



**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XVII Jornada de Pesquisa

## **MODELAGEM DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA CONSIDERANDO A APLICAÇÃO EM REDES INTELIGENTES (SMART GRIDS)<sup>1</sup>**

**Jonas Fernando Schreiber<sup>2</sup>, Paulo S. Sausen<sup>3</sup>, Airam T.Z.R. Sausen<sup>4</sup>, Mauricio Campos<sup>5</sup>.**

<sup>1</sup> Projeto de pesquisa realizado no curso de Mestrado em Modelagem Matemática da UNIJUI

<sup>2</sup> Mestrando de Modelagem Matemática, bolsista CAPES.

<sup>3</sup> Professor da UNIJUI

<sup>4</sup> Professora da UNIJUI

<sup>5</sup> Professor da UNIJUI

**Resumo:** Este artigo aborda a proposta de um estudo analítico dos modelos matemáticos utilizados em sistemas de distribuição de energia elétrica. Com os avanços tecnológicos, principalmente com as pesquisas em smart grids, smart metering entre outros, os tradicionais modelos precisam agora representar outros sinais além do sinal elétrico como, por exemplo, a transmissão PLC (Power Line Communication). Para este estudo são utilizadas duas plataformas de simulação: uma computacional e outra um emulador em escala de potência reduzida de uma rede elétrica construído especialmente para este fim. Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo principal a validação de um modelo matemático computacional de um trecho de uma rede de distribuição de energia elétrica, avaliando o seu desempenho tanto a nível de representação elétrica, como também nas transmissões de sinal de comunicação em alta frequência.

**Palavras-chave:** Sistema de distribuição de energia, smart grids, Power Line Communication

### **Introdução**

A energia elétrica representa de forma muito consistente, a capacidade de evolução do ser humano, se caracterizando como fundamental e exercendo uma importante função na sociedade, pois contribui com o crescimento e bem estar de todos. Os sistemas de distribuição de energia elétrica utilizados atualmente foram desenvolvidos na década de 40 do século passado, e com o passar dos anos vários aperfeiçoamentos foram sendo realizados, sempre, objetivando garantir o bom desempenho, aprimoramento e robustez deste sistema. Neste sentido, em função do grande avanço da tecnologia da informação e da automação, alguns novos conceitos foram surgindo, entre eles, destaca-se o conceito de Redes Inteligentes (Smart Grids). As Redes Inteligentes caracterizam-se por novas tecnologias que vêm sendo empregadas para tornar o sistema elétrico uma rede moderna integrando fontes de energia renováveis, automação, iluminação e telemetria para gerenciamento de recursos (e.g., água, gás e eletricidade), conhecido também como medição inteligente (smart metering).

A partir do uso destas novas tecnologias (i.e., Smart Grid e Smart Metering) os modelos tradicionais utilizados para representar as redes de distribuição de energia não foram validados no sentido de



**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XVII Jornada de Pesquisa

verificar como os mesmos se comportam para representar, corretamente, outros sinais além do sinal elétrico. Um exemplo, destas novas tecnologias, é a transmissão Power Line Communication (PLC). A transmissão de dados utilizando a rede elétrica possui diversos desafios, dentre eles pode-se destacar o problema de ruídos. Ocasionalmente, principalmente, pela utilização de diversos tipos de aparelhos elétricos plugados na rede elétrica, fazendo com que seja alterado a atenuação do sinal de transmissão. Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho é avaliar a utilização de modelos matemáticos, amplamente utilizados para simular linhas de distribuição, verificando se estes modelos ainda podem ser utilizados agora levando em consideração as novas tecnologias empregadas no conceito de Smart Grid (i.e., transmissão PLC).

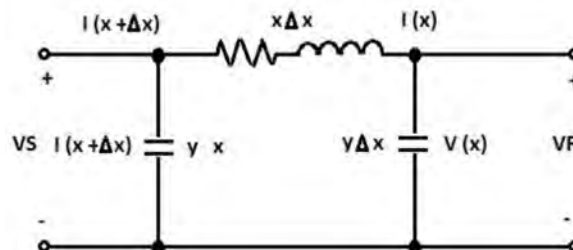
### Metodologia

Para o desenvolvimento deste estudo, é necessária a adoção de modelos que representem o comportamento real de um sistema de transmissão de energia elétrica, ou seja, a representação de linhas de circuitos ideais. Os modelos são escolhidos de acordo com a extensão, podendo ser caracterizadas como de linhas curtas (até 80Km), linhas médias (entre 80km e 240km) e linhas longas (acima de 240km)[1].

