa da linha de transmissão. O cálculo dos parâmetros do quadripolo pode ser alterado para levar todos os efeitos descritos nas equações [1] e [2]:

$$A = D = \cosh(\gamma l) \quad (7)$$

$$B = Z_c \sinh(\gamma l) [\Omega] \quad (8)$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) [S] \quad (9)$$

Onde: γ é a constante de propagação;

Z_c é a impedância característica da linha;

A constante de propagação é definida como:

$$\gamma = \sqrt{z \times y} = \alpha + j\beta \quad (10)$$

Onde: α Constante de atenuação dada em nepers por metro [Np/km]

β Constante de defasagem com unidade em radianos por metro [rad/km]

E a impedância característica é calculada por:

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (11)$$

De (3), tem-se que a constante da linha A , no caso de uma linha em vazio, isto é, sem carga ($I_2 = 0$), fornece a relação entre a tensão de entrada e saída da linha:

$$V_1 = AV_2 \quad (12)$$

O comprimento de onda linha é definido como:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (13)$$

3. METODOLOGIA

A linha escolhida para ser reproduzida no trabalho foi uma linha de transmissão de 345kV com os parâmetros indicados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros da linha de 345kV

r	0,0306	Ω/km
x	0,3753	Ω/km
y	4,5170	$\mu\text{S}/\text{km}$

Fonte: Alcahuaman (2007)

Com os parâmetros elétricos da linha podem ser calculados os demais parâmetros da linha (Tabela 2).

Tabela 2 – Parâmetros calculados da linha

L	0,996	mH/km
C	11,982	nF/km
z	$0,0306 + j0,3753$	Ω/km
y	$0 + j4,517$	$\mu\text{S}/\text{km}$
Z_c	$288,724 \angle -2,331^\circ$	Ω
γ	$(0,053 + j1,303) \times 10^{-3}$	$1/\text{km}$
λ	4821,76	km

Fonte: do autor

Considerando a linha com o comprimento que gera a maior sobretensão quando energizada em vazio ($\lambda/4$), sem carga e energizada com tensão nominal, modelando como quadripolo, equações (7) a (9), obtêm-se os dados da Tela 3.

Tabela 3 – Quadripolo da linha

l	1205,4	km
V_1	$\frac{345}{\sqrt{3}} = 199,2$	kV
$A = D$	$0,064 \angle 90^\circ$	
B	$289,315 \angle 87,67^\circ$	Ω
C	$3,471 \times 10^{-3} \angle 92,33^\circ$	S
V_2	$3112,5 \angle -90^\circ$	kV

Fonte: do autor

Assim, a tensão (e defasagem) no final da linha pode ser obtida por (7), dependendo apenas do comprimento da linha e sua constante de propagação (γ).

A fim de reduzir o tamanho e níveis de tensão da linha a valores possíveis de trabalhar em laboratório, foram adotados fatores de escala para as grandezas e parâmetros elétricos da linha (MOHAGHEGHI et al., 2007):

- Fator de escala de tensão: 20.000 com esse fator, a tensão nominal do sistema cai para cerca de 10V, tensão adequada ao laboratório
- Fator de escala de corrente: 800 com esse fator, a corrente nominal do sistema cai para cerca de 0,5A, adequada a capacidade dos componentes elétricos de bancada.

A fim de manter as relações elétricas, os fatores de escala de potência e impedância devem obedecer as relações:

$$V = ZI \quad (14) \quad S = VI \quad (15)$$

Tabela 4: Relações de escala linha/modelo

V	199,2kV	20.000	9,96V	
I	800A	1.600	0,50A	
Z		12,50		
S		32.000.000		
				Grandeza
	Valores nominais	Fator de escala	Valor no modelo	

Fonte: do autor

Com os fatores de escala definidos, o modelo em escala da linha pode ser calculado baseado nos parâmetros da linha real (Tabela 5).

