

# LINHAS DE TRANSMISSÃO: CÁLCULO, PROJETO E ANÁLISE SEM COMPLICAÇÕES

**Aline Aguiar da Franca<sup>1</sup> ; Francisco José Gomes<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia

Programa de Educação Tutorial da Engenharia Elétrica

Galpão 3 - 2º piso - Campus UFJF – Bairro Martelos

CEP 36036330 – Juiz de Fora – Minas Gerais

<sup>1</sup>aline.aguiar@engenharia.ufjf.br

<sup>2</sup>chicogomes@terra.com.br

**Resumo:** *O trabalho apresenta um ambiente didático baseado na ferramenta computacional LabVIEW™ que permite ao aluno efetuar análises qualitativas e quantitativas das Linhas de Transmissão de Energia Elétrica, operando em 60Hz. O ambiente foi desenvolvido com o propósito de permitir aos estudantes de Engenharia Elétrica melhor compreensão e desenvolvimento de cálculos e projetos envolvendo as linhas de transmissão. A complexidade das linhas de transmissão decorre do fato de constituírem circuitos elétricos possuindo impedâncias complexas, funções do comprimento da linha e de sua frequência. O ambiente permite analisar as propriedades dos diferentes tipos de linhas, entender e avaliar o que precisa ser feito para compensar o excesso de reatância indutiva, ou o excesso de reatância capacitiva, ou mesmo ambos ao longo da mesma.*

**Palavras-chave:** *Linhas de transmissão, Educação em Sistemas de Potência, Compensação de linhas de transmissão, LabVIEW™, Ferramentas didáticas*

## 1. INTRODUÇÃO

As ligações físicas de Linhas de Transmissão clássicas ocorrem entre uma fonte de energia e um elemento consumidor e envolvem, basicamente, uma modelagem de complexidade relativa para os estudantes, pois envolvem conhecimentos de eletromagnetismo e circuito, resultando em equações diferenciais, conteúdos estes fundamentais para a Engenharia Elétrica. Uma forte compreensão dos conteúdos abordados no projeto e análise de linhas de transmissão é uma condição basilar para que o aluno possa se desenvolver nos conteúdos subseqüentes do curso, que envolvem tópicos como fluxos de carga, estudos de curto-circuitos, estabilidade e otimização de sistemas elétricos (Rau, 2003). Exatamente por sua importância, e pelos conteúdos com os quais trabalha, esta disciplina, ou partes dela, dependendo das decisões curriculares de cada curso, constitui sempre um obstáculo para os alunos sendo considerada, em muitas situações, como uma das disciplinas nomeadas de “bicho-papão”. Esta necessidade de forte conteúdo teórico, associado às mudanças abruptas pelas quais vem passando o setor de energia elétrica tem incentivado e motivado as discussões e fórum sobre reformas e conteúdos curriculares, bem como ferramentas e procedimentos pedagógicos adequados à educação em engenharia nesta área ([www.ece.mtu.edu](http://www.ece.mtu.edu)).

Ciente desta necessidade buscou-se desenvolver um ambiente didático que possa auxiliar o aluno nos estudos e análises envolvidas com as linhas de transmissão permitindo que diversas situações, condições e conclusões possam ser mais facilmente executadas propiciando melhoria do aprendizado. Ao lidar com situações diferenciadas, utilizar um suporte computacional de forma didática, analisar diversas possibilidades de cálculos e

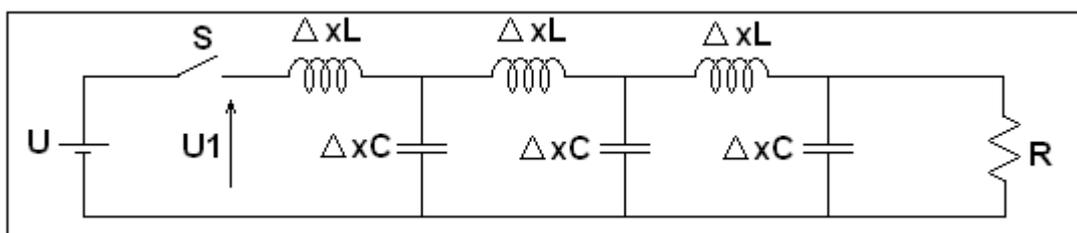
observar os resultados, os alunos conseguem aprimorar o conhecimento, fortalecer o aprendizado da disciplina e ganhar confiança para lidar com as diversas situações e desdobramentos das disciplinas subseqüentes, para as quais o conhecimento dos conteúdos associados aos cálculos e análises de linhas de transmissão constituem pré-requisitos. A necessidade de se integrar, de forma crescente, as ferramentas computacionais, e inclusive de comunicação, nos modernos cursos de engenharia de potência é hoje uma realidade que se consolida de forma crescente (Nwankpa, 2006).

