



DESENVOLVIMENTO DE PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA ESTUDOS DE CURTOS-CIRCUITOS, FLUXO DE POTÊNCIA E CÁLCULO DE TENSÃO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Johnny S. Andrade*¹, Lauro de V. B. M. Neto¹, Nilo S. Gomes¹ e Adilton J. L. Pereira¹

¹IPUC – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Resumo – Este artigo apresenta o desenvolvimento de um programa computacional intitulado *Análise de Sistemas de Potência - ASP*, com fins acadêmicos para estudos de curtos-circuitos, fluxo de potência e cálculo de tensão. O programa foi desenvolvido no *software MATLAB*[®] utilizando-se a interface gráfica GUI (Interface gráfica de usuário) e possui três módulos de simulação. Ao final do trabalho é apresentada a validação do programa ASP que consiste em uma análise comparativa das divergências percentuais obtidas em relação à mesma simulação nos *softwares ANAFAS*[®] (Análise de Falhas Simultâneas) e *PowerWorld*[®].

Palavras-Chave – Curtos-circuitos. Fluxo de Potência. *MATLAB*[®]. Sistemas de Potência.

DEVELOPMENT OF COMPUTATIONAL PROGRAM FOR SHORT-CIRCUIT STUDIES, LOAD FLOW AND VOLTAGE CALCULATION IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Abstract - This paper presents the development of a computer program entitled *ASP - Power Systems Analysis*, with academic purposes for short-circuit studies, load flow and voltage calculation. The program was developed in *MATLAB*[®] software using the Graphical User Interface (GUI) and has three simulation modules. At the end of the paper, the validation of the ASP program is presented, which consists of a comparative analysis of the percentage divergences obtained in relation to the same simulation in the *softwares ANAFAS*[®] (Simultaneous Fault Analysis) and *PowerWorld*[®].

Keywords – Load Flow. *MATLAB*[®]. Power Systems. Short-Circuit.

I. INTRODUÇÃO

A análise de redes elétricas constitui-se essencialmente dos cálculos de fluxo de potência e curto-circuito, os quais

são fundamentais para as áreas de planejamento e operação de sistemas elétricos de potência [1].

O estudo do fluxo de potência em redes elétricas consiste em se determinar as condições de operação do sistema por meio de cálculos do módulo e ângulo da tensão de cada barra, potência ativa e reativa que flui entre as linhas e perdas associadas. [2].

De uma forma geral, a análise e cálculo dos curtos-circuitos tem por objetivo o ajuste de relés de proteção, especificação e dimensionamento de disjuntores.

Uma vez que a variação de carga no sistema elétrico ocorre com elevado dinamismo, a coordenação e a supervisão do controle de tensão nos barramentos são importantes tarefas do Centro Nacional de Operação do Sistema (CNOS).

O objetivo do programa ASP é proporcionar um ambiente de simulação, para pesquisa e ensino do tratamento matricial de redes elétricas nos estudos de fluxo de potência e curto-circuito. Adicionalmente, visa o estudo da tensão necessária a um gerador para controle da tensão de uma barra de carga (PQ), utilizando-se de bancos de capacitores.

Todas as funcionalidades desenvolvidas no programa ASP são contempladas em *softwares* profissionais usualmente comercializados. A contribuição científica deste trabalho se caracteriza pela modelagem da matriz admitância de barra (Y_{BUS}) em *script* na linguagem de programação *MATLAB*[®], com chamadas para outros códigos e telas gráficas.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados os trabalhos correlatos e *softwares* frequentemente utilizados em estudos de sistemas elétricos de potência.

A. Trabalhos correlatos

Em [3], o autor desenvolve um programa em *MATLAB*[®] com ferramentas para fluxo de potência contínuo e análise de carregamento de equipamentos de Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Por meio da interface gráfica é possível a simulação de sistemas elétricos pré-definidos com até trinta barras. Os resultados são apresentados nas telas gráficas e no relatório de extensão “.txt” que é gerado.

