

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico

Evento: XXI Jornada de Pesquisa

APLICAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA¹

Ana Júlia Dos Santos Da Silva², Gabriel Calvaitis Santana³, Leonardo Bressan Motyczka⁴, Paulo Sérgio Sausen⁵, Airam Teresa Zago Romcy Sausen⁶, Maurício De Campos⁷.

¹ Pesquisa desenvolvida pelo Grupo de Automação Industrial e Controle da Unijuí

² Mestranda em Modelagem Matemática, Unijuí, bolsista Capes, ana_juliass@yahoo.com.br

³ Graduando em Engenharia Elétrica, Unijuí, bolsista Unijuí, gabriel_csantana@hotmail.com.

⁴ Mestrando em Modelagem Matemática, Unijuí, bolsista Capes, leomoty@gmail.com.

⁵ Prof^o. Dr. do PPG em Modelagem Matemática, Unijuí, orientador, sausen@unijui.edu.br.

⁶ Prof^a. Dra. do PPG em Modelagem Matemática, Unijuí, coorientadora, airam@unijui.edu.br.

⁷ Prof^o. Msc. da graduação em Engenharia Elétrica, Unijuí, colaborador, decampos.mauricio@gmail.com.

1. Introdução

Um sistema de energia elétrica é formado por geradores, transformadores (elevadores e abaixadores), Linhas de Transmissão (LT) e alimentadores (MONTICELLI; GARCIA, 2013). Este último é responsável por distribuir a energia até os consumidores finais (residências, indústrias e empresas), através das Linhas de Distribuição (LD). Neste sentido, devido a necessidade das concessionárias em atender à crescente demanda de energia pelos consumidores, com qualidade e a custos competitivos, aliado ao fato de que a maioria das faltas e falhas de energia ocorrem na rede de distribuição, a modelagem matemática, assim como as demais técnicas para a otimização dos sistemas de distribuição de energia elétrica, se configuram como importantes ferramentas para o gerenciamento e expansão destas concessionárias.

As LDs são responsáveis por transportar a energia até os consumidores finais (JUNIOR, 2013). Para alcançar este objetivo, e entregar energia de qualidade ao consumidor, é preciso adaptar-se às suas exigências, isto é, não interromper a transmissão de energia, mas caso ocorra esta interrupção, é necessário que a energia seja reestabelecida o mais rápido possível. Além disto, a concessionária precisa corresponder às expectativas de demanda de energia dos consumidores, caso estes desejem aumentar a carga de acordo com sua necessidade.

Desta forma, o Sistema Elétrico de Potência (SEP) e principalmente o sistema de distribuição, buscam novos avanços para a otimização da rede, visando minimizar e prever falhas e faltas no fornecimento de energia. É preciso ressaltar ainda, que o sistema elétrico caminha para o limite de sua capacidade operacional e neste sentido, se faz necessária, a implantação de novas tecnologias que possam corresponder à esta crescente demanda por energia elétrica.

Um destes novos conceitos de tecnologia, amplamente debatido recentemente, é a chamada rede inteligente (i.e., Smart Grid), a qual incorpora benefícios, tais como, comunicação de dados e tecnologias de informação, que são usadas para criar inteligência na rede, fornecer informações em tempo real do estado de carga da rede, e prever possíveis falhas que possam ocorrer. Entretanto, para a implantação destes novos conceitos de sistemas de energia, é preciso, inicialmente, desenvolver a modelagem matemática da rede e a partir desta, realizar simulações computacionais e compará-la com um sistema real.