O ambiente desenvolvido apresenta características didáticas, na forma de situações diferenciadas que podem ser utilizadas pelos alunos, bem como uma interface amigável e de fácil utilização, sendo baseado na ferramenta LabVIEW™, que se revela particularmente adequada para aplicações deste tipo. O enfoque de desenvolvimento, em conformidade com ferramentas didáticas de custo elevado ([www.amanogawa.com/transmission](http://www.amanogawa.com/transmission)) adotado permite uma diversidade de entrada de parâmetros, de resultados exibidos e de situações diversas que possibilitam, ao aluno, uma visão e apreensão dos conteúdos trabalhados.

O artigo está estruturado como segue: o capítulo 2 efetua uma análise qualitativa do problema, o capítulo 3 uma análise quantitativa e o capítulo 4 aborda a questão das linhas de transmissão como quadripolos. A questão da compensação, bem como as conclusões, são abordadas nos capítulos 5 e 6, respectivamente.

## 2. ANÁLISE QUALITATIVA

Supor, inicialmente, uma Linha de Transmissão ideal com dois condutores metálicos, ou seja, uma linha cuja resistência dos condutores elétricos é considerada nula e o dielétrico entre os mesmos é considerado perfeito. Considerando-se que estes condutores não sofrem influência do solo, de estruturas e de outras linhas, pode-se desprezar as perdas de energia e, para esta linha, de comprimento qualquer, será definida uma capacitância  $C$  [F/km] e uma indutância  $L$  [H/km], conforme figura (1):



**Figura 1 – Circuito equivalente aproximado de uma linha bifilar ideal.**

Ao se energizar uma linha de transmissão, aparecem, na mesma, campos elétricos e campos magnéticos, que se propagam do transmissor ao receptor. A carga elétrica acumulada ( $q$ ) e a corrente de uma seção do condutor ( $I_o$ ), em um trecho unitário desta linha, serão expressas, respectivamente, pelas relações:

$$q = UC[\text{coulomb}] \quad (1)$$

$$I_o = qv = UCv[A] \quad (2)$$

A intensidade desta corrente independe do comprimento da linha e não sofrerá alteração enquanto a tensão na fonte mantiver-se constante. A partir desta relação, pode-se definir a impedância de entrada da linha, como:

$$Z_o = \frac{U}{I_o} = \frac{1}{Cv} \quad (3)$$

Sabe-se também que a tensão induzida neste mesmo trecho da linha vale:

$$FEM = -\Delta x L \frac{dI_o}{dt} = -\frac{I_o}{\Delta t} \Delta x L = -I_o L v \quad (4)$$

Substituindo-se a equação (2) na equação (4):

$$Z_o = \frac{U}{I_o} = Lv[\Omega] \quad (5)$$

Igualando-se as equações (3) e (5), é possível obter-se a equação da velocidade de propagação dos campos elétricos e magnéticos ao longo da linha de transmissão:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} [km / s] \quad (6)$$

## 2.1 Relações de energia

Em cada trecho  $\Delta x$  da linha é armazenada na Linha de Transmissão uma quantidade de energia igual à  $UI_o\Delta t$ , energia esta que não é dissipada e pode ser armazenada nos campos magnético e elétrico, cujos valores são, respectivamente:

$$\Delta E_m = \frac{I_o^2 L \Delta x}{2} [Ws] \quad (7)$$

$$\Delta E_e = \frac{U^2 C \Delta x}{2} [Ws] \quad (8)$$

As relações acima permitem obter a energia fornecida pela fonte:

$$UI_o\Delta t = \frac{I_o^2 L \Delta x}{2} + \frac{U^2 C \Delta x}{2} [Ws] \quad (9)$$

Mas, levando-se em conta a relação:

$$U = I_o \cdot Z_o = I_o \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} [V] \quad (10)$$

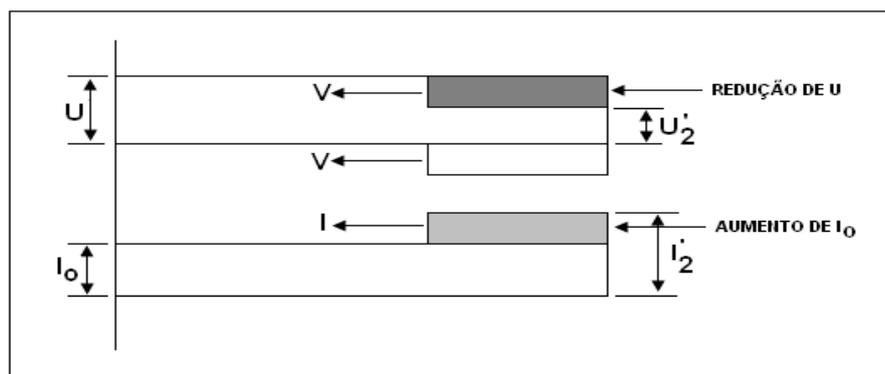
pode-se obter, a partir de sua substituição na equação (8):

$$\Delta E_e = \frac{I_o^2 \cdot L \cdot \Delta x}{2} [Ws] \quad (11)$$

Pode-se verificar, pela expressão (11), que a energia armazenada nos campos elétrico e magnético são iguais, distribuindo-se igualmente entre eles. A operação das Linhas de Transmissão, contudo, depende das condições de sua extremidade receptora: quando a carga ( $R_2$ ) é igual à impedância natural da linha tem-se um equilíbrio entre a energia necessária aos seus campos elétricos e magnéticos e toda energia fornecida pela fonte é dissipada por esta carga; caso contrário este equilíbrio é alterado. Duas situações clássicas são possíveis e serão analisadas na seqüência.