Em [4] é apresentado um *software* em *MATLAB*[®] para cálculos de curtos-circuitos no sistema padrão IEEE 30

*souza.johnny19@gmail.com

barras. Os resultados são apresentados em tabelas na tela de interface gráfica,

No trabalho de [5], além do programa desenvolvido possibilitar simulação de fluxo e curto-circuito em quaisquer redes elétricas, há ferramentas para análise de estabilidade de sistemas elétricos.

B. Softwares frequentemente utilizados em estudos de SEP

Um *software* muito utilizado no Brasil para análise de SEP em regime permanente denomina-se Análise de Redes Elétricas (ANAREDE®). Trata-se de um programa desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica (CEPEL) e que possibilita a simulação de fluxo de potência, cálculo de equivalente de rede, análise de sensibilidade de tensão e de fluxo, além de análise de segurança de tensão.

O software Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS®) é outro recurso computacional desenvolvido pelo CEPEL para cálculos de curtos-circuitos e simulação de um grande número de faltas, inclusive a ocorrência destas simultaneamente.

III. CURTOS-CIRCUITOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

As faltas que ocorrem nos sistemas elétricos podem ser classificadas como curtos-circuitos (tipo shunt) e interrupções (tipo série). Esses defeitos podem ocorrer entre as três fases (3F), entre duas fases quaisquer (FFT ou FF), tendo contato à terra ou não, e entre uma fase e a terra (FT). Assim, tem-se a possibilidade de ocorrência de curtos-circuitos equilibrados e desequilibrados.

A utilização das componentes simétricas na solução de sistemas desequilibrados requer valores de impedâncias conforme a respectiva rede de sequência, designadas por positiva, negativa e zero, as quais são necessárias na formulação matricial do problema.

A. Equacionamento matricial

Nos cálculos matriciais de redes elétricas, a matriz de admitâncias nodais é comumente conhecida como $[Y_{BUS}]$. Essa matriz representa a relação entre o vetor $[I]$ de correntes elétricas injetadas nas barras e o vetor $[V]$ de tensões nodais conforme a equação 1 a seguir [1]:

$$[I] = [Y_{BUS}] \cdot [V] \quad (1)$$

Na construção da matriz $[Y_{BUS}]$ os elementos de índices repetidos, localizados na diagonal principal, são chamados de admitâncias próprias e correspondem à soma de todas as admitâncias ligadas à cada barra, como identificado na equação 2:

$$Y_{kk} = Y_{kG} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n \frac{1}{Z_{km}} \quad (2)$$

Onde:

- Y_{kk} - Admitância própria da barra "k".
- Y_{kG} - Admitância ligada à barra "k" e ao terra.
- Z_{km} - Impedância série entre as barras "k" e "m".

Os demais elementos são as admitâncias mútuas dos nós e cada um corresponde à admitância (Y_{km}) entre as barras identificadas nos índices, porém com sinal oposto [1].

$$Y_{km} = -\frac{1}{Z_{km}} \quad (3)$$

A utilização da matriz $[Z_{BUS}]$ para cálculos de curtos-circuitos equilibrados é extensível aos curtos-circuitos desequilibrados, sendo necessário obter as matrizes de impedâncias de sequência negativa e zero, fazendo-se o inverso da matriz $[Y_{BUS}^{(s)}]$, onde o índice "s" refere-se à sequência.

$$[Z_{BUS}^{(s)}] = [Y_{BUS}^{(s)}]^{-1} \quad (4)$$

A impedância de sequência que se faz necessária ao cálculo de curto-circuito numa dada barra "k" é a impedância de Thevenin equivalente vista desta barra, representada pelo elemento " Z_{kk} " da diagonal da matriz $[Z_{BUS}^{(s)}]$. Na Tabela I é apresentado o resumo de equações necessárias para cálculo de curtos-circuitos [5].