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico

Evento: XXI Jornada de Pesquisa

Neste contexto, o presente artigo, tem como principal objetivo, a realização da modelagem matemática de um segmento da rede de distribuição de energia do DEMEI. Para tanto, será utilizado o modelo PI e a representação computacional de parte de um segmento da LD do alimentador ALIJUÍ17, sendo realizada a validação deste trecho, através de dados reais coletados da linha "viva" do DEMEI. A partir desta validação inicial de um pequeno segmento, será possível desenvolver/construir o modelo completo de todo o segmento de distribuição de Média Tensão (MT) da concessionária que será utilizado para definir a necessidade e a localização de filtros ativos de potência objetivando a melhoria da qualidade de energia fornecida pela concessionária DEMEI. Destaca-se que o presente trabalho está inserido como parte de um projeto maior intitulado: "Análise, Modelagem e Desenvolvimento de Estratégias de Utilização de Filtros Ativos de Potência Cooperativos em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica", o qual é um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com aporte financeiro do DEMEI.

2. Metodologia

Para o desenvolvimento desta pesquisa, será realizada a modelagem matemática da rede de distribuição primária (i.e., MT), da classe de 23 kV do DEMEI. Para isto foi elaborada, inicialmente, uma revisão bibliográfica acerca das características do SEP e dos modelos matemáticos utilizados para representar circuitos elétricos de LTs e de redes de distribuição de energia.

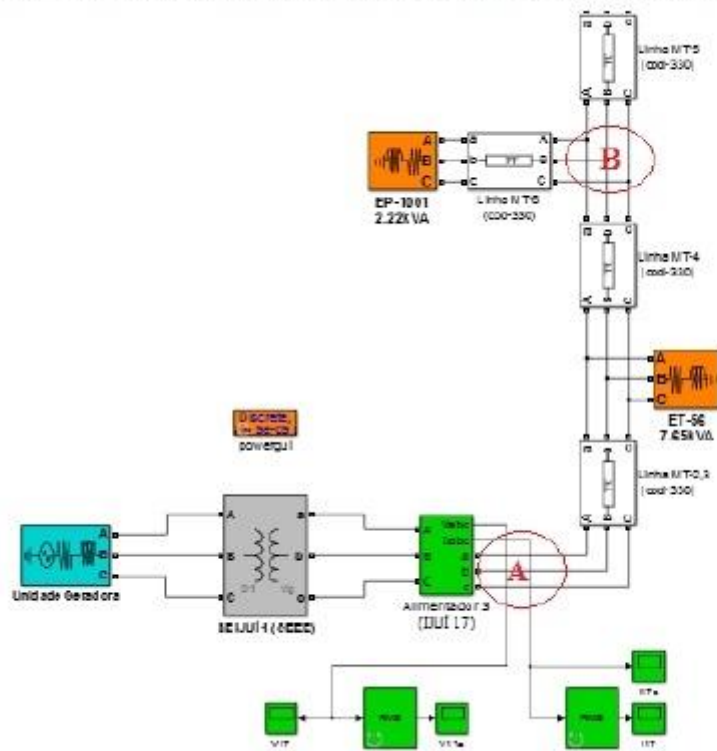
Neste sentido, foi dada ênfase ao estudo do modelo matemático PI, por se tratar de um modelo usualmente utilizado para a modelagem de LTs de energia elétrica, além deste modelo já ter sido validado por Schreiber (2013), para um circuito em escala reduzida representando um segmento de rede, compondo uma das pesquisas realizadas pelo GAIC (Grupo de Automação Industrial e Controle), referente a este tema. Feito isto, foi escolhido um segmento da rede de distribuição do DEMEI onde foi instalado o sistema de aquisição dos dados, tensão e corrente. Através desta experimentação, foi obtido o conjunto de dados, os quais representam o sistema real. Neste momento, se fez necessária a implementação computacional, na qual foi utilizada como ferramenta de apoio, o software de computação algébrica e numérica Matlab. A seguir é realizada uma descrição mais detalhada desta metodologia, a partir da caracterização da rede utilizada e do modelo matemático proposto.