Tabela 5 -Parâmetros elétricos do modelo em escala

z	$2,4480 + j300,24$	$m\Omega/km$
y	$j0,5646$	mS/km
Zc	$23,098\angle -2,331^\circ$	Ω
γ	$(0,053 + j1,303) \times 10^{-3}$	$1/km$

Fonte: do autor

Com os parâmetros elétricos do modelo em escala, pode-se determinar o valor dos componentes do circuito Pi que modela a linha. Conforme a teoria apresentada, o circuito depende do comprimento da linha e da frequência adotada (Tabela 6).

Tabela 6 – Parâmetros para modelo de 50km em 60Hz

Frequência	60	Hz
l	50	km
Z	$0,1224 + 1,5012i$	Ω
Y	$0,002823125i$	S
r	0,122	Ω
L	3,982	mH
$C/2$	3,744	μF

Fonte: do autor

Esses parâmetros permitem calcular o quadripolo da linha (Tabela 7).

Tabela 7 – Quadripolo do modelo de 50km em 60Hz

$A = D$	$0,998 \angle 0,010^\circ$
B	$1,505 \angle 85,342^\circ$
C	$2,821 \times 10^{-3} \angle 90,003^\circ$

Fonte: Do autor

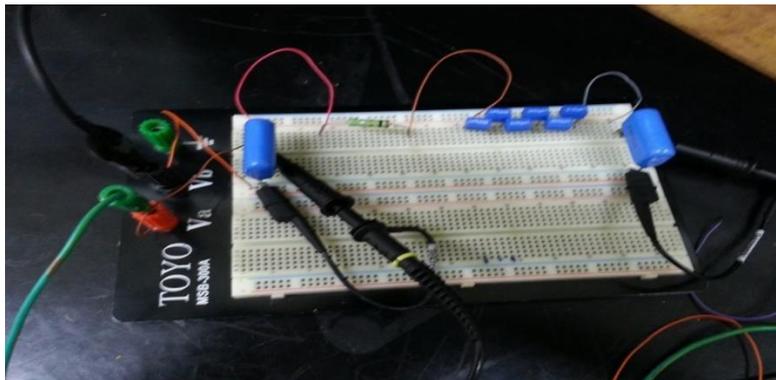
Verifica-se que trechos curtos de linha geram variações de tensão e fase entre a entrada e saída muito pequenos e de difícil medição.

Na intenção de reproduzir um trecho de 95km de uma linha, utilizamos a frequência de 400Hz. Os valores dos componentes foram calculados, chegando nos seguintes números:

- $R = 2\Omega$
- $L = 4,6mH$
- $C_{entrada} = 4,639nF$
- $C_{saída} = 4,781nF$
-

O circuito então foi montado (Fotografia 1) e testado conforme os parâmetros calculados, mas obteve-se uma resistência muito alta devido a série de indutores ligados, apresentando um valor de aproximadamente 68 Ω .

Fotografia 1- Montagem do circuito Pi



Fonte: do Autor

Foi decidido então construir um indutor que pudesse atender às necessidades do circuito, sem que a impedância alterasse os parâmetros do modelo.