Tabela I: Equações para cálculo de curtos-circuitos

Curto-circuitos	$I_a^{(1)}$	$I_a^{(2)}$	$I_a^{(0)}$
FT	$\frac{V_k^{pf}}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)}}$	$I_a^{(1)}$	$I_a^{(1)}$
FFT	$\frac{V_k^{pf}}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(0)} // Z_{kk}^{(2)}}$	$-I_a^{(1)} \frac{Z_{kk}^{(0)}}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(2)}}$	$-I_a^{(1)} \frac{Z_{kk}^{(2)}}{Z_{kk}^{(0)} + Z_{kk}^{(2)}}$
3F	$\frac{V_k^{pf}}{Z_{kk}^{(1)}}$	0	0
(FF)	$\frac{V_k^{pf}}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)}}$	$-I_a^{(1)}$	0

Após obtidas as correntes de sequência positiva, negativa e zero ($I_a^{(1)}, I_a^{(2)}$ e $I_a^{(0)}$) pode-se calcular as correntes de fase (I_a, I_b e I_c) utilizando a matriz de transformação, conforme mostrado a seguir.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_a^{(1)} \\ I_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

De posse das correntes de falta para os diferentes tipos de curtos-circuitos, obtém-se as tensões nas barras de cada rede de sequência. Assim, o cálculo das tensões de falta $V_i^{f(s)}$ requer a matriz $Z_{BUS}^{(s)}$ com todas as barras $1 \leq i \leq n$, $s = \{0,1,2\}$ [6].

$$\begin{bmatrix} V_1^{f(s)} \\ \vdots \\ V_k^{f(s)} \\ \vdots \\ V_n^{f(s)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{(s)} & \dots & Z_{1k}^{(s)} & \dots & Z_{1n}^{(s)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{k1}^{(s)} & \dots & Z_{kk}^{(s)} & \dots & Z_{kn}^{(s)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1}^{(s)} & \dots & Z_{nk}^{(s)} & \dots & Z_{nn}^{(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_k^{f(s)} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Onde:

- $I_k^{f(s)}$ - Corrente de sequência na barra "k" em falta.

IV. MÉTODO NEWTON RAPHSON APLICADO AO FLUXO DE POTÊNCIA

As equações necessárias para o fluxo de potência são obtidas considerando a conservação das potências ativa e reativa que fluem em cada nó da rede. A potência líquida de entrada é igual à potência líquida de saída, somadas às que fluem pelos componentes ligados ao nó.

O método Newton-Raphson aplicado ao fluxo de potência consiste na linearização da função $g(x)$ em torno de um ponto "x", por meio do intermédio da Série de Taylor, no seguinte sistema linear [2]:

$$g(x) = -J(x)\Delta x \quad (7)$$

O ponto central consiste na determinação do vetor de correções Δx , utilizando-se a matriz $J(x)$, conhecida como matriz Jacobiana. Assim, assumindo "NPV" como número de barras PV (valores de potência ativa e módulo de tensão conhecidos) e NPQ como número de barras PQ (valores de potência ativa e reativa conhecidos), temos:

$$\Delta x^i = \begin{bmatrix} \Delta \theta^i \\ \Delta V^i \end{bmatrix} \begin{matrix} \} NPV + NPQ \\ \} NPQ \end{matrix} \quad (8)$$

$$g(x)^i = \begin{bmatrix} \Delta P^i \\ \Delta Q^i \end{bmatrix} \begin{matrix} \} NPV + NPQ \\ \} NPQ \end{matrix} \quad (9)$$

Onde:

$\Delta \theta$ - Vetor de variação dos ângulos das tensões das barras.

ΔV - Vetor de variação dos módulos das tensões das barras.

ΔP^i - Vetor de variação da potência ativa líquida.

ΔQ^i - Vetor de variação da potência reativa líquida.