2.1. Caracterização da Rede

Para a realização da modelagem matemática, foi construído, no software Matlab/Simulink, uma representação geométrica da rede primária do DEMEI, conforme Figura 1, que apresenta o trecho do alimentador ALIJUÍ17 (trecho AB), de uma das subestações da concessionária, com as mesmas características da rede física. Cabe ressaltar, que a subestação mencionada, possui 4 alimentadores, sendo que todos estes já estão representados no Simulink. Porém neste artigo, será realizada a modelagem matemática do trecho AB de apenas um destes alimentadores (i.e., alimentador ALIJUÍ17). Este segmento possui 476,31 metros, e neste caso utiliza-se os dados de entrada no ponto A e os dados de saída no ponto B.

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

Figura 1 - Representação geométrica da rede primária no *Simulink* (trecho AB).



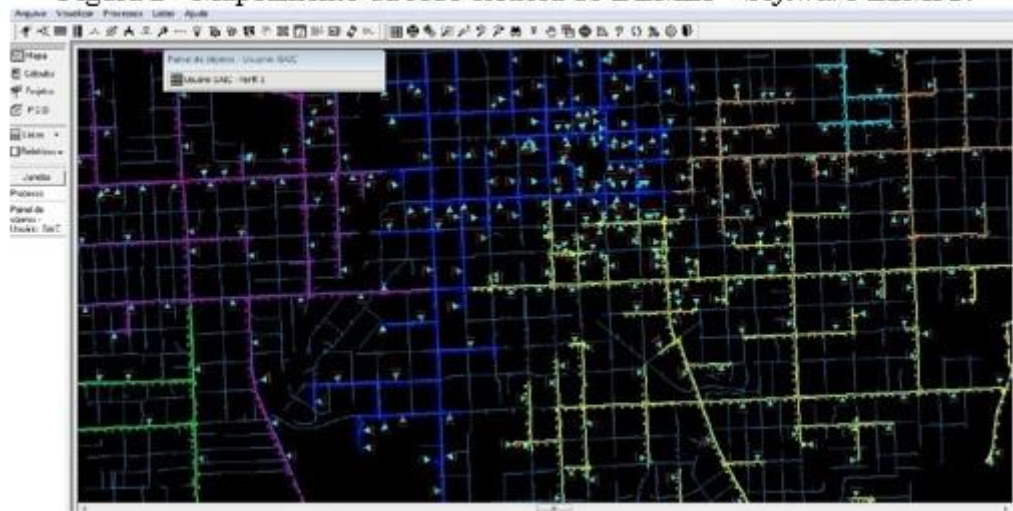
Fonte: Elaborada pelos autores.

Os parâmetros de configuração e caracterização da rede física para a construção da rede no Simulink, foram fornecidos pela concessionária através do software E2MIG (conforme Figura 2), o qual exibe o mapeamento da cidade de Ijuí e o trecho de cada alimentador. Desta forma, obteve-se, além da representação geométrica da rede, os dados de caracterização da mesma, como tipo do condutor e seus respectivos parâmetros (resistência, indutância e capacitância), distância entre as cargas, entre outros.

Diante disto, ao estudar os modelos citados na literatura, identificou-se que o modelo PI representa satisfatoriamente o comportamento real dos circuitos elétricos de LTs de energia (GRAINGER, 1994; SCHREIBER, 2013). Este modelo é frequentemente utilizado pela literatura, de modo que o ambiente de simulação do Matlab/Simulink possui como padrão o bloco do modelo PI equivalente para a representação de LTs, o qual tem como entrada a resistência, a indutância e a capacitância por unidade de comprimento, além do próprio comprimento da linha.

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

Figura 2 - Mapeamento da rede elétrica do DEMEI – Software E2MIG.



Fonte: Elaborada pelos autores.