Segundo a literatura[2][3], linhas curtas podem ser representadas apenas por componentes resistivos e indutivos, desprezando-se normalmente o efeito capacitivo. Fundamentalmente isso se deve ao fato de que por se tratarem de pequenos trechos estas capacitâncias são muito pequenas, se comportando como um circuito aberto para sinais de baixa frequência tais como sinais elétricos (60Hz). As linhas médias são comumente representadas pelo modelo  $\pi$ ; e as linhas longas, devido ao grande comprimento, podem ser representadas por mais de um modelo  $\pi$ ; ou pelo modelo a parâmetros distribuídos[4][3].

De forma resumida, de acordo com os conceitos apresentados em [5], deve ser levado em conta o tempo de tráfego das ondas eletromagnéticas para chegar ao destino, utilizando como parâmetro a distância da linha de transmissão. Neste projeto, como já apresentado, objetiva-se avaliar justamente o comportamento dos sinais em linhas de distribuição, as quais também podem ser abstraídas como linhas de transmissão menores. Assim, utilizamos o modelo PI equivalente uma vez que as demais não permitiriam a representação dos sinais de 60Hz nestas condições.

Para avaliar o comportamento elétrico da transmissão destes sinais tanto em baixa como em alta frequência, foi utilizado um modelo computacional e também um protótipo em escala de potência reduzida de uma rede de distribuição de energia elétrica de média tensão. O modelo que será utilizado neste projeto é demonstrado pela Figura 1:





**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico  
**Evento:** XVII Jornada de Pesquisa

Figura 1 - Circuito PI equivalente

Para o circuito apresentado na figura 1 temos que,

$$Y = (g + j\omega L)C \quad (01)$$

$$Z = (r + j\omega L) \quad (02)$$

onde  $Z$ =impedância em série ( $\Omega$ ),  $r$ =resistência dos condutores ( $\Omega$ ),  $L$ =indutância das linhas (mH),  $g$ =condutância,  $C$ =capacitância fase/neutro (F/Km) e  $Y$ =admitância em derivação por fase ao neutro por unidade de comprimento (S).

Com as novas e modernas tecnologias apresentadas, esta definição pode ser alterada uma vez que temos agora altas e baixas frequências trafegando simultaneamente. Desta forma a revalidação deste modelo é de fundamental importância para simulação computacional em sistemas deste tipo. Para caracterizar o estudo foi escolhido aleatoriamente um trecho da rede de distribuição da concessionária municipal de energia elétrica de Ijuí/RS (DEMEI), sendo composto por cargas distribuídas ao longo da rede com os seus devidos parâmetros, alguns discriminados no diagrama unifilar apresentado na Figura 2.

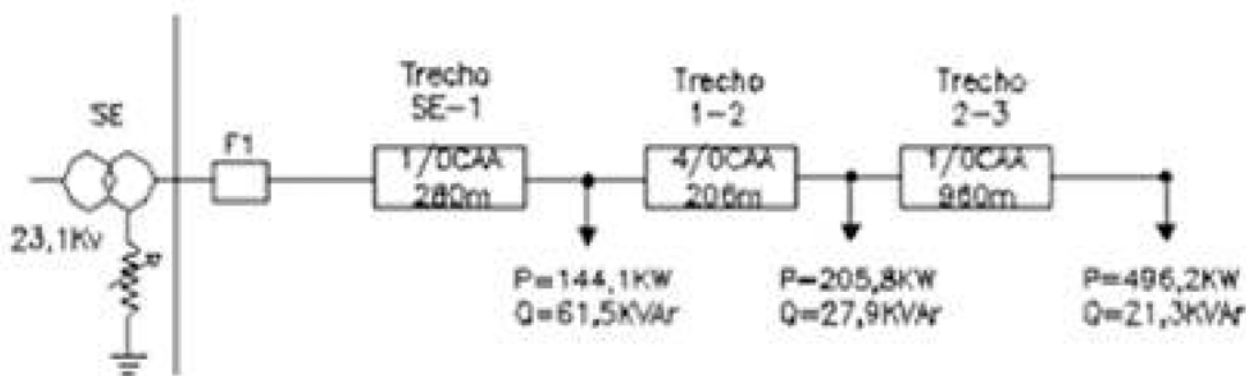


Figura 2 - Trecho a ser utilizado no modelo

Foi necessária uma adaptação ao Communication Blockset do MATLAB/Simulink para permitir a simulação do comportamento da linha de potência, cuja função de transferência[6], já considerando o circuito PI completo, é dada por