A matriz Jacobiana, pode ser escrita da seguinte maneira:

$$J(x)^i = \begin{bmatrix} -\frac{\partial P(V, \theta)}{\partial \theta} & -\frac{\partial P(V, \theta)}{\partial V} \\ -\frac{\partial Q(V, \theta)}{\partial \theta} & -\frac{\partial Q(V, \theta)}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$H = \frac{\partial P(V, \theta)}{\partial \theta} \quad N = \frac{\partial P(V, \theta)}{\partial V} \quad (11)$$

$$M = \frac{\partial Q(V, \theta)}{\partial \theta} \quad L = \frac{\partial Q(V, \theta)}{\partial V} \quad (12)$$

Dessa forma, pode-se escrever o seguinte sistema:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^i \\ \Delta Q^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^i \\ \Delta V^i \end{bmatrix} \quad (13)$$

Ao término de cada iteração do algoritmo têm-se os valores dos módulos e ângulos das tensões das barras. O processo é finalizado quando se obtém a tolerância especificada de potência ativa e reativa.

$$\theta^{i+1} = \theta^i + \Delta \theta^i \quad (14)$$

$$V^{i+1} = V^i + \Delta V^i \quad (15)$$

Onde:

θ^{i+1} - Ângulo da tensão da barra após iteração.

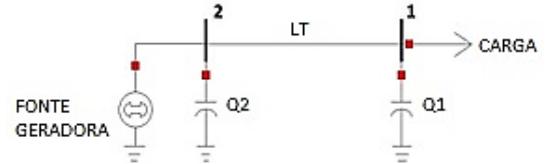
V^{i+1} - Módulo da tensão da barra após iteração.

V. CÁLCULO DE TENSÃO EM UM SISTEMA DE DUAS BARRAS

O sistema elétrico (Figura 1) utilizado no programa ASP para simulação do controle de tensão consiste em duas barras, sendo elas a barra 1 e a barra 2. Na barra 1 estão conectados uma carga e um banco de capacitores, denominado Q1.

Entre as barras 1 e 2 há uma linha de transmissão (LT), cujo modelo é composto por uma resistência e uma reatância indutiva. Já na barra 2 estão conectados uma fonte geradora modelada por uma fonte de tensão e uma reatância indutiva, e outro banco de capacitores, denominado Q2.

Figura 1: SEP de duas barras para cálculo de tensão



A modelagem matemática necessária para cálculo da tensão de geração (E_f) consiste no desenvolvimento das equações de corrente e tensão nas barras, no sentido da carga para a geração. A corrente da carga é dada pela seguinte equação:

$$I_L = \left(\frac{S_L}{V_1} \right)^* \quad (16)$$

Onde:

I_L : Corrente da carga;

S_L : Potência aparente da carga;

V_1 : Tensão da barra 1;

Utilizando-se a modelagem matemática do circuito elétrico, o cálculo da tensão de geração pode ser realizado pela seguinte equação:

$$E_f = V_2 + jX_G I_G \quad (17)$$

Onde:

E_f : Tensão de geração;

V_2 : Tensão da barra 2;

X_G : Reatância indutiva do gerador;

I_G : Corrente no gerador;

VI. ASP – ANÁLISE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

O desenvolvimento do programa ASP foi realizado integralmente no *software MATLAB*®, haja vista a linguagem nativa para realização de cálculos matriciais e por ser uma ferramenta bastante empregada no meio acadêmico.

Foram desenvolvidas interfaces gráficas para cada um dos três módulos do programa e uma tela principal (Figura 2), de forma a possibilitar um ambiente de simulação para o usuário.

Os códigos de programação das interfaces gráficas contêm as funcionalidades dos botões, exibição de textos e imagens, e chamadas de outros códigos. Logo, em cada módulo de simulação há um código para a tela e outro para a modelagem matemática implementada. Na Figura 3 é apresentada a arquitetura de códigos desenvolvidos para execução do programa ASP.

Figura 2: Tela principal do programa ASP.

