

## SIMULAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA VIA PROGRAMAS INTERATIVOS

**Jane Madri de Melo** – jane@eletrica.ufsj.edu.br

**Paulo Eduardo Abreu** – pauloeduardo@eletrica.ufsj.edu.br

**Ricardo Augusto do Nascimento** – ricardoran@eletrica.ufsj.edu.br

**Luiz Antônio da Fonseca Manso** – lmanso@ufsj.edu.br

Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Engenharia Elétrica

Praça Frei Orlando, 170

36307-352 – São João del-Rei - MG

**Resumo:** Este artigo apresenta um conjunto de programas interativos denominado LabSEP, o qual visa contribuir para a elevação da qualidade do ensino de Engenharia Elétrica na área de Sistemas Elétricos de Potência. Os estudos disponíveis, o ambiente de conversação desenvolvido e a filosofia de construção, baseada no conceito de software livre, são apresentados. Na presente versão do LabSEP estão implementados os seguintes estudos: Fluxo de Potência, Curto-Circuito, Estabilidade Transitória e Confiabilidade de Sistemas de Geração. Através da interface amigável construída, o aluno poderá realizar um processo contínuo de experimentação, questionamento e revisão de conceitos, solidificando os conhecimentos teóricos adquiridos nas disciplinas afins. A interface gráfica foi desenvolvida a partir da linguagem Tcl (Tool Command Language), e de sua biblioteca gráfica Tk (Tool Kit). Esta linguagem é interpretada pelo software livre Scilab, que foi utilizado para a execução dos cálculos relativos aos estudos implementados. Cabe destacar que também o Tcl/Tk é de uso livre e que o LabSEP pode ser utilizado nos sistemas Linux e Windows.

**Palavras-chave:** Sistemas de potência, Ensino de engenharia, Programas interativos

### 1. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento das redes de energia elétrica, seja funcionando em regime permanente ou em presença de algum distúrbio, representa o objetivo principal das disciplinas de Engenharia Elétrica na área de sistemas de potência. Um grande problema relacionado a estas disciplinas, corresponde à dificuldade de se realizar experiências práticas. O estudo do comportamento global de um sistema de potência, levando em consideração a interação entre seus diversos componentes, pode não ser comprovado em laboratório de forma satisfatória.

Em geral, a comprovação e sedimentação dos conhecimentos teóricos adquiridos são feitas através da elaboração, por parte do estudante, de programas de computador que deverão executar diversos estudos nesta área. Em virtude do pouco tempo que dispõem, os alunos não podem criar programas mais genéricos e detalhados. Na maioria dos casos, os programas são

elaborados para realizar um determinado estudo em um sistema de potência específico. Trata-se de um procedimento restrito, pois o ideal seria a realização de inúmeras simulações utilizando inclusive sistemas de potência com características diferentes e de maior porte. Só assim, o aluno poderá desenvolver sensibilidade suficiente sobre o comportamento de um sistema de potência.

Para cumprir tal objetivo faz-se necessária a utilização de um conjunto de algoritmos computacionais desenvolvidos para serem operados de forma interativa, ou seja, através da conversação usuário-programa (KEZUNOVIC *et al.*, 2004). Exatamente com este objetivo, em 1989, foi desenvolvido um conjunto de programas denominado ASPIM (MANSO, 1989). Desde então, este conjunto de programas vem sendo utilizado por professores do curso de Engenharia Industrial Elétrica da Universidade Federal de São João del-Rei, em disciplinas específicas da área de sistemas elétricos de potência.

Apesar de apresentar um ambiente amigável, o ASPIM é um *software* ultrapassado, desenvolvido para o sistema operacional DOS. No entanto, o mesmo representou um importante ponto de partida para a confecção de um novo conjunto de programas interativos, denominado LabSEP. Os estudos disponíveis, o ambiente de conversação desenvolvido e a filosofia de construção do LabSEP, baseada no conceito de *software livre*, são apresentados neste artigo.

## 2. ESTUDOS IMPLEMENTADOS

A seguir é realizada uma breve descrição dos estudos implementados, a qual visa apresentar, em linhas gerais, os problemas abordados e os métodos empregados. Para maiores detalhes o leitor deve se reportar às referências citadas em cada seção.

### 1.1 Fluxo de potência

Um estudo de fluxo de potência visa basicamente determinar o estado de operação de um sistema de energia elétrica em regime permanente, e conseqüentemente, a distribuição dos fluxos em sua rede. Para cumprir tal objetivo é necessário o desenvolvimento das Equações de Fluxo de Potência, cuja solução fornece as tensões e as injeções de potência em cada barra do sistema.

Na grande maioria dos casos, estudos de fluxo de potência são realizados sob condições de equilíbrio, razão pela qual se pode restringir o estudo à rede de seqüência positiva. Sua modelagem é estática, ou seja, os fluxos na rede são representados por equações algébricas não-lineares que correspondem às leis de Kirchhoff. Estas equações representam as potências líquidas ativa e reativa injetadas em cada barra (MONTICELLI, 1983) (MELO & MANSO, 2006), e podem ser expressas, respectivamente, pelas Equações (1) e (2):

$$P_i = V_i \sum_{k=1}^n [V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})] \quad (1)$$

$$Q_i = V_i \sum_{k=1}^n [V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})] \quad (2)$$

sendo:

$V_i$  – módulo da tensão na barra  $i$ , em pu;

$\theta_{ik}$  – diferença angular entre as barras  $i$  e  $k$ , em radianos;

$G_{ik}$  e  $B_{ik}$  – respectivamente, condutância e susceptância do elemento  $ik$  da matriz de admitância de barra, em pu.

### ***Solução das equações de fluxo de potência***

Conforme foi dito anteriormente, o problema de fluxo de potência pode ser representado por um sistema de equações algébricas não-lineares que correspondem às leis de Kirchhoff. Lembrando que  $P_i = P_{Gi} - P_{Di}$  e  $Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di}$  e considerando que as cargas ( $P_{Di}$  e  $Q_{Di}$ ) são previamente conhecidas, conclui-se que existem quatro incógnitas ( $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$ ,  $V_i$  e  $\theta_i$ , ou,  $P_i$ ,  $Q_i$ ,  $V_i$  e  $\theta_i$ ), e duas equações para cada barra. Portanto duas destas variáveis devem ter seus valores pré-estabelecidos. Em consequência disto, surgem três tipos de barras: *PQ*, *PV* e *SW*.