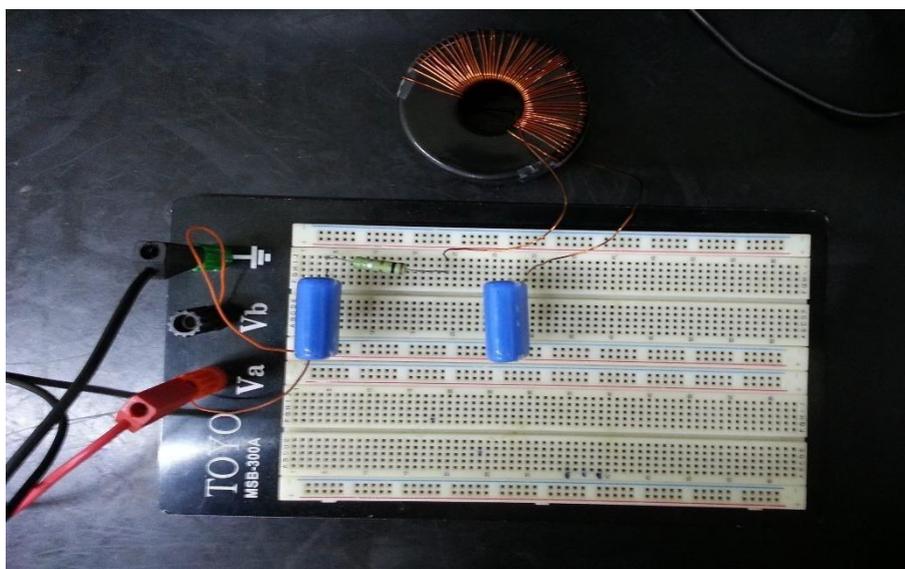
A fim de se obter a indutância calculada, foi construído um indutor com um núcleo toroidal de ferrite. O número de espiras em um indutor toroidal pode ser calculado por (CARR, 2016):

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

Onde: N número de espiras
L indutância
 A_L Fator de indutância do núcleo

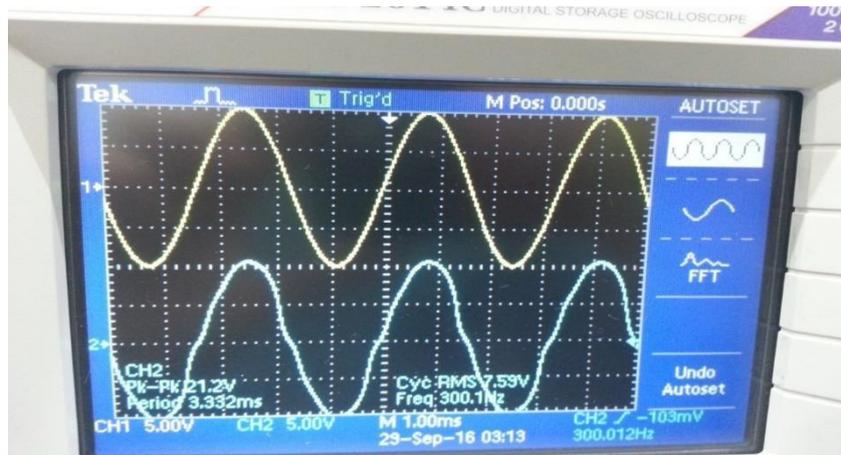
O novo indutor foi montado no circuito (Fotografia 2) e apresentou o valor de indutância desejado sem apresentar uma impedância prejudicial à reprodução da linha. No entanto, foi verificada uma distorção no sinal de saída provocada pela captação de ondas externas e, verificou-se que a irregularidade da distorção aumentava de acordo com o aumento da frequência.

Fotografia 2 - Circuito ligado com indutor toroidal.



Fonte: do Autor

Fotografia 3 - Medição da distorção no sinal de saída provocado pelo indutor com núcleo de ferrite.



Fonte: do Autor

Fotografia 4 – Medição da onda de corrente.