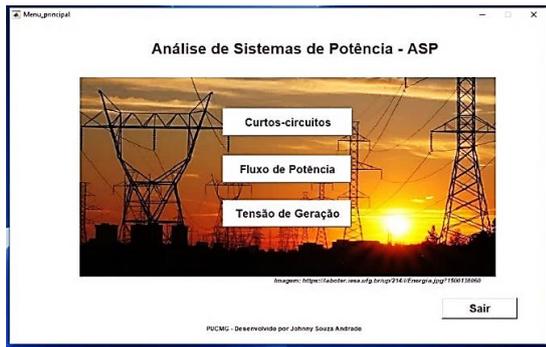
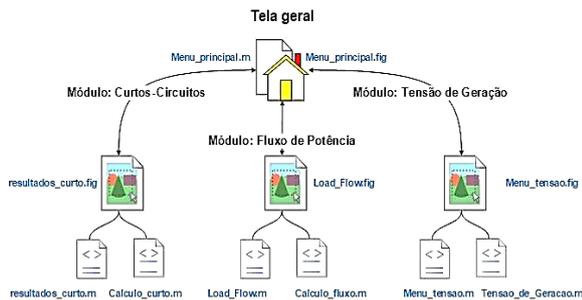


Figura 3: Arquitetura de códigos do programa ASP.

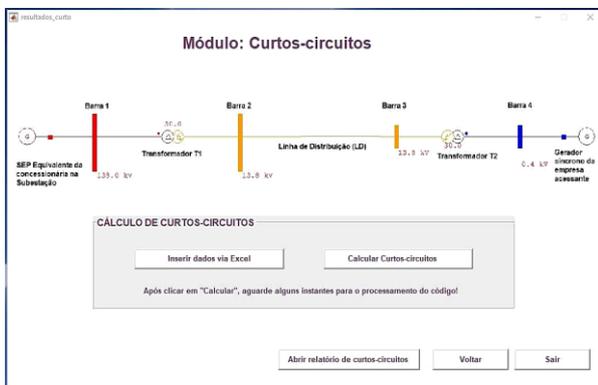


A. Descrição do módulo Curtos-circuitos

Após o usuário clicar sobre o botão “Curtos-Circuitos”, na tela principal do programa ASP, é aberta a tela de simulação apresentada na Figura 4. O sistema elétrico disponível para simulação consiste em um típico sistema de geração distribuída modelado com quatro barras.

O modelo do SEP inicia-se pela representação do equivalente de Thevenin visto da subestação da concessionária conectado à barra 1 de 138 kV, conforme Figura 4. Nessa barra há também um transformador abaixador trifásico com relação de 138 - 13.8 kV conectado pelo lado de baixa na barra 2. Após o transformador abaixador T1, há uma linha de distribuição de 13.8 kV que se conecta a outro transformador abaixador (T2), cuja relação é de 13800 – 440 V.

Figura 4: SEP de quatro barras para simulação de curtos-circuitos.



A utilização deste módulo inicia-se pela inserção de todos os parâmetros elétricos do equivalente do sistema, transformadores, linha de distribuição e gerador síncrono da

barra 4. Para isso, basta o usuário clicar sobre o botão “Inserir dados via Excel”. Na sequência, automaticamente é aberta uma planilha com valores de resistência e reatância *default* de sequência positiva, negativa e zero, os quais podem ser alterados pelo usuário. Os parâmetros *default* correspondem aos valores característicos de uma rede de distribuição da Companhia Energética de Minas Gerais.

De forma a aprimorar o processo de cálculo de curtos-circuitos, não é solicitado ao usuário a barra e o tipo de curto-circuito. Logo, são calculadas todas as situações possíveis, ou seja, em cada barra quatro tipos de curtos-circuitos. Para cada curto-circuito são calculadas as correntes de curto (em ampères), as tensões nas outras barras (em pu) e todas as contribuições de corrente (em ampères), em componentes de sequência e de fase.

Todos os resultados obtidos são apresentados na forma de relatório em um arquivo do tipo “.txt”. As letras “Z”, “P” e “N” situadas a direita na Figura 5 referem-se às grandezas de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente. Desta forma, os valores de fase à esquerda foram obtidos pela aplicação da equação 5. Na Figura 5 é apresentado um fragmento do relatório gerado.

Figura 5: Fragmento do relatório de resultados gerado pelo módulo de curtos-circuitos.