**(a) Linha com carga ( $R_2$ ) menor que  $Z_o$**

Nesta situação, a corrente através da carga é superior à corrente da linha e, conseqüentemente, a potência nela dissipada será também superior, o que resultará em déficit energético no terminal da linha, o qual será então suprido por ela, ou seja, a energia necessária virá do campo elétrico armazenado na linha. O aumento da corrente da linha ( $I_o$ ) ocasiona um aumento do campo magnético, que cede e armazena a energia oriunda do campo elétrico. Este fenômeno – a cessão de energia pelo campo elétrico – ocasionará uma redução da tensão  $U_2$  junto ao receptor, que se reduzirá de forma progressiva até igualar-se à tensão da fonte.



**Figura 2 – Variação da tensão e corrente em linha ideal com  $R_2 < Z_o$ .**

O caso extremo ocorre quando a linha de transmissão opera em curto circuito ( $R_2=0$ ), pois neste caso a tensão no receptor é nula, crescendo em direção ao transmissor. Como resultado, toda a energia do campo elétrico – e, conseqüentemente, da linha – estará então armazenada no campo magnético.

**(b) Linha com carga ( $R_2$ ) maior que  $Z_o$**

Tem-se, neste caso, que a corrente através da carga será menor que a corrente da linha e, conseqüentemente, a potência por ela dissipada será também inferior, o que resultará na existência de um excesso de energia no terminal da linha. A redução da corrente da linha ( $I_o$ ) ocasionará uma redução do campo magnético que, adicionalmente ao fato de não ter capacidade para armazenar o excesso de energia do terminal, deve ainda ceder parte de sua energia. Todo este excesso energético será, portanto, armazenado no campo elétrico resultando em elevação da tensão  $U_2$ , que se propaga do transmissor ao receptor.

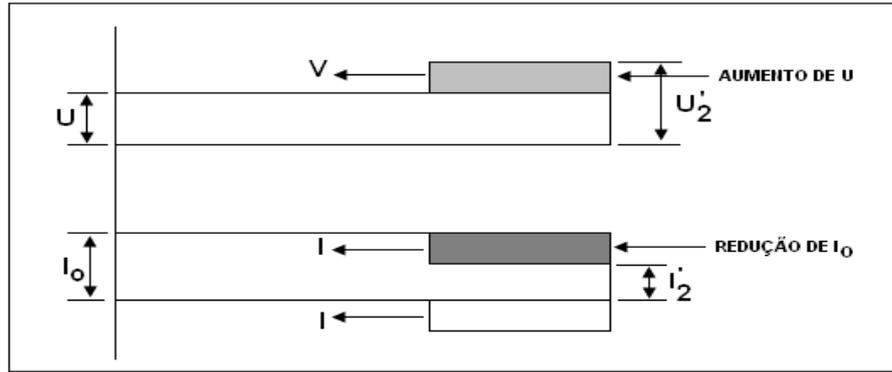


Figura 3 – Variação da tensão e corrente em linha ideal com  $R_2 > Z_0$ .

Um caso extremo ocorre quando a Linha de Transmissão opera a vazio ( $R_2 \gg Z_0$ ), pois agora a corrente reduz-se progressivamente a zero - partindo do receptor em direção ao transmissor - e toda energia do campo magnético e da linha estarão armazenadas em seu campo elétrico.

### 3. ANÁLISE QUANTITATIVA

Será efetuada agora uma análise quantitativa das Linhas de Transmissão considerando-se as tensões e as correntes como funções genéricas do tempo. Esta análise possibilitará a introdução e explanação das funcionalidades do ambiente desenvolvido, que terá continuidade nas seções 4 e 5 posteriores.

#### 3.1 Equações diferenciais das linhas de transmissão

A análise a seguir utilizará um modelo de um circuito real onde serão consideradas as perdas nos condutores  $r[\Omega/\text{km}]$  e nos dielétricos  $g[\text{siemens}/\text{km}]$ , conforme representado na figura 4.

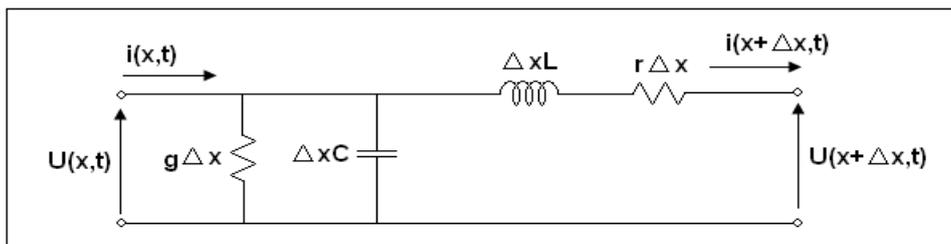


Figura 4 – Circuito equivalente de um elemento  $\Delta x$  de uma linha bifilar real.