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XVII Jornada de Pesquisa

$$H(s) = \frac{2}{LCs^2 + RCs + 2} \quad (03)$$

## Resultados e discussão Modelo Simulado

Para a simulação no modelo em escala de potência reduzida, foi inserida uma fonte de tensão com frequência alta, típica de uma transmissão PLC dentro da faixa permitida pela norma CENELEC banda A, 90kHz direto na linha de transmissão de média tensão, com potência de 1V.

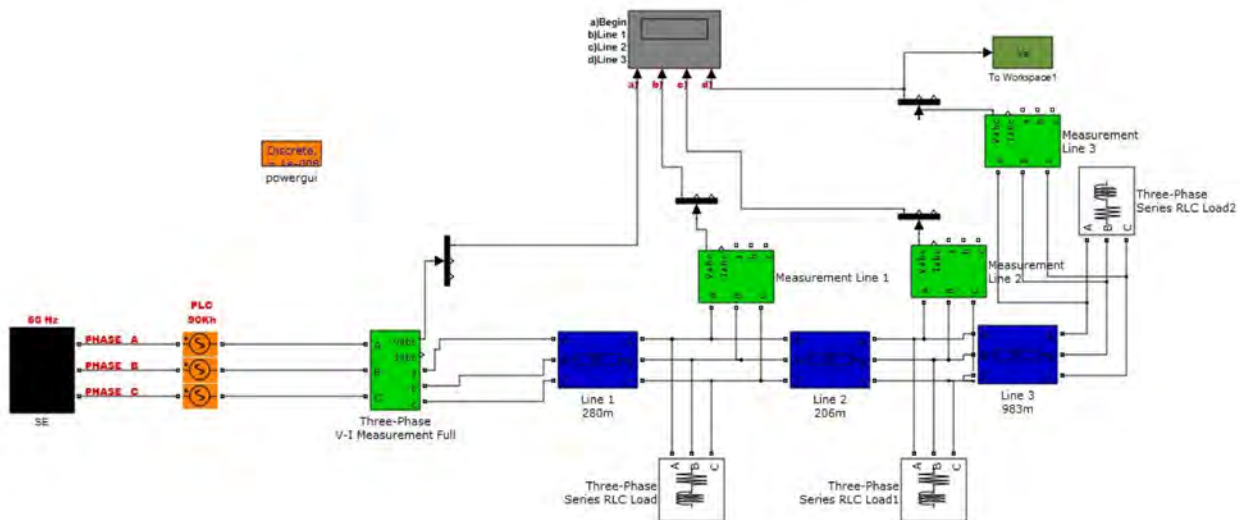


Figura 3 - Circuito em MATLAB/Simulink utilizado para a simulação

De acordo com a Fig. 3 podemos observar que foram inseridas as fontes de energia de 60Hz no bloco preto e de 90kHz nos blocos laranja, sendo que a alta frequência foi inserida na rede de transmissão de forma serial. Em todas as leituras foi levada em conta apenas a fase A, mesmo com uma linha de transmissão trifásica, e o foco do estudo foi o final da linha. Pegando por base a leitura obtida no terceiro ponto, foram escolhidos 4 ciclos completos aleatoriamente, onde conseguimos verificar o seguinte sinal de tensão na alta frequência resultante:





**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XVII Jornada de Pesquisa

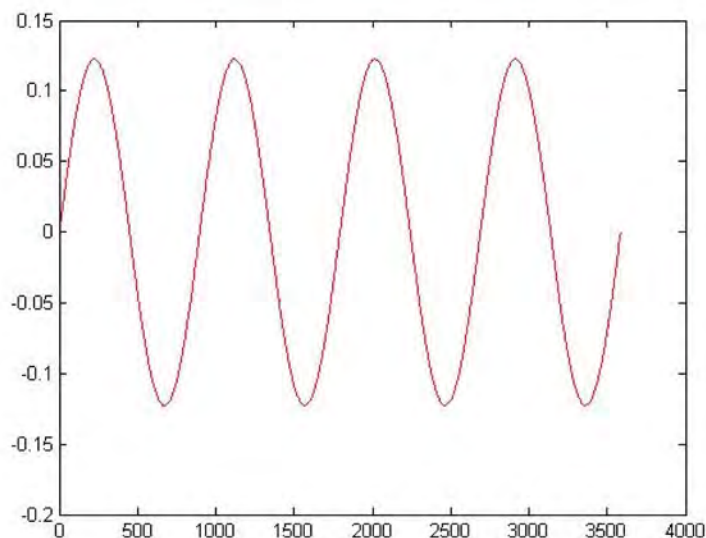


Figura 4 - Sinal de alta frequência obtido no Matlab

#### Modelo em escala reduzida

Para este estudo foi desenvolvido um emulador em escala reduzida para comprovar a validade do experimento. A escala foi de 1:1000, ou seja, o transformador comumente com tensão de 23.1kV foi alimentado em 23.1V. A corrente RMS da linha de transmissão ficou em 11.54A o que dificulta o experimento em laboratório, portanto foi adotada uma relação de 1:11,54 em escala reduzida.

Para a montagem do protótipo foram utilizados componentes com as mesmas configurações da simulação no Simulink. Este protótipo foi validado para a frequência de 60Hz onde os resultados são conhecidos. O circuito emulador pode ser observado na montagem abaixo:



**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XVII Jornada de Pesquisa



Figura 5 - Protótipo com analisador instalado

O modelo reduzido permite a obtenção de dados de média tensão sem a necessidade em um primeiro momento de se realizar medições na rede real uma vez que isto não se constitui em uma tarefa simples. Como foi dito anteriormente, os valores de capacitância, indutância, reatância e voltagem sofreram uma redução em escala para permitir a construção do emulador. Analisando o ponto final do circuito temos:



**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XVII Jornada de Pesquisa

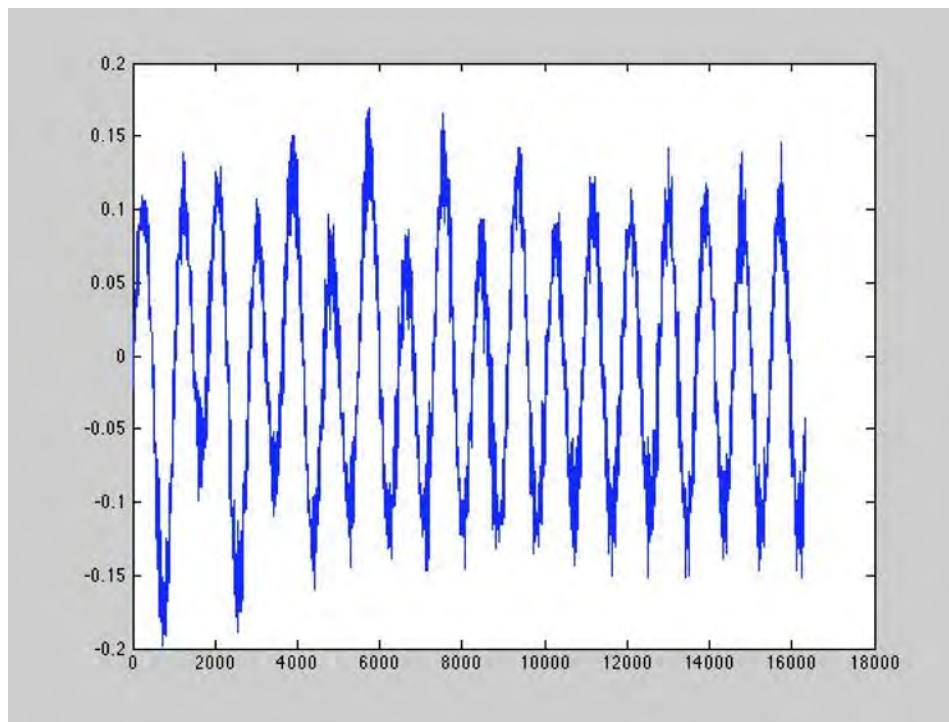


Figura 6 - Gráfico da tensão no protótipo em escala reduzida

Como pode ser observado na Fig. 6, é visível a interferência do ruído encontrado, mesmo com a utilização de uma fonte especial para a geração dos sinais.