FALTA TRIFASICA (3F)

CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NA BARRA 1

Ia: 8040.671	fase: -75.69	Z: 0.000	fase: 0.00
Ib: 8040.671	fase: 164.31	P: 8040.671	fase: -75.69
Ic: 8040.671	fase: 44.31	N: 0.000	fase: 0.00

Correntes de contribuição do primário do trafo2 para a barra 3

Ia: 38.314	fase: -56.83	Z: 0.000	fase: 0.00
Ib: 38.314	fase: -176.83	P: 38.314	fase: -56.83
Ic: 38.314	fase: 63.17	N: 0.000	fase: 0.00

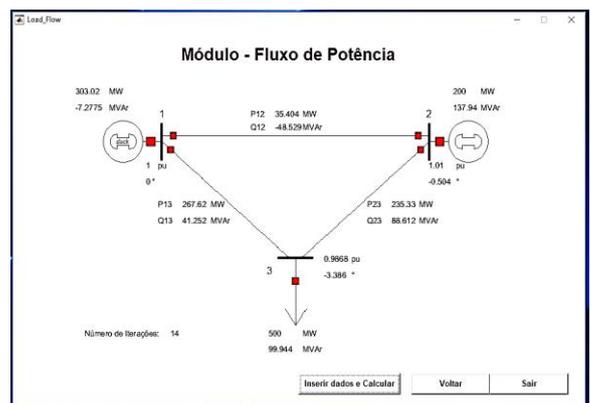
TENSOES NA BARRA 1

Va: 0.000	fase: -90.00	Z: 0.000	fase: 0.00
Vb: 0.000	fase: 150.00	P: 0.000	fase: -90.00
Vc: 0.000	fase: 30.00	N: 0.000	fase: 0.00

B. Descrição do módulo Fluxo de Potência

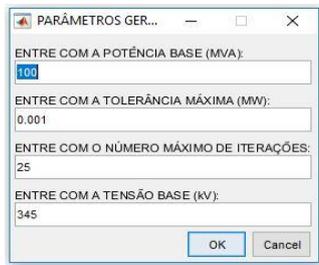
O módulo Fluxo de Potência disponibiliza ao usuário a simulação de um sistema elétrico de três barras (Figura 6), em que a barra 1 é definida como *slack* (referência), a barra 2 como barra de geração (tipo PV) e a barra 3 como barra de carga (tipo PQ). Por meio deste módulo é possível obter os valores de tensão (módulo e ângulo) na barra da carga, o ângulo da tensão da barra de geração, além de todos os fluxos de potência entre as linhas.

Figura 6: SEP de três barras para simulação de fluxo de potência.



A simulação deste módulo inicia-se após o usuário clicar no botão “Inserir dados e Calcular”. Logo, é aberta automaticamente a janela de inserção dos dados gerais, apresentados na Figura 7. Os dados gerais referem-se à potência base, tolerância máxima, número máximo de iterações e tensões base. Na sequência são abertas outras janelas para inserção de dados da carga e barras.

Figura 7: Tela de entrada de dados do módulo Fluxo de Potência



O produto deste módulo resulta na exibição de todas as grandezas elétricas diretamente no diagrama do sistema (Figura 6).

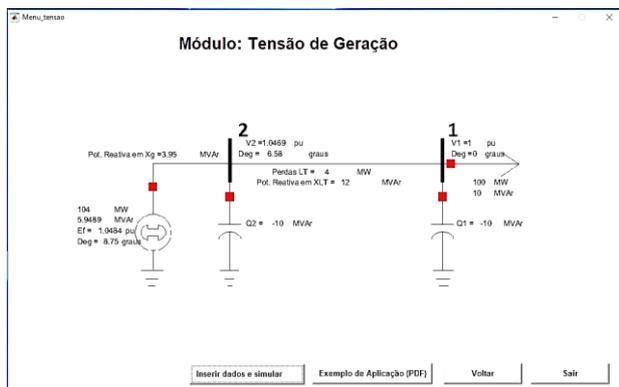
C. Descrição do módulo Tensão de Geração

Os principais objetivos deste módulo de simulação são:

- Calcular e avaliar a tensão de geração (E_f) para várias condições de carga;
- Avaliar o comportamento do circuito para as condições de banco de capacitores ligados e desligados;
- Calcular as potências ativa e reativa necessárias na geração para suprimento da carga e perdas;