Do circuito da figura 4 podem ser extraídas as seguintes equações diferenciais:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial^2 x} = rgu + (rC + Lg) \frac{\partial u}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial^2 x} = rgi + (rC + Lg) \frac{\partial i}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (13)$$

Se a linha for excitada por uma corrente alternada de frequência constante, a tensão ( $u$ ) e a corrente ( $i$ ) podem ser definidas como funções senoidais do tempo:

$$u = U_x \text{sen} \omega t \quad (14)$$

$$i = I_x \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (15)$$

Substituindo-se as equações 14 e 15 nas equações 12 e 13, respectivamente, chega-se à solução geral das equações das linhas de transmissão, expressa nas equações 16 e 17:

$$\dot{U}_x = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \dot{Z}_c}{2} e^{x\dot{\gamma}} + \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \dot{Z}_c}{2} e^{-x\dot{\gamma}} [V] \quad (16)$$

$$\dot{I}_x = \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \dot{Z}_c}{2 \dot{Z}_c} e^{x\dot{\gamma}} - \frac{\dot{U}_2 - \dot{I}_2 \dot{Z}_c}{2 \dot{Z}_c} e^{-x\dot{\gamma}} [A] \quad (17)$$

onde podem ser definidas a função de propagação ( $\gamma$ ) e a impedância característica da linha ( $Z_c$ ) por meio das relações:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{z} \dot{y}} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} = \alpha + j\beta [km^{-1}] \quad (18)$$

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\dot{z} / \dot{y}} = \sqrt{(r + j\omega L) / (g + j\omega C)} [\Omega] \quad (19)$$

A função de propagação possibilita a determinação da forma como a onda se desloca através da Linha de Transmissão, ou seja, como variam seu ângulo e seu módulo.

#### a) *Análise do fator $e^{\pm \alpha x}$*

Este fator altera o módulo da onda senoidal; dependendo do sinal do expoente, positivo ou negativo, ocorrerá a diminuição ou o aumento da amplitude das ondas senoidais. Esta alteração ocorre segundo uma função exponencial, dependente da distância  $x$  da onda à fonte, sendo o fenômeno denominado atenuação.

$$\alpha = \text{Re}\{\dot{\gamma}\} [neper / km] \quad (20)$$

#### b) *Análise do fator $e^{\pm \beta x}$*

Este fator altera o valor da fase da onda e recebe o nome de função de fase.

$$\beta = \text{Im}\{\dot{\gamma}\} [rd / km] \quad (21)$$

Uma análise da expressão da impedância característica mostra que ela independe do comprimento da linha ( $Z_c$ ), o que permite então supor  $r = g = 0$  e chegar-se à equação da impedância de entrada da linha ( $Z_o$ ). Como  $r$  e  $g$  são, em geral, relativamente reduzidos quando comparados à  $L$  e  $C$ , respectivamente, resulta que o valor numérico entre estas impedâncias não difere significativamente. A partir das expressões analisadas até este ponto, pode-se então definir a potência característica da linha ( $P_c$ ) e sua potência natural ( $P_o$ ), também conhecida como SIL (“*Surge Impedance Load*”):

$$P_c = \frac{U_2^2}{Z_c} \cos \delta [W] \quad (22)$$

$$P_o = \frac{U_2^2}{Z_o} [W] \quad (23)$$

onde  $\delta$  é o ângulo de potência do sistema.

### 3.2 Análise das linhas de transmissão em regime permanente

Na análise qualitativa da LT, considerou-se a linha excitada por uma fonte de tensão constante. Para análise quantitativa foi considerada uma excitação senoidal, o que permite concluir que, neste caso, o comprimento físico da linha, tomado em relação ao seu comprimento de onda ( $\lambda$ ), será extremamente importante para seu desempenho, como verificado na seção 2, onde o comportamento das LTs para situações de cargas iguais e diferentes da impedância de entrada da linha foi analisado:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v}{f} = \frac{1}{f\sqrt{LC}} [km] \quad (24)$$

As análises efetuadas até este ponto permitem que o ambiente desenvolvido, e suas funcionalidades, possam então ser apresentados. A figura (5), ao apresentar a tela principal do ambiente didático de simulação proposto, exemplifica sua aplicabilidade para se efetuar estas análises qualitativas e quantitativas. Os “Parâmetros de Entrada”, apresentados à esquerda, no alto da figura 5, possibilitam que o usuário selecione todos os valores desejados para o projeto, dentre os quais o “Comprimento da linha”, em km, as características físicas R, L, C e G e os dados relativos à potência transmitida. O ambiente disponibiliza também o modelo do circuito elétrico equivalente para o sistema, conforme mostrado no centro, ao alto.