Fonte: Do autor

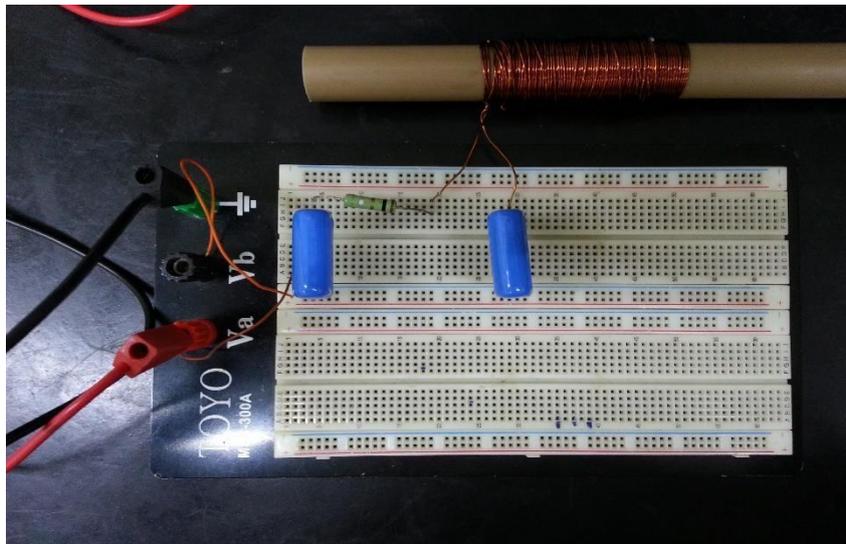
Depois de outras duas tentativas sem sucesso tentando construir indutores com núcleos menores optou-se por fazer um indutor com núcleo de ar (ou sem núcleo) de acordo com a equação:

$$L = \frac{1,256 \cdot S \cdot N^2}{C \cdot 10^8} \quad (16)$$

- Onde: L indutância
 S Área abrangida por uma espira
 C comprimento do enrolamento
 N número de espiras.

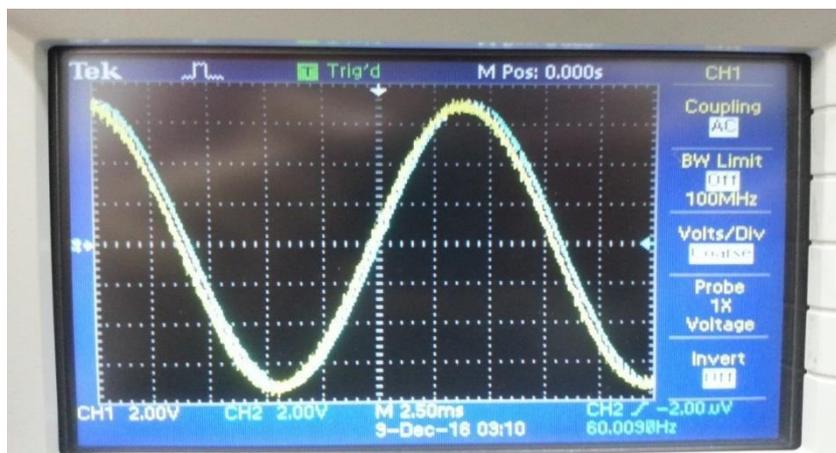
Mas ainda assim, foi feito um indutor em torno de um cano de PVC com aproximadamente duzentas espiras e foi obtido o valor de 0,27mH (Fotografia 5). Este foi testado no circuito e apresentou um sinal excelente na saída, mesmo em altas frequências (Fotografia 6).

Fotografia 5 - montagem do circuito com indutor com núcleo de ar



Fonte: do Autor

Fotografia 6 – Medição de tensão no sinal de saída (limpo devido ao indutor sem núcleo)



Fonte: Do autor

Um dos desafios do trabalho foi encontrar um valor de frequência que pudesse representar em escala a linha de tamanho real, portanto, foram testadas no circuito várias frequências diferentes e foi observado o efeito de cada frequência (Tabela 8).