As barras dos tipos *PV* e *PQ* são utilizadas para representar, respectivamente, barras de geração e barras de carga. Na barra de geração, os valores de  $P_i$  e  $V_i$  são pré-especificados e mantidos constantes, sendo obrigatória a existência de geração, ou ao menos de compensadores síncronos. Na barra de carga,  $P_i$  e  $Q_i$  são pré-especificados e mantidos constantes.

Para a barra de referência, *SW*, estabelece-se os valores de  $\theta_i$  e  $V_i$ , mantendo-os constantes. Esta barra fornece a referência angular do sistema e fecha o balanço de potência do mesmo, uma vez que as perdas de transmissão não são conhecidas antes de se ter a solução do problema.

Considerando  $n$  o número total de barras do sistema, verifica-se que existem  $n-1$  e  $npq$  barras onde são desconhecidos, respectivamente, os valores de  $\theta$  e de  $V$ . Este problema pode então ser resolvido a partir de dois subsistemas de equações algébricas.

Para o primeiro subsistema são calculados os valores de  $\theta_i$  e  $V_i$  nas barras em que os mesmos não foram especificados. Assim, conclui-se que este subsistema é composto de  $(n-1 + npq)$  equações algébricas não-lineares, com o mesmo número de incógnitas, e que são expressas pelas Equações (3) e (4), respectivamente:

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - P_i = P_i^{esp} - V_i \sum_{k=1}^n [V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})] \quad (3)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - Q_i = Q_i^{esp} - V_i \sum_{k=1}^n [V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})] \quad (4)$$

As incógnitas  $\theta_i$  e  $V_i$  podem ser agrupadas no vetor de variáveis de estados representado pela Equação (5).

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \begin{matrix} \} n-1 \\ \} npq \end{matrix} \quad (5)$$

As funções  $\Delta P_i$  e  $\Delta Q_i$  podem ser colocadas na forma vetorial, dada pela Equação (6).

$$g(x) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \begin{matrix} \} n-1 \\ \} npq \end{matrix} \quad (6)$$

Resolvido o primeiro sistema, segue-se para a solução do segundo, a qual fornece  $P_i$  e  $Q_i$  na barra de referência, e  $Q_i$  nas barras do tipo *PV*. O segundo subsistema é facilmente resolvido, pois, conforme Equações (1) e (2), as incógnitas ( $P_i$  e  $Q_i$ ) aparecem na forma explícita.

### Solução de fluxo de potência via método de Newton

O método de Newton, possui convergência quadrática e, na maioria dos casos, não oferece riscos de divergência. O seu objetivo é determinar as variáveis de estado  $x$ . Para tal, deve-se resolver o primeiro subsistema, o qual tem dimensão  $(n-1+npq)$ . O método de solução consiste em aplicar iterativamente a função vetorial de recorrência dada pela Equação (7).

$$x^{v+1} = x^v - J^{-1}(x^v) g(x^v) \quad (7)$$

Vê-se que para cada iteração ( $v$ ) é calculada a matriz jacobiana, dada pela Equação (8).

$$J(x) = - \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{matrix} \} n-1 \\ \} npq \end{matrix} \quad (8)$$

### 1.2 Curto-circuito trifásico

Os fenômenos de curto-circuito podem ser classificados como transitórios meio-rápidos, e são sempre acompanhados por um colapso instantâneo, total ou parcial, das tensões de barra através do sistema e, conseqüentemente, de uma redução da capacidade de transmissão de energia. Além disso, as correntes de curto-circuito podem atingir valores muito superiores aos nominais dos equipamentos, e se o curto não for removido rapidamente, podem causar danos térmicos aos mesmos. Os estudos de curto-circuito fornecem informações sobre as tensões e correntes num sistema de potência em decorrência de uma falta. Tais informações são indispensáveis ao projeto de sistemas de proteção.

Para o LABSEP foi implementado o curto-circuito trifásico simétrico, que para uma impedância de curto nula é o caso mais severo, principalmente no que diz respeito à estabilidade do sistema. A metodologia empregada (MELO & MANSO, 2005) utiliza os teoremas de Thévenin e da Superposição, sendo ilustrada pelas Figuras 1 e 2. Através da Figura 1-b é obtida a corrente de falta  $I_f$ , a qual deve ser injetada no circuito sem fontes, conforme Figura 2, para a obtenção das modificações nas tensões, em decorrência da aplicação do curto. Tais modificações devem ser adicionadas às tensões pré-falta, presentes na Figura 1-a.

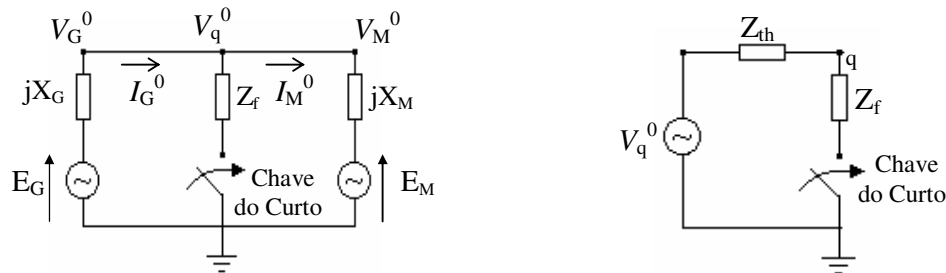


Figura 1 – Representação de um circuito elétrico. (a) Diagrama unifilar. (b) Equivalente de Thévenin no ponto “q”.

Onde:

- $E_G$  e  $E_M$  representam as tensões atrás das reatâncias transitórias (subtransitórias) de um gerador ( $X_G$ ) e de um motor ( $X_M$ ) síncronos, respectivamente;
- $V_G^0$  e  $I_G^0$  representam a tensão terminal e a corrente do gerador, antes da falta;

- $V_M^0$  e  $I_M^0$  representam a tensão terminal e a corrente do motor, antes da falta;
- $V_q^0$  é a tensão no ponto  $q$  antes da falta;
- $Z_f$  é a impedância do Curto (se  $Z_f$  é nulo diz-se que foi aplicado um “curto sólido”);
- $Z_{th}$  é a impedância de Thévenin.