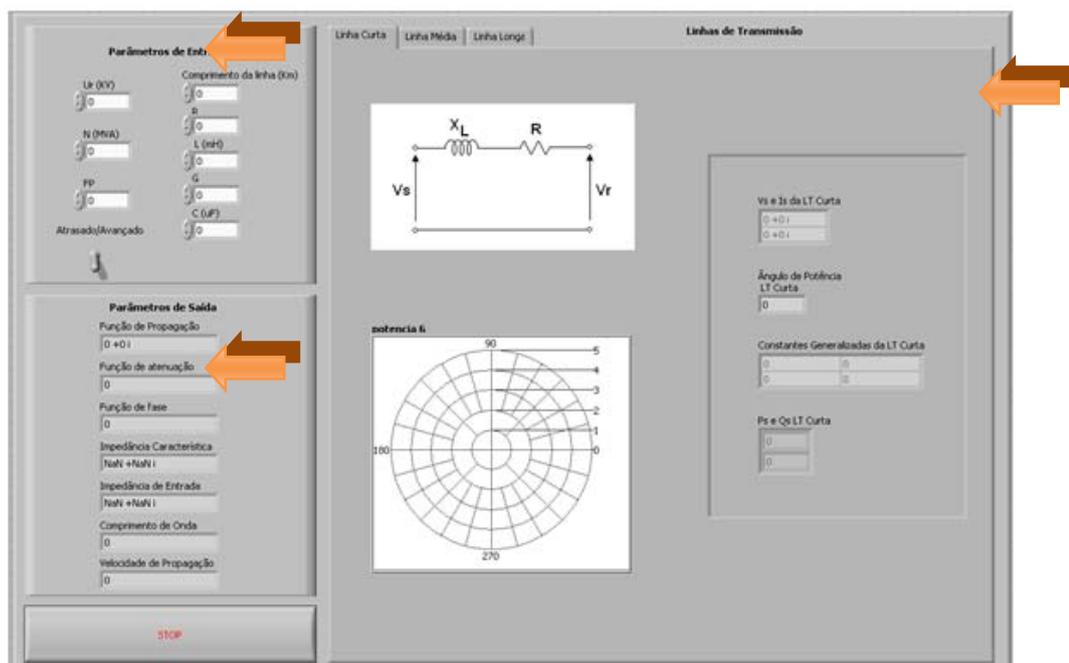


Figura 5: Ambiente de Simulação (LT Curta).

Uma vez selecionados os parâmetros de entrada, o sistema apresenta os valores resultantes para o projeto, tais como a “Função de Propagação”, “Função de Atenuação”, “Função de Fase”, “Impedância Característica” e outros mais, como mostrado na figura 5, à esquerda, na parte inferior. O ambiente, adicionalmente, disponibiliza a “Potência S” transmitida, bem como os parâmetros como “Ângulo de Potência”, “Constantes Generalizadas da LT Curta”, “Ps e Qs da LT”, entre outros. Estas informações permitem ao aluno efetuar uma conferência dos resultados com os que obteve e verificar o comportamento destes parâmetros.

#### 4. LINHAS DE TRANSMISSÃO COMO QUADRIPOLOS

Outra opção disponibilizada pelo ambiente desenvolvido é a modelagem das linhas de transmissão como quadripolos simétricos, haja vista que ela pode ser representada por dois terminais de entrada (transmissor) e dois terminais de saída (receptor), conforme indicado na figura (6).

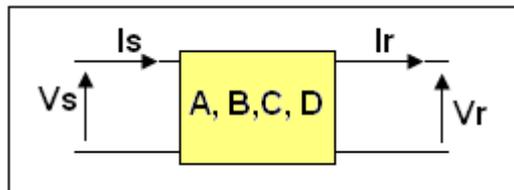


Figura 6 – Linhas de Transmissão como Quadripolos.

Para esta concepção foram definidas como variáveis dependentes a tensão da fonte ( $V_S$ ) e a corrente da fonte ( $I_S$ ) e como variáveis independentes a tensão da carga ( $V_R$ ) e a corrente da carga ( $I_R$ ); as características das linhas podem ser definidas pelas constantes A, B, C e D, conhecidas como “Constantes Generalizadas das Linhas de Transmissão”:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Comparando-se as equações das linhas de transmissão com as do quadripolos tem-se as seguintes situações:

**a) Linha Curta ( $l < 80 \text{ km}$ )**

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

**b) Linha Média ( $80 \text{ km} \leq l \leq 240 \text{ km}$ )**

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \dot{Z}\dot{Y}/2) & \dot{Z} \\ (\dot{Y} + \dot{Z}\dot{Y}^2/4)(1 + \dot{Z}\dot{Y}/2) & \end{bmatrix} \quad (27)$$

**c) Linha Longa ( $l > 240 \text{ km}$ )**

$$\begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \dot{Z}'\dot{Y}'/2) & \dot{Z}' \\ (\dot{Y}' + \dot{Z}'\dot{Y}'^2/4)(1 + \dot{Z}'\dot{Y}'/2) \end{bmatrix} \quad (28)$$

A figura 5, que mostra a tela interativa do ambiente de entrada disponibiliza como parâmetros de entrada para simulação a tensão e a potência aparente no receptor, o fator de potência, a resistência, a indutância, a susceptância, a capacitância e o comprimento da linha. Este último parâmetro, vale observar, possibilita a intercambialidade entre os diversos tipos de linha e que fornecerão soluções distintas para o usuário. A figura 5, que mostrou uma primeira situação, foi baseada na opção “Linha Curta”, para a qual foram calculadas as potências (ativa e reativa) de entrada, tensão de entrada, corrente de entrada, as constantes generalizadas e o fator de potência para esse tipo de linha. Caso a opção adotada pelo usuário for a de uma Linha de Transmissão com comprimento definido entre 80 e 240 km, ou seja, uma Linha de Transmissão considerada de comprimento médio, os resultados obtidos serão aqueles disponibilizados pela figura 7.