Tabela 8 – Testes de frequência e análise de defasagem

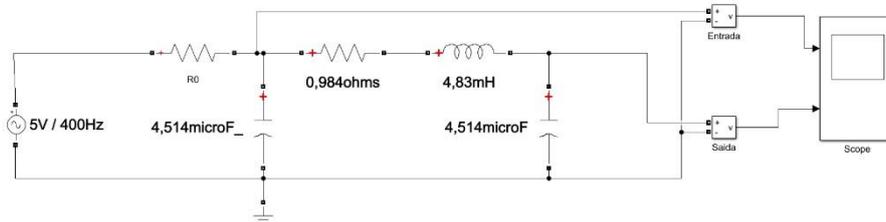
Frequência (Hz)	Defasagem (graus)	Tensão de entrada (V)	Tensão de saída (V)
60	7,3	5,01	4,98
120	14,6	5,07	4,95
180	21,1	5,00	4,80
240	29,8	5,02	4,59
300	33,7	4,91	4,33
360	41,9	4,86	4,15
400	45,6	4,84	3,99
420	48,8	4,83	3,85
1000	87,0	4,67	2,01

Fonte: do Autor

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

O mesmo circuito em estudo foi simulado no software matlab para dois comprimentos de linha (Circuito 4 e Circuito 5), onde foi observado o comportamento da onda respeitando os valores calculados e apresentando as características esperadas com a vantagem de não ter apresentado distorções no sinal de saída. A defasagem na linha ocorreu conforme o esperado (Tela 1 e Tela 2).

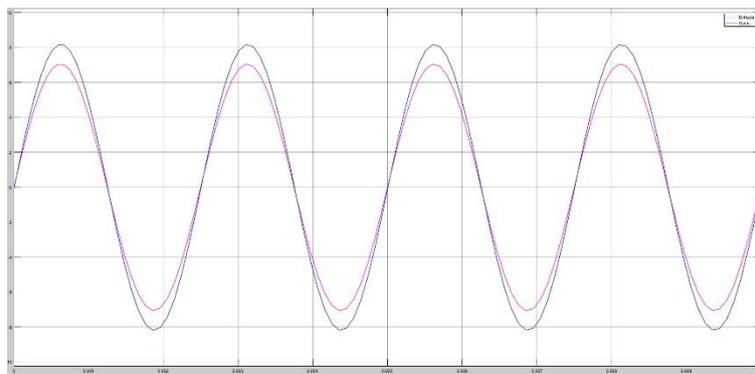
Circuito 4 – Modelo da linha no Matlab – 1/16 comprimentos de onda



Modelo 1/16 do comprimento de onda

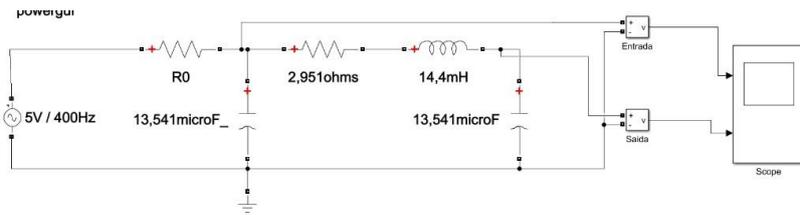
Fonte: Do autor

Tela 1 – Medição da tensão de entrada e saída a 1/16 comprimento de onda



Fonte: Do autor

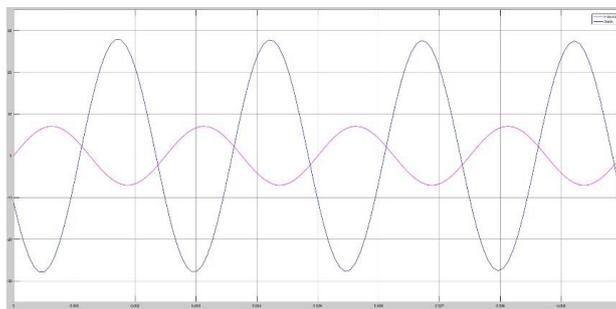
Circuito 5 – Modelo da linha no Matlab – 1/4 comprimentos de onda