2.2. Modelagem Matemática

Segundo a literatura, pode-se dividir os modelos de LTs de acordo com seu comprimento (MONTEIRO, 2006). O comprimento das LTs em corrente alternada, podem variar entre alguns metros até em torno de mil quilômetros. Assim, a primeira avaliação a fazer é sob quais condições pode-se representar o comportamento resistivo, indutivo e capacitivo, os quais são distribuídos por toda extensão da linha, como concentrados em um único ponto (MONTICELLI, GARCIA 2013; LEMOS, 2008). É necessário, neste momento, calcular o comprimento da onda do sinal senoidal de 60 Hz. Como os sinais de uma LT se propagam com velocidade próxima à da luz (aproximadamente 3×10^5 km/s), o comprimento da onda é dado por:

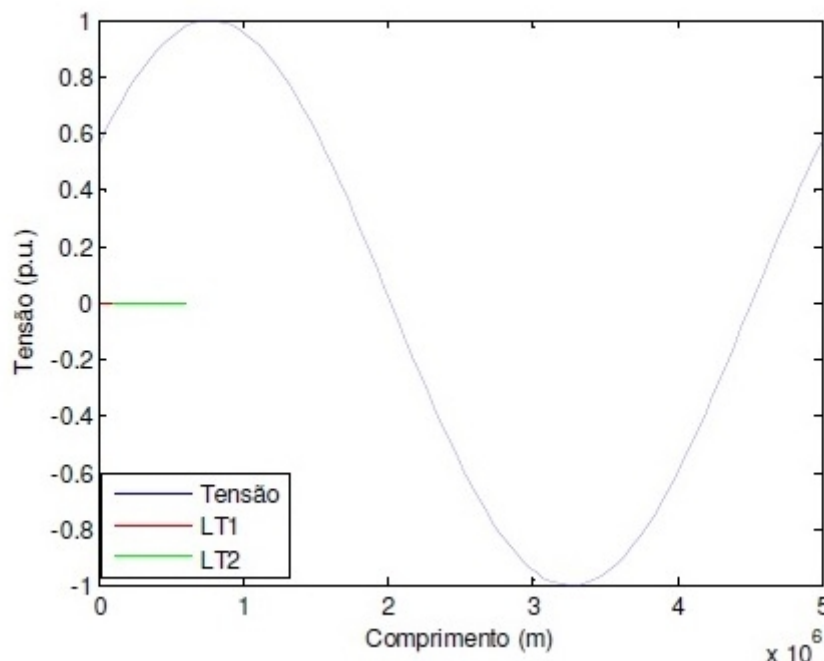
$$\lambda = \frac{c}{f} \cong 5000 \text{ km}, \quad (1)$$

onde: c é a velocidade da luz, f é a frequência da rede (geralmente 60 Hz ou 50 Hz) e λ é o comprimento de onda.

A seguir, apresenta-se na Figura 3, uma comparação de um ciclo da tensão com a extensão de duas LTs. A primeira (LT1) se estende por 100 km e a segunda (LT2), por 500 km e se inicia no ponto em que a primeira termina.

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

Figura 3 - Comparação entre a extensão da linha e o comprimento de onda.



Fonte: (LEMOS, 2008, p. 14).

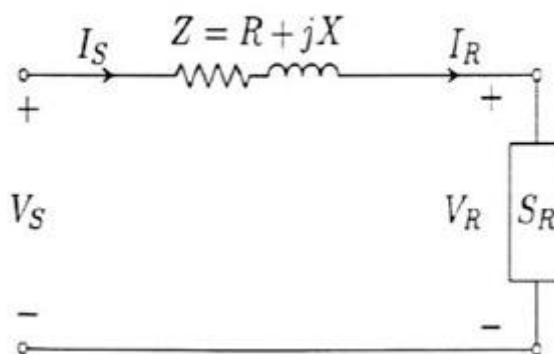
Como a variação da tensão da primeira linha é muito pequena, então pode-se considerar que a LT1 possui a mesma tensão em cada instante de tempo, isso equivale a considerar os parâmetros como se fossem concentrados em um único ponto (MONTEIRO, 2006). Para LT2, onde a variação da tensão é muito maior do que na primeira, não pode-se utilizar esta mesma concepção (LEMOS 2008), ou seja, quando a LT for muito menor que um quarto do comprimento da onda do sinal que possui aproximadamente 5000 km (definido pela equação (1)), os parâmetros envolvidos são considerados proporcionais ao comprimento da linha (i.e., parâmetros concentrados) (MONTICELLI, GARCIA, 2013). Para linha mais longas, entretanto, visando melhorar a precisão do modelo, é preciso considerar o comportamento real da linha (i.e., parâmetros distribuídos).