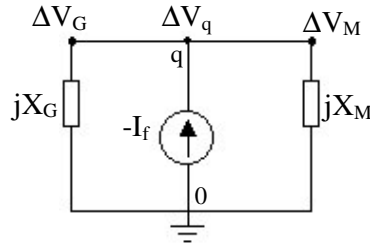


Figura 2 – Obtenção das modificações nas tensões nodais.

Para sistemas reais, compostos de diversas barras, linhas de transmissão e transformadores, a solução do problema de curto-circuito deve ser sistematizada, a fim de viabilizar a sua implementação digital. Então, as tensões nas barras ( $V_{BUS}$ ) são relacionadas com as injeções de corrente ( $I_{BUS}$ ), nestas mesmas barras, pela matriz de impedâncias de barra ( $Z_{BUS}$ ), conforme Equação (9).

$$V_{BUS} = Z_{BUS} I_{BUS} \quad (9)$$

A matriz  $Z_{BUS}$  combina as contribuições das máquinas síncronas, as quais estão representadas por fontes de corrente constante em paralelo com suas reatâncias transitórias ou subtransitórias (MELO & MANSO, 2005).

Com base na Equação (9) a metodologia ilustrada pelas Figuras 1 e 2 pode ser generalizada. Deve-se, então, aplicar a Equação (10).

$$V_{BUS}^F = V_{BUS}^0 + \Delta V_{BUS} \quad (10)$$

$V_{BUS}^0$  é previamente conhecido, ou obtido via estudo de fluxo de potência, e  $\Delta V_{BUS}$  é dado pela Equação (11).

$$\Delta V_{BUS} = Z_{BUS} I_{BUS}^F \quad (11)$$

$I_{BUS}^F$ , presente na Equação (11), é o vetor de injeções de corrente de barra que representa a corrente de curto com as outras fontes (máquinas síncronas) em repouso. Para um curto aplicado na barra  $q$  este vetor é dado pela Equação (12).

$$I_{BUS}^F = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_p^F \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

### 1.3 Estabilidade transitória

Quando um sistema de potência é submetido a um grande distúrbio, as máquinas síncronas a ele conectadas sofrem oscilações mecânicas de seus rotores. Os estudos de estabilidade transitória além de fornecer informações sobre a capacidade de um sistema suportar tais distúrbios sem perda de sincronismo, são ferramentas indispensáveis ao desenvolvimento de estratégias de chaveamento e de cortes programadas de carga, que venham a minimizar os efeitos das faltas.

Os distúrbios implementados englobam curto-circuito trifásico *sólido* e mudanças bruscas na geração, transmissão e carga. As condições da rede antes da ocorrência do distúrbio, ou de um primeiro distúrbio, são obtidas através de um estudo de fluxo de potência.

#### *Equação de oscilação*

Para a determinação do deslocamento angular entre as máquinas de um sistema de potência durante um período transitório, é necessário utilizar a equação diferencial que descreve o movimento dos rotores destas máquinas (STEVENSON, 1985). Em termos elétricos esta equação diferencial é dada pela Equação (13):

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2}{dt^2} \delta = P_a = P_m - P_e \quad (13)$$

sendo:

$H$  - constante de inércia da máquina síncrona, em MW.s;

$\omega_s$  - velocidade síncrona angular, em radianos elétricos por segundo;

$\delta$  - ângulo entre a tensão de excitação e a referência;

$P_a$  - potência de aceleração, em W;

$P_m$  - potência líquida no eixo da máquina síncrona, em W;

$P_e$  - potência elétrica no entreferro, em W.

Esta equação pode ser escrita como um sistema de duas equações diferenciais simultâneas de primeira ordem, dado pelas Equações (14) e (15).

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \quad (14)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = w - 2\pi f \quad (15)$$

sendo  $f$  a frequência síncrona, igual a 60 hertz, e  $w$  a velocidade angular da máquina síncrona, medida em radianos elétricos por segundo.

#### *Solução da equação de oscilação*

A solução das Equações (14) e (15) deve ser combinada à solução das equações algébricas que descrevem o circuito ( $V_{BUS} = Z_{BUS} I_{BUS}$ ). Esta combinação de soluções é necessária para atualização da potência elétrica (ativa)  $P_e$ , realizada através da Equação (16). Salienta-se que foi adotado o modelo clássico da máquina síncrona e que a potência mecânica  $P_m$  é considerada constante. Portanto, não há regulação de velocidade.

$$P_{ei} = R_e \left\{ E_i \left( \frac{E_i' - V_{BUS}(i)}{jX_{di}'} \right)^* \right\} \quad (16)$$

Para a solução das Equações (14) e (15) foi utilizado o método de Euler Modificado. Este método utiliza as derivadas obtidas no início e final de cada intervalo (passo de integração), para a obtenção de um valor médio para a solução das equações. Então, as Equações (17), (18) e (19) fornecem a solução final de cada passo de integração (MELO & MANSO, 2006), apontando, respectivamente, o ângulo da tensão de excitação, a velocidade síncrona e a tensão de excitação de cada máquina síncrona.

$$\delta_i^{(1)}(t + \Delta t) = \delta_i^{(1)}(t) + \left( \frac{\frac{d}{dt} \delta_i^{(0)} + \frac{d}{dt} \delta_i^{(1)}}{2} \right) \Delta t \quad (17)$$

$$w_i^{(1)}(t + \Delta t) = w_i^{(1)}(t) + \left( \frac{\frac{d}{dt} w_i^{(0)} + \frac{d}{dt} w_i^{(1)}}{2} \right) \Delta t \quad (18)$$

$$E_i' = |E_i'| \cos \delta_i^{(1)}(t + \Delta t) + j |E_i'| \sin \delta_i^{(1)}(t + \Delta t) \quad (19)$$

Cabe destacar que, previamente a cada cálculo da potência  $P_{ei}$ , é feita uma atualização das tensões nodais das barras, através da solução das equações da rede ( $V_{BUS} = Z_{BUS} I_{BUS}$ ).