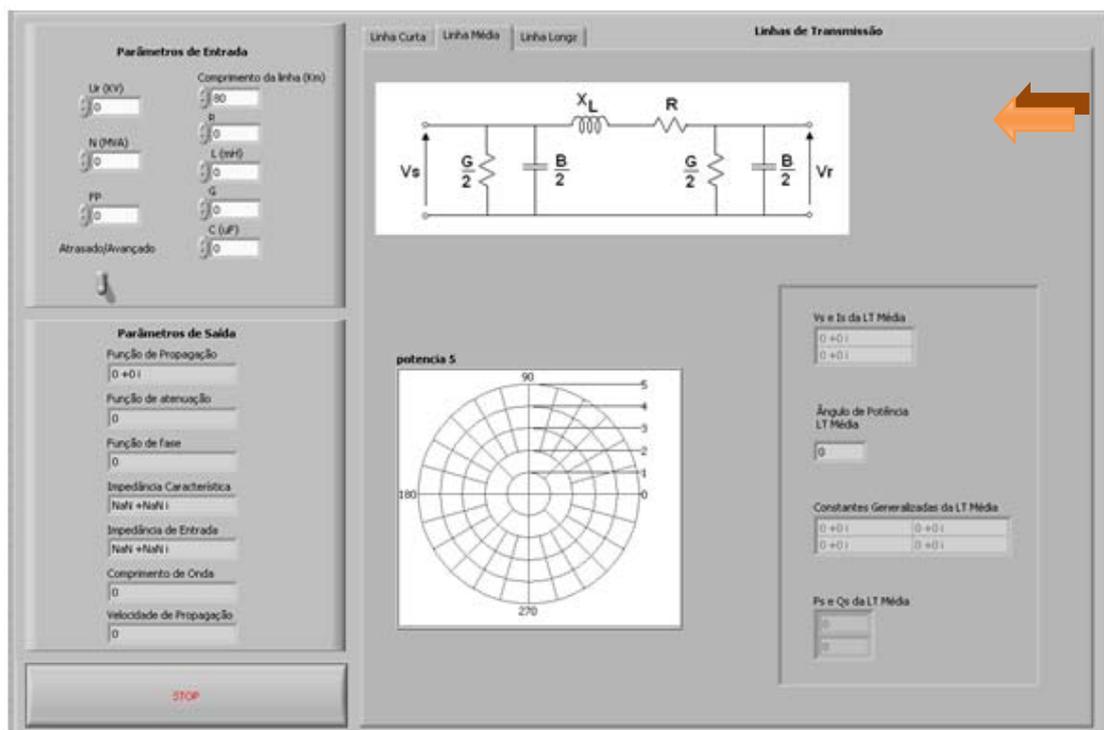


Figura 7: Ambiente de Simulação (LT Média).

## 5. COMPENSAÇÃO

As Linhas de Transmissão consideradas de longa distância permitem que o projetista adote opções distintas de projeto para alterar suas características de transmissão sem alterar suas características físicas. Esta opção possibilita neutralizar o “Efeito Ferranti”, que explica as excessivas quedas de tensão em regime de cargas elevadas, conforme representado na figura 8. Neste caso, além do ambiente educacional didático fornecer os valores das potências (ativa e reativa) de entrada, da tensão de entrada, da corrente de entrada, das constantes generalizadas e do fator de potência, fornece também o efeito Ferranti e a tensão de circuito

aberto ( $V_R^{OC}$ ), como pode ser visualizado na figura 8, ao centro. Estes parâmetros estão relacionados pelas equações (29) e (30), mostradas a seguir:

$$|\dot{V}_R^{OC}| = \frac{\dot{V}_S}{A} [V] \quad (29)$$

$$efeito\_Ferranti = |\dot{V}_R^{OC}| - |\dot{V}_S| [V] \quad (30)$$

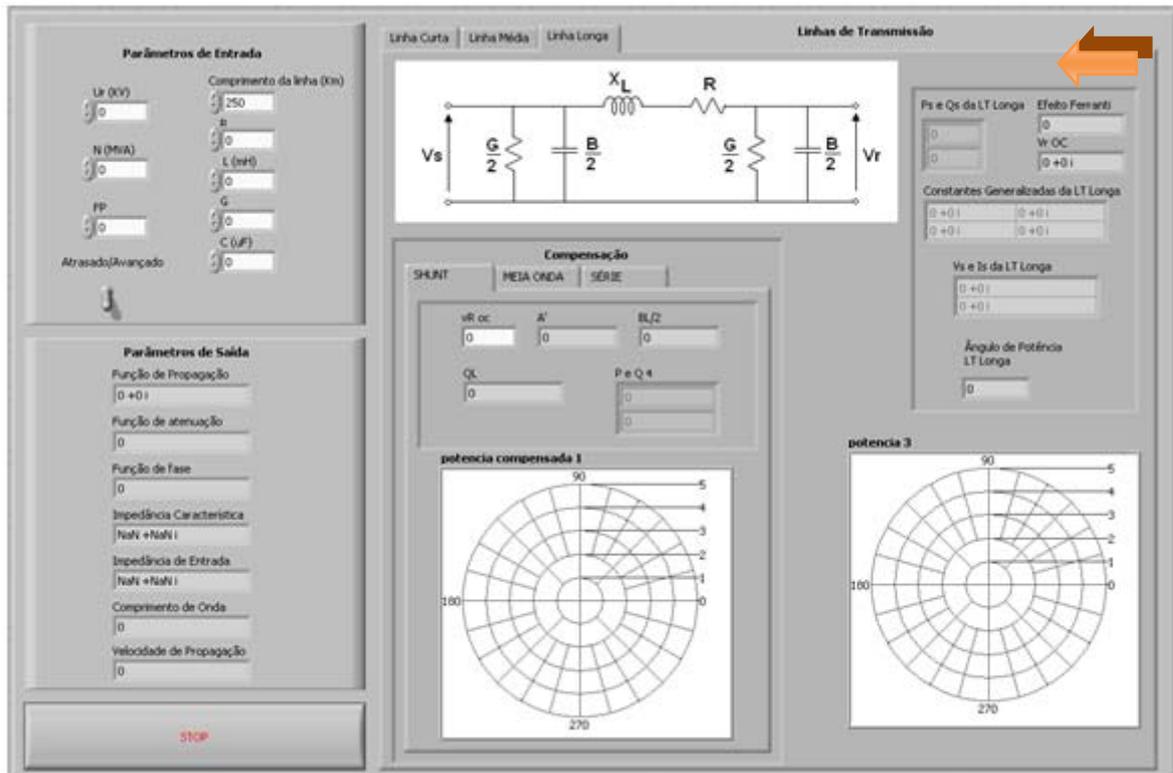


Figura 8: Ambiente de Simulação (LT Longa).

As diferentes compensações utilizadas para esta situação são:

#### a) Compensação em derivação

Empregam-se, neste caso, reatores indutivos ( $B_L/2$ ) para compensar o efeito da admitância “shunt” da linha. As tensões nos extremos das linhas são mantidas no valor desejado, pois em ambas colocam-se reatores indutivos de indutância variável que, entretanto, só atuarão nas extremidades, não eliminando a elevação das tensões no meio da linha. As relações utilizadas foram:

$$|\dot{A}'| = \frac{|\dot{V}_S|}{|\dot{V}_R^{OC}|} [V] \quad (31)$$

$$\frac{Y_L'}{2} = \frac{A' - A}{Z} = -j \frac{B_L}{2} [V] \quad (32)$$

$$Q_L^{3\phi} = V_{FF}^2 \frac{B_L}{2} [VAr] \quad (33)$$

onde  $Q_L^{3\phi}$  é a potência instalada nos extremos. Esta compensação, definida como “*shunt*” no ambiente desenvolvido, pode ser visualizada na figura 9, mostrada na seqüência.

### **b) Compensação série**

Este efeito pode ser conseguido por meio do emprego de capacitores em série, que compensam o efeito da indutância da linha. Trata-se de procedimento altamente interessante, pois esta compensação aumenta a capacidade de transporte das linhas frente a questão de sua estabilidade. A utilização dos capacitores pode ocorrer nas seguintes opções:

- **Banco de capacitores situado no meio da linha**

$$\begin{cases} A' = A_1^2 + C_1 B_1 + C_1 A_1 X_C \angle -90^\circ \\ B' = B + [(A+1)X_C \angle -90^\circ] / 2 \end{cases} \quad (34)$$

onde:

$$A_1 = \sqrt{\frac{A+1}{2}} \quad (35)$$

$$B_1 = \frac{B}{2A_1} \quad (36)$$

$$C_1 = \frac{A_1^2 - 1}{B_1} \quad (37)$$

- **Banco de capacitores situado no extremo da linha**

$$\begin{cases} A' = A + CX_C \angle -90^\circ \\ B' = B + 2AX_C \angle -90^\circ + CX_C^2 \angle -180^\circ \end{cases} \quad (38)$$

A potência compensada, nesta situação, será:

$$Q_C = X_C I_L^2 \quad (39)$$

Esta possibilidade de compensação é também disponibilizada pelo ambiente desenvolvido, sendo definida como “*Série*”, conforme indicado na figura 9.