#### Conclusões

Conforme pode ser observado nas figuras 4 e 6, as formas de onda para o modelo PI simulado e para o circuito equivalente reduzido são bastante aproximadas, entretanto pode-se verificar que a atenuação de alguns pontos no circuito emulado é maior. Constata-se também que a comparação correta do modelo fica comprometida pela quantidade de ruídos presentes no circuito o que dificultam a correta visualização. Porém mesmo com estes problemas ainda pode-se observar que ambos os modelos se comportam de forma muito similar:



**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XVII Jornada de Pesquisa

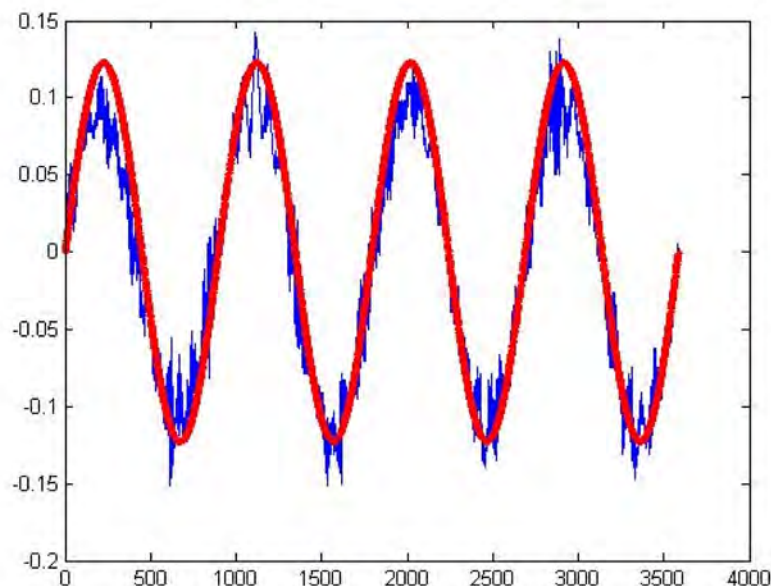


Figura 7 - Gráfico simulação X Emulador

Na Fig. 7 observa-se que o gráfico real (i.e., azul) segue a mesma ondulação do gráfico simulado (i.e., vermelho). As distorções que aparecem no gráfico é em decorrência dos ruídos presentes no protótipo, especialmente porque no protótipo são usadas cargas em escala reduzidas, porém os ruídos não seguem este padrão. A partir dos resultados preliminares obtidos neste artigo pode-se concluir que o modelo PI representa, de forma satisfatória, a transmissão em baixa frequência, porém não é possível afirmar que este comportamento será mantido para transmissões em alta frequência.

Objetivando a validação final do modelo pretende-se estender este trabalho para transmissão e medição em baixa tensão. Para tanto será utilizado um trecho com potência real em um ponto crítico e central da cidade de Ijuí-RS. Neste segmento será instalado um sistema mestre escravo PLC e a partir dos dados reais será possível realizar as necessárias otimizações no modelo PI para que este seja capaz de simular, de forma eficiente, a transmissão tanto de baixa como de alta frequência.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de Iniciação Científica disponibilizada para este Projeto de Pesquisa, à Universidade Regional do Noroeste do Estado do RS (UNIJUI) e Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC).

#### Referências Bibliográficas

1. Oliveira C. C. B., Robba E., Kagan N., “Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica”. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.





**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XVII Jornada de Pesquisa

2. Leger, Aaron St., “Transmission Line Modeling for the Purpose of Analog Power Flow Computation of Large Scale Power Systems”. Thesis to Master of Science in Electrical Engineering. Drexel University, USA, 2005.
3. Silva F. L., “Modelagem de transformadores trifásicos de distribuição para estudos de fluxo de potência”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil, 2004.3. Gotz M., Rapp M., Dostert K. “Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design. IEEE Communications Magazine, April 2004.
4. Andersson G., “Modelling and Analysis of Electric Power Systems”, ETH Zurich, September 2008.
5. Watson, N. and Arrillaga, J. “Power Systems Electromagnetic Transients Simulation”. Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, published in 2003 and reprinted in 2007.
6. Dias P., et.al, “Modelagem da Rede de Distribuição de Energia Elétrica para Aplicações de Canais PLC”, Cidel Argentina, 2010.
7. Dostert K., “Powerline Communications”, New Jersey: Prentice Hall, 2001. ISBN-0-13-029342-3.
8. Tran-Anh, T.; Auriol, P.; Tran-Quoc, T.; “Distribution network modeling for Power Line Communication applications”. In: Power Line Communications and Its Applications, 2005.



Para uma vida de CONQUISTAS