Modelo 1/4 do comprimento de onda

Fonte: Do autor

Tela 2 – Medição da tensão de entrada e saída a 1/4 comprimento de onda



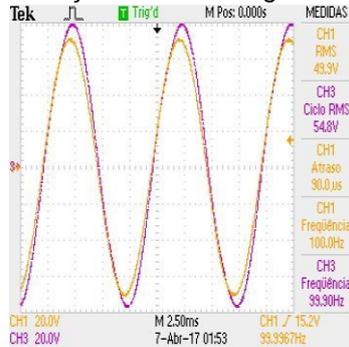
Fonte: Do autor

Quando a simulação se aproxima da frequência de 400 Hz, o circuito apresentava um ruído sonoro, provavelmente decorrente da aproximação da frequência à frequência de ressonância dos capacitores/indutor. Portanto, essa frequência foi evitada nas simulações a fim de evitar possível queima do circuito.

O modelo foi testado com algumas frequências diferentes para análise de atenuação e defasagem da onda, com a reposição do primeiro indutor fabricado (49mH), para a repetição de algumas análises.

Em baixas frequências, a defasagem e atenuação da onda foi pequena (Tela 3).

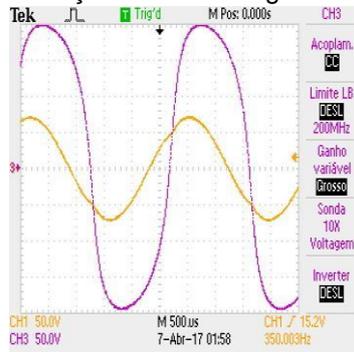
Tela 3 – medição do circuito ligado em 100 Hz



Fonte: Do autor

Para frequências próximas a 400Hz, observa-se uma grande distorção da forma de onda (Tela 4).

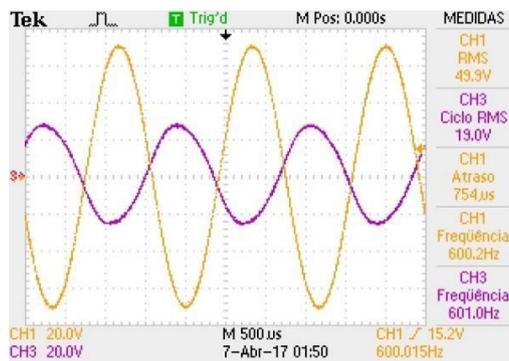
Tela 4 – Medição do circuito ligado em 350 Hz



Fonte: Do autor

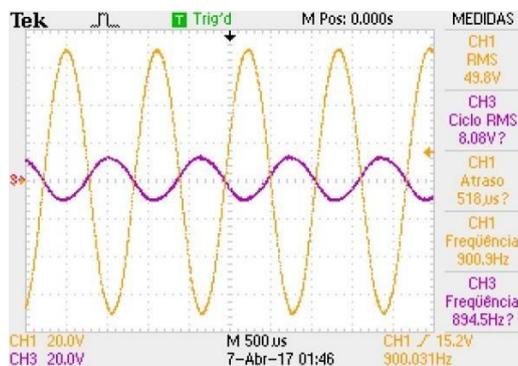
Em frequências acima de 400Hz, a distorção desaparece e o efeito de atenuação/defasagem aparece (Tela 5 e Tela 6).

Tela 5 _ medição do circuito ligado em 600 Hz



Fonte: Do autor

Tela 6 – Medição do circuito ligado em 900 Hz



Fonte: Do autor

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do trabalho verificou-se as dificuldades em construir um modelo físico de uma linha de transmissão. O cálculo da escala do modelo e dos parâmetros elétricos estão definidos em teoria, mas, a determinação da frequência do modelo e encontrar componente comerciais com os valores determinados foi difícil. Indutores comerciais não atendem os requisitos dos modelos (alta resistência) e precisam ser construídos e testados.

O teste do modelo depende dos equipamentos disponíveis no laboratório, uma fonte de tensão sem interferências e distorções é imprescindível bem como um osciloscópio adequado para baixas frequências. Além disso os indutores, para certas frequências, funcionam como antenas para ruídos, impedindo medições adequadas no modelo.