Após o usuário clicar em “Inserir dados e simular”, são abertas janelas para entrada de dados, semelhante às do módulo de Fluxo de Potência. O produto final deste módulo consiste na exibição de todas as grandezas elétricas diretamente sobre o diagrama do SEP, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8: SEP de duas barras com os resultados do módulo Tensão de Geração



VII. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A. Módulo Curtos-circuitos

Objetivando a validação do módulo de curtos-circuitos do programa ASP foram realizadas simulações idênticas no software ANAFAS®.

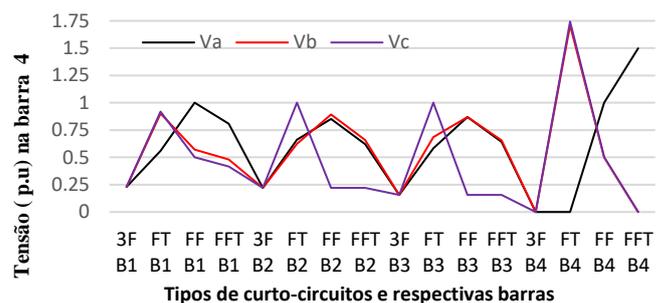
Na Tabela II são apresentadas as divergências percentuais entre os resultados de corrente de contribuição (em ampères) do gerador para a barra 4 obtidos no ANAFAS® e no programa ASP. A diferença máxima obtida nos resultados foi de 0,19%, o que ocorre apenas em função do número de casas decimais utilizadas.

Tabela II: Divergências percentuais entre resultados obtidos de correntes de curtos-circuitos no ASP e ANAFAS®

Curto-circuito	ASP	ANAFAS®	Divergência
3F B1	1201,674	1201,7	-0,00216%
FT B1	679,923	679,9	0,00338%
FF B1	1040,68	1040,7	-0,00192%
FFT B1	1053,91	1054	-0,00854%
3FB2	1213,103	1213,1	0,00025%
FT B2	714,564	715	-0,06098%
FF B2	1213,103	1213	0,00849%
FFT B2	1213,10	1213	0,00824%
3F B3	1303,194	1303	0,01489%
FT B3	744,16	744	0,02151%
FF B3	1303,194	1303	0,01489%
FFT B3	1303,194	1303	0,01489%
3F B4	1545,754	1546	-0,01591%
FT B4	113,783	114	-0,19035%
FF B4	1338,662	1339	-0,02524%
FFT B4	1382,41	1382	0,02967%

De posse dos valores de tensão de fase (em p.u.) na barra 4 foi elaborado o gráfico do comportamento das tensões desta barra, conforme identificado na Figura 9. Constata-se que há afundamentos de tensão quando da ocorrência de curtos trifásicos, tendo valores da ordem de 0,2 p.u. O menor impacto nas tensões da barra 4 ocorre para curtos fase-fase, situação em que as tensões V_a e V_b ficam próximas à 0,9 p.u. Por fim, é importante ressaltar que o curto fase-terra na barra 4 proporciona sobretensão em duas fases, alcançando valores da ordem de 1,7 p.u., o que pode ser prejudicial para os equipamentos, caso a falta não seja eliminada em tempo hábil.

Figura 9: Tensões de fase (em p.u.) da barra 4.



B. Módulo Fluxo de Potência

Objetivando a validação do módulo de Fluxo de Potência do programa ASP foram realizadas simulações idênticas no software PowerWorld®. Dessa forma, foram utilizados para simulação os parâmetros *default* exibidos das janelas disponibilizadas ao usuário no ASP. Os valores *default* foram obtidos em [7]. Na Tabela III são apresentadas as divergências percentuais entre os softwares PowerWorld® e ASP. Como podem ser identificadas, as divergências obtidas são inferiores a 0,5%, o que ocorre em função do número de casas decimais utilizadas.