Como se sabe  $I_{BUS}$  é o vetor que contém as injeções de corrente que representam as fontes (máquinas síncronas). Portanto, a injeção de corrente em uma barra  $i$ , caso ela tenha, ou não, uma máquina síncrona, será, respectivamente:

$$I_i = \frac{E_i'}{jx_{di}} \quad \text{ou} \quad I_i = 0 \quad (20)$$

Quando o processo é iniciado ( $t=0$ ) o primeiro valor para a tensão de excitação é obtido a partir do valor da potência  $S_{Gi}$ , o qual é fornecido pelo estudo de fluxo de potência. Então:

$$E_i' = V_{BUS}(i) + jx_{di}' \frac{S_{Gi}'}{V_{BUS}^*(i)} \quad (21)$$

#### 1.4 Confiabilidade de sistemas de geração

Os métodos empregados para a avaliação da confiabilidade em sistemas de geração dividem os estados operativos do sistema em dois grupos: sucesso e falha. Os estados de sucesso são caracterizados pela capacidade do sistema de suprir toda a demanda. Já os estados de falha são encontrados quando há a necessidade de corte de carga. Os índices convencionais de perda de carga de sistemas de geração são geralmente obtidos por meio de algoritmos de confiabilidade, os quais são baseados em duas representações distintas (MANSO *et al.*, 2003) (MELO & MANSO, 2005):

- *Representação por espaço de estados*: compreende as técnicas de Enumeração de Estados e a simulação Monte Carlo não-seqüencial;
- *Representação cronológica*: corresponde à simulação Monte Carlo seqüencial.

### **Representação por espaço de estados**

Geralmente, na avaliação da confiabilidade de sistemas de geração baseada na representação por espaço de estados, os seguintes passos estão presentes:

- a) Selecionar um estado do sistema, definindo suas condições operativas, a disponibilidade de seus equipamentos e os níveis de carga;
- b) Analisar o desempenho do estado selecionado, i.e., verificar se a capacidade da configuração selecionada é capaz de atender à carga definida para este estado sem violar limites operativos. Caso contrário, aplicar o corte de carga necessário;
- c) Estimar índices de confiabilidade, executando o cálculo dos índices baseado na análise do estado selecionado. Se a precisão da estimativa dos índices for aceitável, parar. Caso contrário retornar ao passo *a*.

Cada estado de um sistema de potência de  $m$  componentes pode ser representado por um vetor  $x=(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_m)$  em que  $x_j$  é o estado do componente  $j$ , associado a uma probabilidade de ocorrência  $P(x_j)$ . Cada componente de  $x$  deve corresponder a um elemento do sistema (e.g. gerador) ou ao nível momentâneo da carga. O conjunto de todos os estados possíveis do sistema é o espaço de estados  $X$ . Conhecendo-se o espaço de estados de cada componente do sistema e suas respectivas probabilidades de ocorrência, é possível determinar a probabilidade de ocorrência do vetor  $x$ ,  $P(x)$ , ou seja, a probabilidade de ocorrência de cada estado do sistema. Caso as falhas dos componentes do sistema sejam estatisticamente independentes,  $P(x)$  fica igual ao produto das probabilidades associadas com o estado de cada componente e da carga.

Estabelecidos os conceitos preliminares acima, os índices de confiabilidade são então obtidos a partir do cálculo do *valor esperado* de várias *funções teste*  $F(x)$ :

$$E[F] = \sum_{x \in X} F(x)P(x) \quad (22)$$

O objetivo destas *funções teste* é verificar se uma determinada configuração de geradores é capaz de suprir uma dada carga.

Os métodos baseados na enumeração de estados são adequados somente quando o número de cenários severos/prováveis é relativamente pequeno. Os métodos baseados em simulação Monte Carlo são mais atrativos quando a ocorrência de contingências de maior ordem é mais provável. Isto ocorre em estudos de confiabilidade da geração devido aos *elevados* valores de indisponibilidade dos geradores.

Através da simulação Monte Carlo não-sequencial, a seleção, ou amostragem, dos estados do sistema é baseada na distribuição de probabilidades dos estados de seus componentes. Em seguida, cada índice de confiabilidade é estimado através da média amostral da respectiva *função teste*, conforme mostrado na Equação (23):

$$\tilde{E}[F] = \frac{1}{NS} \sum_{j=1}^{NS} F(x^j) \quad (23)$$

onde  $NS$  é o número de estados amostrados.

O algoritmo de simulação Monte Carlo não-sequencial implementado permite a obtenção dos seguintes índices de confiabilidade: LOLP (*loss of load probability* – probabilidade de perda de carga), EPNS (*expected power not supplied* – potência não suprida esperada), LOLE (*loss of load expectation* – perda de carga esperada), EENS (*expected energy not supplied* – energia não suprida esperada), LOLF (*loss of load frequency* – frequência de perda de carga) e LODD (*loss of load duration* – duração da perda de carga). Para o cálculo da EPNS, por exemplo, a *função teste* deve fornecer o valor de potência (carga) que não foi atendida em cada estado de falha amostrado.



### **Representação cronológica**

Os passos necessários à avaliação de índices de confiabilidade dentro da representação cronológica são, a princípio, os mesmos apontados na representação por espaço de estados. A diferença básica está na forma como são gerados os estados do sistema (passo *a* do algoritmo). No caso cronológico é necessário que os estados sejam gerados seqüencialmente no tempo, o que implica em diferenças conceituais na estimação dos índices (passo *c*).

Devido à análise seqüencial no tempo, a avaliação dos índices de confiabilidade fica equivalente ao cálculo da Equação (24):

$$E[G] = \frac{1}{T} \int_0^T G(t) dt \quad (24)$$

sendo *T* o período da simulação e *G(t)* a função que verifica em qualquer instante *t* se o estado do sistema é, ou não, adequado

Através da simulação Monte Carlo seqüencial é possível estimar o valor de *E[G]* aplicando-se a Equação (25) a uma amostra de *NY* séries sintéticas anuais *y<sub>k</sub>*.

$$\tilde{E}[G] = \frac{1}{NY} \sum_{k=1}^{NY} G(y_k) \quad (25)$$

A aplicação da função teste *G(y<sub>k</sub>)* é mais simples que o uso de *F(x)* para o caso da simulação não-seqüencial. Para avaliar o índice LOLF, por exemplo, basta fazer *G(y<sub>k</sub>)* igual ao número de interrupções do fornecimento de energia no sistema, durante a série sintética anual *y<sub>k</sub>*.