Um problema não previsto foi um ruído excessivo no circuito para certas frequências, próximas a 400Hz. Uma análise do circuito indicou que essa frequência coincide com a ressonância do sistema, impedindo seu uso nessa faixa devido ao aumento da corrente. Como 400Hz é uma frequência historicamente utilizada em modelos físicos de sistemas de potência (Westinghouse, 1964), será necessário um estudo futuro para resolver o problema.

Apesar das dificuldades, obteve-se um modelo monofásico de uma linha de transmissão que opera adequadamente em frequências acima de 60Hz.

Como futuros estudos é necessário resolver os problemas de interferência externa nos indutores (ruído), evitar ressonâncias nas frequências de trabalho e chegar a um modelo trifásico da linha para uma representação completa de uma linha de transmissão real.

6. REFERÊNCIAS

ALCAHUAMAN, Milton Elvis Zevallos. **Análise de sensibilidade da corrente de arco secundário para diferentes linhas de transmissão**. 2007. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000431830>>. Acesso em: 01 jul. 2016.

BARCHOWSKY, Ansel et al. Design and Realization of an Innovative Workbench for Electric Power Systems Laboratories. **IEEE Transactions On Power Systems**, [s.l.], v. 30, n. 6, p.2894-2901, nov. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpwrs.2014.2371825>.

CAMARGO, C. C. B. Transmissão de energia elétrica: aspectos fundamentais. 3. ed. rev. e ampl. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2006. 277 p. FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas: teoria das linhas em regime permanente**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1977. 2 v. (xx, 588 p.)

CARR, Joseph J.. **Construção de Bobinas Toroidais**. Disponível em: <<http://digoreis.net/temp/Apostilas/toroidais.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2016.

CHOWDHURY, B. et al. Enhancing power and energy systems concepts with laboratory experience. **2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting**, [s.l.], p.15, 2013. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pesmg.2013.6672473>.

GUIRELLI, Cleber Roberto; MATILE, Ivanilda. **Transmissão de Energia Elétrica: Teoria e Prática em linhas aéreas**. São Paulo: Editora Mackenzie, 2014. 174 p.

KUZLE, Igor et al. Hands-on laboratory course for future power system experts. **2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting**, [s.l.], p.1963-1971, jul. 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pesgm.2015.7285716>.

LEMOS, João Ricardo Ferreira. Modelos de linha de transmissão. In: LEMOS, João Ricardo Ferreira. **Modelagem de linha de transmissão para estudo de transitórios eletromecânicos**. Rio de Janeiro: Monopoli, 2008. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-demestrado/2008-1/2008060202-2008060202/file>>. Acesso em: 01 ago. 2016.

MEHR, Vahid Salehi Pour et al. Laboratory-based smart power system, Part II: Control, monitoring, and protection. **2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting**, [s.l.], p.1405-1417, 2013. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pesmg.2013.6672647>.

MELIOPOULOS, A.p. Sakis et al. A laboratory setup of a power system scaled model for testing and validation of EMS applications. **2009 IEEE Bucharest Powertech**, [s.l.], p.1-8, jun. 2009. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ptc.2009.5282224>.

MOHAGHEGHI, S. et al. A Laboratory Setup for a Substation Scaled Model. **2007 IEEE Lausanne Power Tech**, [s.l.], p.1203-1208, jul. 2007. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pct.2007.4538487>.

SALEHI, Vahid et al. Laboratory-Based Smart Power System, Part I: Design and System Development. **IEEE Transactions On Smart Grid**, [s.l.], v. 3, n. 3, p.1394-1404, set. 2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tsg.2012.2194518>.

WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. **Electrical Transmission and Distribution Reference Book**. 4. ed. Pittsburgh: Westinghouse Electric Corporation, 1964. 824 p.

Contatos: lucasrosabastos5@gmail.com, cguirelli@mackenzie.br