Neste sentido, os modelos dependem diretamente do comprimento das LTs, as quais são divididas em curtas (menos de 80 km), médias (entre 80 a 240 km) e longas (mais de 240 km). Na modelagem das linhas curtas e médias, considera-se o efeito dos parâmetros concentrados, ou seja, a resistência, a indutância e a capacitância são divididas igualmente ao longo da linha. Já na modelagem de linhas longas, considera-se o efeito dos parâmetros distribuídos e, desta forma, para facilitar o processo, pode-se dividir a linha longa em médias e/ou curtas e utilizar dois ou mais modelos PI para a modelagem matemática do sistema (SCHREIBER, 2013).

Por outro lado, como a rede de distribuição é ramificada ao longo das ruas e avenidas, os segmentos a serem modelados não ultrapassarão o comprimento relativo às linhas curtas (i.e., 80 km). Desta forma, para a modelagem realizada neste artigo, será utilizado o modelo PI com parâmetros concentrados e para LTs curtas, o qual é representado pelo circuito da Figura 4.

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

Figura 4 - Modelo PI para linhas curtas (< 80 km).



Fonte: (SCHEREIBER, 2013, p. 58).

Neste modelo, os comportamentos resistivo, indutivo estão concentrados em Z , que é a impedância total longitudinal da linha (GRAINGER, 1994). Este parâmetro concentrado, é o resultado da multiplicação dos parâmetros por unidade de comprimento e pela extensão da linha (LEMO, 2008).

$$Z = (R + j\omega L)l, \quad (2)$$

onde: $r=R/l$ e $x=j\omega L$, logo,

$$Z = r + jx, \quad (3)$$

onde: R é a resistência por unidade de comprimento (Ω/km), L é a indutância por unidade de comprimento (H/km), ω é a frequência de ressonância (rad/s), l é o comprimento da linha (km) e Z é a impedância em série (Ω).

Desta forma, as equações que descrevem o circuito equivalente ao modelo PI, representado pela Figura 4, são descritas por (4) e (5):

$$V_S = V_R + ZI_R, \quad (4)$$

$$I_S = I_R, \quad (5)$$

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

as quais também podem ser expressas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}, \quad (6)$$

onde: VS e IS são a tensão e a corrente de entrada e VR e IR são a tensão e a corrente de saída, respectivamente.

3. Resultados e Discussões

A implementação do modelo PI, considerando o segmento AB da rede do DEMEI, referente ao alimentador ALIJUÍ17 já apresentado na Figura 1, permitiu a elaboração da Tabela 1 e da Tabela 2, onde são apresentados os dados de entrada e saída do sistema (tensão de entrada (VS), tensão de saída (VR), corrente (I) e percentual de perda de energia ao final do trecho considerado). Os dados da Tabela 1, foram obtidos a partir dos medidores instalados na rede, ou seja, representam parte do conjunto de dados do sistema, uma vez que, neste momento, considerou-se somente sete intervalos de tempos, para a validação do modelo. Já na Tabela 2, apresenta-se o resultado da simulação (i.e., VR), utilizando o modelo PI, o qual apresentou uma diferença média de apenas 0,97% entre a perda de energia simulada (modelo PI) e a perda de energia da rede real (medidores). No entanto, é importante salientar que este pequeno erro, também se dá, em virtude da LD considerada, na modelagem, possuir uma pequena extensão (apenas 476,31 metros), pois sabe-se que a perda de energia é diretamente proporcional ao comprimento da mesma.

Tabela 1: Dados retirados a partir dos medidores instalados na rede.