## **3. AMBIENTE DE ESTUDOS**

A estrutura elaborada para o Ambiente de Estudos é baseada em um programa gerenciador, em programas de análise, em um editor de textos e em arquivos acessórios, utilizados para a comunicação entre os programas e para a armazenagem de dados e resultados.

A Interface Gráfica do LabSEP foi desenvolvida a partir da linguagem Tcl (*Tool Command Language*), e sua biblioteca gráfica Tk (*Tool Kit*). Esta linguagem é interpretada pelo software livre Scilab, que foi utilizado para a execução dos cálculos relativos aos estudos implementados. Para auxiliar o processo de exibição e impressão dos resultados é utilizado o editor de textos *EditPad*, que é de uso grátis. Cabe destacar que o Tcl/Tk é de uso livre e que todos os programas podem ser utilizados nos sistemas Linux e Windows.

A comunicação entre o programa gerenciador (escrito em Tcl/Tk) e qualquer um dos programas de análise (escrito em Scilab) é feita através de um arquivo de dados gerado pelo programa gerenciador quando algum dos estudos disponíveis é solicitado. Este arquivo de dados é lido pelo programa de análise, que em seguida realiza os cálculos e cria um arquivo de saída. Os resultados contidos no arquivo de saída podem ser acessados através de telas criadas pelo LabSEP, ou exibidos através do *EditPad*.

### **1.5 Descrição do ambiente**

O programa gerenciador tem seu código fonte escrito em Tcl/Tk, o qual pode ser interpretado pelo Scilab. Assim, o LabSEP pode ser incorporado ao conjunto de programas do Scilab, tornando-se uma de suas *toolboxes*. Então, conforme mostra a Figura 3, na tela principal do Scilab o usuário encontrará um menu de nome LabSEP, a partir do qual poderá

carregar o programa gerenciador. Informa-se neste ponto, que não apenas a Figura 3, mas também todas as subseqüentes, foram obtidas utilizando-se o sistema Windows.

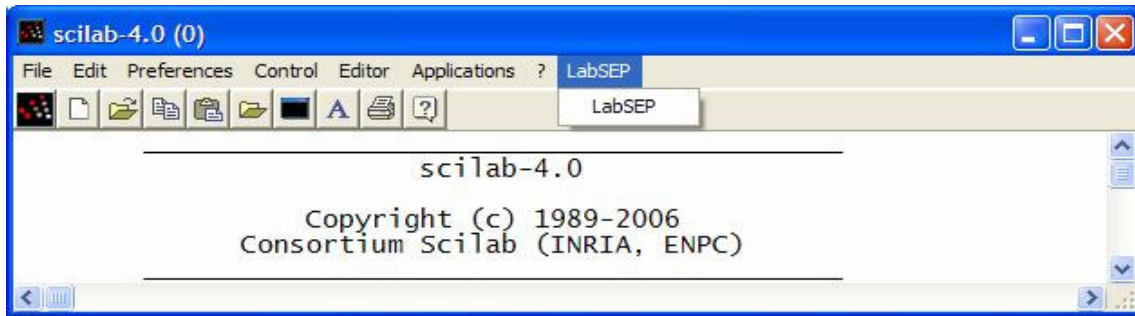


Figura 3 – Tela principal do Scilab.

Para ilustrar o ambiente de estudos são apresentadas, a seguir, três telas criadas pelo LabSEP (Figuras 4, 5 e 6). Na primeira tela o usuário tem as opções de abrir um sistema de potência existente, criar um sistema novo ou salvar os dados do sistema em uso. A segunda tela permite acesso aos diversos dados do sistema em uso. Finalmente, a terceira tela fornece as opções de análise disponíveis no programa.

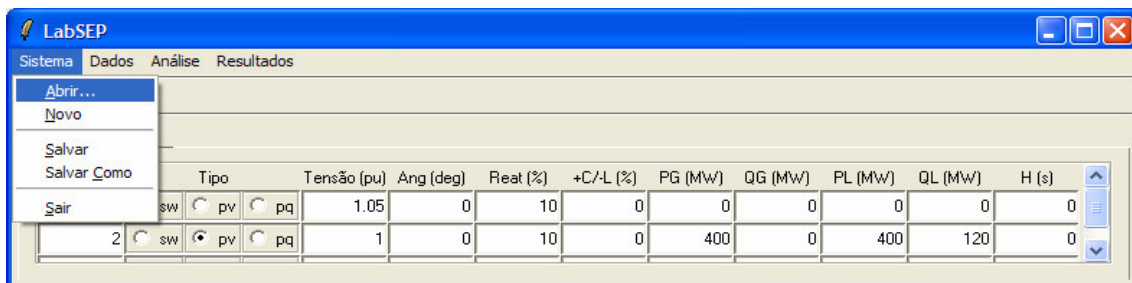


Figura 4 – Opções disponíveis no menu Sistema.

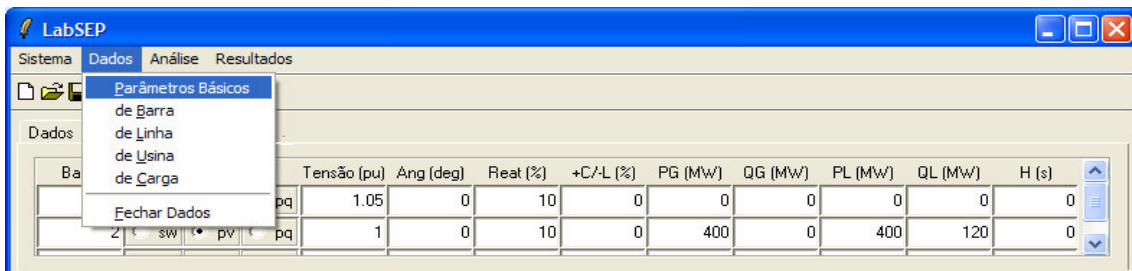


Figura 5 – Acesso aos dados do sistema em uso.