### **C) Compensação para Transmissão em Meia Onda**

Pode-se demonstrar, através de relações quantitativas, que, em linhas de comprimento de meia onda, o efeito Ferranti no receptor é nulo e a corrente de carga da linha é pequena, desaparecendo também o problema de auto-excitação dos geradores bastando, para isto, colocar-se bancos de capacitores em derivação no sistema. Esse tipo de compensação, além de aumentar o comprimento da onda, aumenta também a potência natural da linha. O ambiente

desenvolvido possibilita que o usuário verifique também esta opção, definida como “Meia Onda”, conforme indicado na figura 9 mostrada a seguir:



Figura 9: Compensação (LT Longa).

## 6. CONCLUSÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um ambiente computacional didático que pode ser utilizado como uma ferramenta didática nos estudos de engenharia de sistemas elétricos de potência, mais especificamente nas questões relacionadas às linhas de transmissão, que constitui uma matéria cujo conteúdo possui alta exigência de conhecimentos matemáticos, de circuitos elétricos e eletromagnetismo. Devido a estas características, o conteúdo da disciplina apresenta sempre dificuldades relevantes para os alunos, que nem sempre conseguem apreender seus conceitos e conteúdo da forma desejada, ocasionando inclusive reprovações e, por vezes, desistência dos estudantes. A proposta, ao se partir para o desenvolvimento do ambiente didático, foi buscar-se construir uma ferramenta didática de fácil utilização, amigável e interativa, onde o aluno pudesse efetuar uma análise rápida e precisa de linhas de transmissão de energia elétrica utilizando todas as opções possíveis dentre a grande variedade de parâmetros, optar por condições diferenciadas e realizar projetos para situações diversas fortalecendo sua competência no objeto da disciplina.

A proposta é que o ambiente seja utilizado no curso de linhas de transmissão permitindo ao aluno melhorar sua compreensão do tema, que se constitui um tópico básico para uma adequada formação na área de sistemas elétricos de potência. As novas necessidades colocadas pelas mudanças de mercado e pela utilização intensiva das ferramentas computacionais, tanto na operação de sistemas reais como para o próprio aprendizado exigem posturas novas e diferenciadas para o aprendizado. A questão, neste caso, torna-se exacerbada, haja vista a necessidade do conhecimento deste temas para prosseguimento da formação em engenharia de potência, dentro do curso de Engenharia Elétrica. Espera-se, com a utilização do ambientes, maior motivação por parte dos alunos e fortalecimento dos conceitos trabalhados.

O desenvolvimento do ambiente utilizou o ambiente computacional *LabVIEW™*, cuja utilização no meio acadêmico, e inclusive no meio industrial, vem se tornando crescente. Com

sua capacidade de interagir com os sistemas físicos, efetuar cálculos complexos, disponibilizar telas sinópticas e interagir de forma amigável com o usuário, este ambiente computacional, juntamente com o *Matlab*<sup>TM</sup>, vem se tornando, de forma crescente, um padrão para este tipo de aplicação. A opção por este ambiente decorreu de dois fatores: inicialmente, pelo fato de ser um ambiente disponibilizado no curso de Engenharia da Faculdade de Engenharia da UFJF, disponível para utilização pelos alunos; em segundo lugar, por ser um ambiente cuja utilização vem aumentando de forma crescente para aplicações industriais, o que possibilita que os alunos conheçam as ferramentas técnicas com as quais, seguramente, terão contato em sua vida profissional.

O ambiente começou a ser disponibilizado para os alunos do curso a partir deste primeiro semestre de 2008; com isto, espera-se que os resultados de sua utilização, que já podem ser observados sob uma ótica qualitativa, possam ser também quantitativamente avaliados, bem como seu impacto no aprendizado da disciplina.

### ***Agradecimentos***

Ao Programa PET/SeSu/DEPEM /MEC pelo suporte.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

RAU, N. S. **Optimization Principles: Practical Applications to the Operation and Markets of the Electric Power Industry.** John Wiley, New York, 2003.

Nwankpa, C. **A Modern Power Engineering Curriculum that Exhibits the Effects of Information Technology,** Center for Electric Power Engineering, Drexel University, 2006

. Acessado em 15/06/2008.

<http://www.amanogawa.com/transmission.html>. Acessado em 15/06/2008

FUCHS, R.D. **Transmissão de Energia Elétrica – Linhas Aéreas.** Rio de Janeiro, LTC; Itajubá, Escola Federal de Engenharia, 1977.

LabVIEW Fundamentals – National Instruments

## **TRANSMISSION LINES: CALCULATIONS, DESIGN AND ANALYSIS WITHOUT COMPLEXITIES**

***Abstract:*** *This paper presents a programming interface with LabVIEW<sup>TM</sup> where the student can make a qualitative analysis and quantitative analysis of Transmission Lines Electric Energy of 60Hz. They are intended to make the students of Electrical Engineering can understand and deal with the transmission lines as having elements of circuit impedances that are complex functions of the length and frequency of the line, understand the properties of different types of lines and understand and assess what needs to be done to offset the excess of inductive reactance, or the excess of capacitive reactance, or both along the same.*

***Key-words:*** *Transmission lines, Power Engineering Education, Transmission lines compensation, LabVIEW<sup>TM</sup>, Pedagogical Tools*