Tempos								
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	Média
VS	13185	13163	13093	13052	13041	13081	12970	13084
VR	13035	13012	12895	12918	12912	12947	12842	12937
I	68,98	67,01	62,57	58,17	56,15	53,42	51,24	59,65
% Perda	1,1	1,1	1,1	1,0	0,99	1,0	0,99	1,12

Fonte: Elaborada pelos autores.

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

Tabela 2: Dados simulados a partir do modelo PI.

Tempos								
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	Média
VS	13185	13163	13093	13052	13041	13081	12970	13084
VR	13173	13151	13028	13042	13031	13072	12961	13065
I	68,98	67,01	62,57	58,17	56,15	53,42	51,24	59,65
% Perda	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,09	0,09	0,15

Fonte: Elaborada pelos autores.

Ainda justificando a diferença entre os valores medidos e simulados, deve-se levar em consideração o equipamento de medição utilizado nos experimentos. Neste caso, os medidores eletrônicos de energia possuem um limite de erro percentual admissível, que de acordo com a ABNT NBR 14520 (MARCONDES, RIBEIRO, 2011), para o modelo usado neste experimento, é de +0,2% ou -0,2%.

4. Conclusão

A partir da análise dos dados adquiridos com a medição da rede e comparação com o resultado da simulação computacional, foi possível verificar que o modelo PI representa satisfatoriamente o segmento simulado da rede primária da concessionária (DEMEI). Uma vez que, com o modelo implementado no software Matlab, e em posse dos dados coletados através dos medidores instalados na rede, foi possível realizar a validação do mesmo através da comparação entre o resultado simulado e os dados experimentais, sendo que o modelo apresentou erro médio inferior a 1% o que é considerado aceitável pela literatura técnica.

Desta forma, entende-se que devido a variação da carga proporcionada pelo consumo de energia e visando aumentar a precisão dos dados, medidores serão novamente instalados, permanecendo na rede durante o período de no mínimo sete dias e desta vez, serão utilizados medidores de maior precisão e instalados em um trecho maior que o anterior, pois em um trecho maior o erro relacionado ao medidor é minimizado, sendo que este divide-se por toda a extensão da linha. Ressalta-se, portanto, que o próximo passo da pesquisa é estender o modelo PI para os demais segmentos da rede e ainda identificar o comportamento da carga, bem como o perfil dos consumidores daquele segmento, estendendo este comportamento para o restante da rede.

5. Palavras-chave

Modelagem Matemática; Rede Primária de Energia Elétrica; Linhas de Transmissão; Linhas de Distribuição; Modelo PI.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, à UNIJUÍ pela estrutura física oferecida e ao DMEI pelo aporte financeiro à pesquisa, a partir do Projeto de P&D (ANEEL).

7. Referências Bibliográficas

GRAINGER, J. J. STEVENSON, W. D. Power System Analysis. Mc Graw-Hill Ed., 1994.

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico

Evento: XXI Jornada de Pesquisa

JUNIOR, C. A. P. Análise do transitório eletromagnético em linhas de transmissão. 2013. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Goiás, Jataí, 2013.

LEMOS, J. R. F. Modelagem de linhas de transmissão para estudos de transitórios eletromecânicos. 2008. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MARCONDES, J. RIBEIRO, M. A. Normas abnt aplicáveis aos medidores eletrônicos de energia elétrica discutidas em consulta nacional. In: Revista Lumière Electric ed. 159. Instalações e materiais elétricos, Editora Lumière, Eletron - PR, 2011.

MONTEIRO, L. H. A. Sistemas dinâmicos. 2ª ed - São Paulo, SP: Editora Livraria da Física, 2006.

MONTICELLI, A. GARCIA, A. Introdução a sistemas de energia elétrica. 2ª ed. - Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001.

SCHREIBER, J. F. Modelagem de um sistema de distribuição de energia considerando a aplicação em redes inteligentes (Smart Grids). 2013. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.