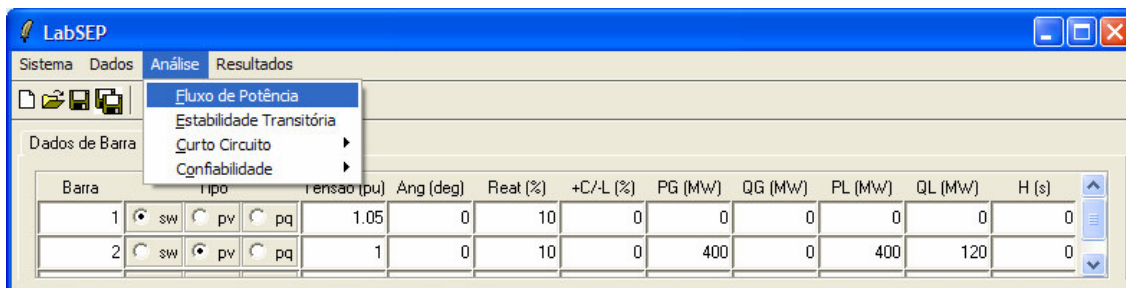


Figura 6 – Estudos disponíveis no menu Análise.

Através do ambiente de trabalho disponibilizado pelo LabSEP o aluno poderá realizar, de uma forma dinâmica e estimulante, diversas análises utilizando um mesmo sistema de potência, ou sistemas diferentes. A oportunidade de realizar estudos, variando dados e parâmetros de um sistema, permitirá ao aluno adquirir uma maior sensibilidade sobre o comportamento de sistemas de potência. Este nível de aprofundamento é inviável utilizando-se apenas exposições teóricas e exercícios resolvidos manualmente com o auxílio de calculadoras.

O objetivo do LabSEP é servir como um verdadeiro laboratório de experimentação em sistemas de potência. Portanto, tarefas razoavelmente complexas como o ajuste do estado operativo de um determinado sistema, levando em consideração restrições relacionadas ao nível de tensão nas barras e aos limites de capacidade de equipamentos, poderão ser desenvolvidas, rotineiramente, por alunos de graduação e pós-graduação.

Finalmente destaca-se que o LabSEP foi concebido para ser algo mais que um conjunto de programas interativos. A utilização do modelo de *software* livre dará aos alunos a oportunidade de interagir também com o código fonte dos programas. Assim os trabalhos realizados pelos alunos poderão se tornar ainda mais complexos, envolvendo atividades de desenvolvimento de algoritmos, seja para aprimorar o código fonte, implementar novas características ou até mesmo novos modelos.

## 1.6 Execução de estudos

A seguir, são apresentadas diversas telas para exemplificar os processos de entrada de dados e de exibição dos resultados, relativos aos estudos disponíveis. Para tal é utilizado um sistema exemplo, contendo três barras, duas unidades geradoras, dois pontos de consumo e três circuitos (linhas de transmissão).

A Figura 7 apresenta o acesso aos Dados de Barra, cuja maior parte está relacionada ao estudo de fluxo de potência. A última coluna da Figura 7 é destinada ao fornecimento da constante de inércia ( $H(s)$ ), a qual é utilizada apenas para estudos de estabilidade transitória. Esta mesma situação, i.e. existência de dados específicos para um determinado estudo, ocorre também para os Parâmetros Básicos. Já os Dados de Linha podem ser igualmente utilizados por todos os estudos. Os Dados de Usina e de Carga são utilizados apenas para o estudo de Confiabilidade de Sistemas de Geração.

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ang (deg)	Reat (%)	+C/-L (%)	PG (MW)	QG (MW)	PL (MW)	QL (MW)	H (s)
1	sw pv pq	1.05	0	10	0	0	0	0	0	0
2	sw pv pq	1	0	10	0	400	0	400	120	0
3	sw pv pq	1	0	10	0	0	0	400	80	0

Figura 7 – Aba contendo os Dados de Barra.

Após ter acessado os dados de um determinado sistema o usuário deve determinar o estudo e fornecer um novo conjunto de dados. Estes dados são específicos e, portanto, requisitados pelo LabSEP conforme o estudo a ser realizado. Para o Fluxo de Potência é necessário entrar apenas com o nome do arquivo que conterà os resultados, conforme mostra a Figura 8. Cabe destacar que este dado é requisitado por todos os estudos.

Figura 8 – Dado específico do Fluxo de Potência.

Já para os estudos de Curto-Circuito, Confiabilidade de Sistemas de Geração e Estabilidade Transitória deve-se fornecer vários dados específicos, destacados pelas Figuras 9, 10 e 11. A Figura 9 ilustra o preenchimento da barra onde será aplicado o curto-circuito.

Figura 9 – Dados específicos para Curto-Circuito.

Para realizar um estudo de Confiabilidade via simulação Seqüencial, por exemplo, o usuário deverá fornecer o limite de anos e a tolerância (Beta) para a convergência das estimativas dos índices. A Figura 10 apresenta a tela destinada para o fornecimento destes dados.

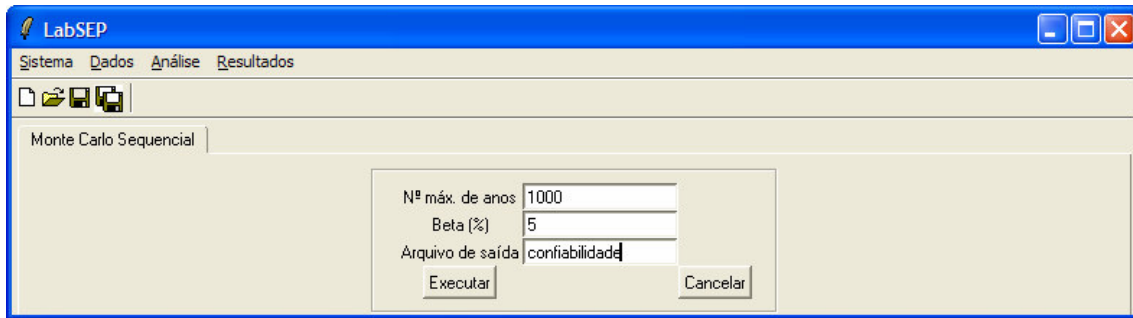


Figura 10 – Dados específicos para análise de Confiabilidade.

Com relação ao estudo de Estabilidade Transitória, várias rotinas foram implementadas para a monitoração de erros cometidos durante a inserção de dados específicos. Como ilustra a Figura 11, o fornecimento destes dados é bem mais complexo que para os demais estudos, pois é necessário fornecer a seqüência de distúrbios que ocorrerão ao longo do período de estudo.

Finalmente, informa-se que o LabSEP utiliza um processo coordenado para as ações de alguns programas de análise, pois os estudos de Curto-Circuito e de Estabilidade Transitória fazem uso de dados que são diretamente obtidos do estudo de Fluxo de Potência.

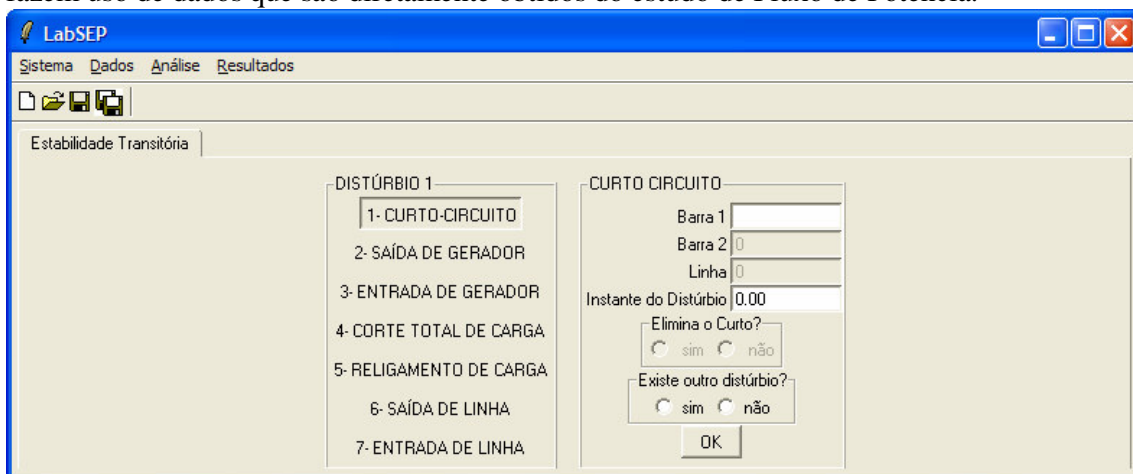


Figura 11 – Dados específicos para Estabilidade Transitória.

A título de exemplo a Figura 12 exhibe as opções de acesso aos resultados obtidos. Para o caso de um estudo de fluxo de potência aplicado ao sistema exemplo de três barras, a Figura 13 apresenta os resultados acessados diretamente pelo LabSEP. Estes mesmos resultados podem ser acessados através do EditPad, apresentando a formatação disposta na Figura 14.

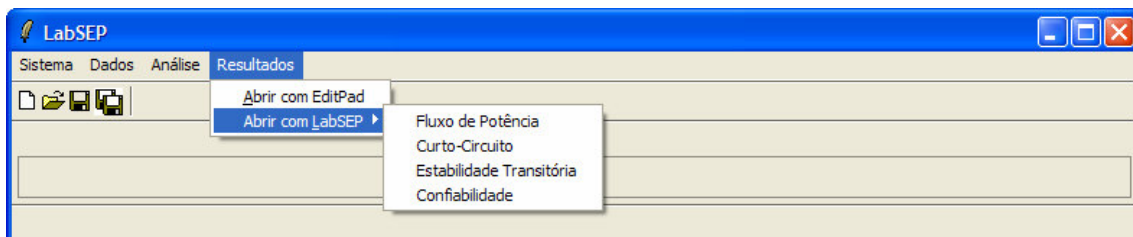


Figura 12 – Menu de acesso aos resultados.

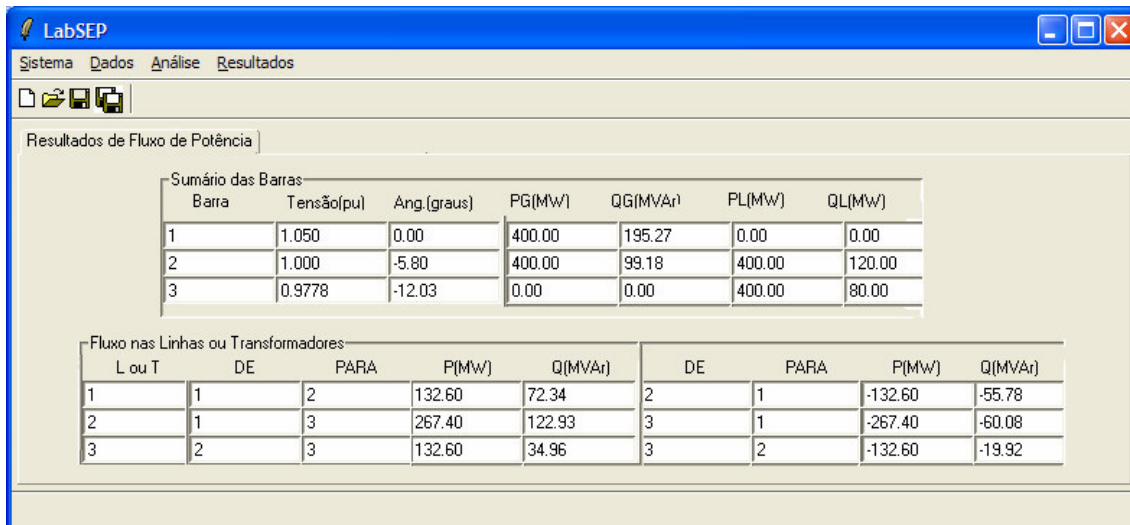


Figura 13 – Resultados do Fluxo de Potência visualizados pelo LabSEP.

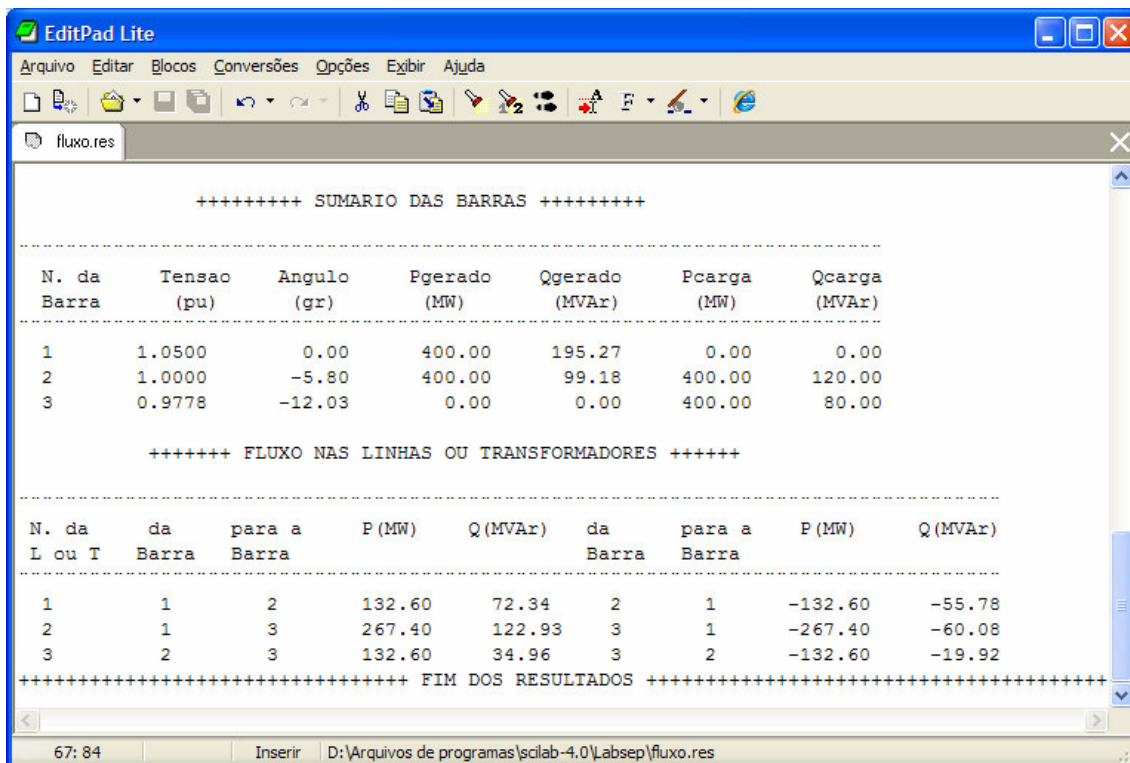


Figura 14 – Resultados do Fluxo de Potência visualizados pelo EditPad.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O LabSEP, conjunto de programas interativos, apresentado neste artigo, foi concebido para auxiliar professores e alunos no processo de ensino/aprendizagem em disciplinas da área

de Sistemas Elétricos de Potência, em cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Elétrica. Devido ao seu caráter didático o LabSEP não foi desenvolvido para lidar com sistemas de grande porte. No entanto, o mesmo é capaz de realizar estudos em sistemas com porte suficiente para configurar problemas mais complexos, como por exemplo, o ajuste das tensões em estudos de Fluxo de Potência.

Um aspecto altamente relevante do LabSEP está na adoção do modelo de *software* livre, com código fonte aberto, para a construção dos programas. Deste modo, os alunos terão algo ainda mais útil que um aplicativo amigável, pois poderão interagir com o mesmo na condição de desenvolvedores, fazendo alterações no seu código fonte, implementando novas características e até mesmo novos modelos de análise.

Desenvolvido por alunos do Curso de Engenharia Industrial Elétrica da Universidade Federal de São João del-Rei, o LabSEP permite a realização de estudos de Fluxo de Potência, Curto-Circuito, Estabilidade Transitória e Confiabilidade de Sistemas de Geração. Atualmente, estão sendo implementadas rotinas visando aprimorar a sua interface gráfica e introduzir a avaliação da confiabilidade de sistemas compostos de geração e transmissão.

#### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio recebido.

## **5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

KEZUNOVIC, M.; ABUR, A.; HUANG, G.; BOSE, A.; TOMSOVIC, K. “**The Role of Digital Modeling and Simulation in Power Engineering Education**”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, pp. 64-72, 2004.

MANSO, L.A.F. **ASPIM – Análise de Sistemas de Potência por Algoritmos Interativos em Microcomputadores**. Rio de Janeiro/RJ, 1989. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

MANSO, L.A.F.; SALES, W.S.; SILVA, A.M.L.; RESENDE, L.C. Confiabilidade Preventiva de Sistemas de Geração via Simulação Monte Carlo Não-Sequencial. In: V CLAGTEE – CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, São Pedro/SP, **Anais do V CLAGTEE (CD-ROM) artigo B-204**. Nov. 2003.

MELO, J.M.; MANSO, L.A.F. **Simulação Digital de Sistemas Elétricos de Potência Via Programas Interativos – Ano I**. São João del-Rei/MG, 2005. Relatório de Iniciação Científica – Universidade Federal de São João del-Rei.

MELO, J.M.; MANSO, L.A.F. **Simulação Digital de Sistemas Elétricos de Potência Via Programas Interativos – Ano II**. São João del-Rei/MG, 2006. Relatório de Iniciação Científica – Universidade Federal de São João del-Rei.

MONTICELLI, A.J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. Edgard Blücher, São Paulo, 1983.

STEVENSON, W.D. **Elements of power system analysis**. 4 ed. Auckland: Mc Graw-Hill, 1985. 436 p.

## **ELECTRIC POWER SYSTEM SIMULATION BY INTERACTIVE PROGRAMS**

**Abstract:** *This paper presents a set of interactive programs named LabSEP, which aims to contribute to the improvement of teaching Electric Power Systems Engineering. The available simulations, the designed conversation environment and its philosophy of construction, based on the concept of free software are presented. In the present version of the LabSEP the following simulations are implemented: Power Flow, Short-Circuit, Transitory Stability and Reliability of Generation Systems. Through the friendly built interface, the student will be able to carry out a continuous process of experimentation, questioning and concepts revising, consolidating the theoretical knowledge acquired in similar courses. The graphic interface was developed in Tcl language (Tool Command Language), and its graphic library Tk (Tool Kit). This language is interpreted by the free software Scilab, which was used for calculation of the implemented simulations. It is also important to emphasize that Tcl/Tk is a language of free use and that the LabSEP can be used in the Linux and Windows systems.*

**Key-words:** *Power systems, Engineering education, Interactive programs*