Tabela III: Divergências percentuais entre resultados obtidos para fluxo de potência no programa ASP e no PowerWorld®

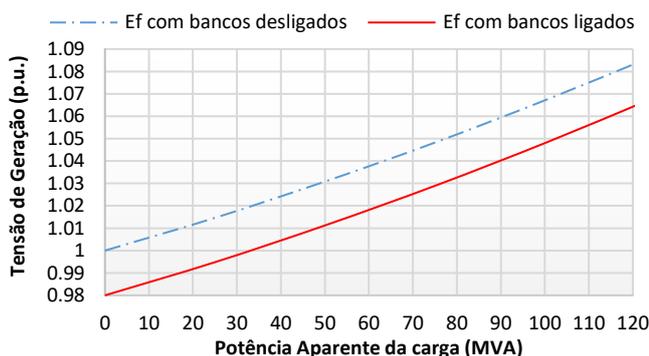
Grandeza	ASP	PowerWorld®	Divergência
P1 (MW)	303,02	303,02	0,000%
Q1 (MVAr)	-7,2775	-7,25	0,379%
V1 (p.u.)	1	1	0,000%
θ_1 (°)	0	0	0,000%
P2 (MW)	200	200	0,000%
Q2 (MVAr)	137,94	137,97	-0,022%
V2 (p.u.)	1,01	1,01	0,000%
θ_2 (°)	-0,504	-0,50	0,800%
P3 (MW)	500	500	0,000%
Q3 (MVAr)	99,944	100	-0,056%
V3 (p.u.)	0,9868	0,9868	0,000%
θ_3 (°)	-3,386	-3,39	-0,118%
P12 (MW)	35,404	35,404	0,000%
Q12 (MVAr)	-48,529	-48,529	0,000%
P13 (MW)	267,62	267,62	0,000%
Q13 (MVAr)	41,252	41,28	-0,068%
P23 (MW)	235,33	235,3	0,013%
Q23 (MVAr)	88,612	88,6	0,014%

C. Módulo Tensão de Geração

A utilização deste módulo consiste no cálculo da tensão necessária na geração (Ef) para que a tensão na carga seja igual a 1,0 p.u. Foram utilizados para simulação os parâmetros *default* exibidos das janelas disponibilizadas ao usuário, sendo realizadas simulações com banco de capacitores ligados e depois desligados. Os valores *default* foram obtidos em notas de aulas da disciplina “Informática Aplicada à Engenharia Elétrica”, lecionada na PUC Minas pelo autor deste artigo, Nilo S. Gomes.

É possível perceber pela Figura 10 que a tensão de geração “Ef” possui relação linear com a potência aparente da carga, sendo que com os bancos de capacitores desligados é necessária uma maior tensão na geração para alcançar 1 p.u. de tensão na carga. Isso se deve pelo fato de que sem os bancos de capacitores há uma maior corrente na linha, o que propicia maior queda de tensão na LT.

Figura 10: Comparação da tensão de geração



VIII. CONCLUSÕES

A modelagem das matrizes $[Y_{BUS}^{(s)}]$ nos códigos desenvolvidos possibilitam auxiliar estudantes e pesquisadores a entender sobre técnicas computacionais tradicionalmente utilizadas. O código desenvolvido e a navegação entre as interfaces gráficas apresentaram desempenho satisfatório durante as simulações.

Os módulos “Curtos-circuitos” e “Fluxo de Potência” foram validados nos *softwares* ANAFAS® e PowerWorld®, respectivamente. As divergências encontradas são desprezíveis, e caracterizam um desempenho satisfatório.

A apresentação das tensões e correntes em componentes de sequência zero, positiva e negativa possibilita ao usuário observar o deslocamento angular de 30° em transformadores, gerado pelas conexões triângulo-estrela e estrela-triângulo. Assim, após a utilização da equação 6 no algoritmo desenvolvido foi aplicada a correção de +30° para sequência positiva e -30° para sequência negativa.

O resultado do Fluxo de Potência apresentado na Figura 6 contempla o módulo e ângulo das tensões nas barras e os valores de potência ativa e reativa. De acordo com o previsto nos estudos de fluxo de potência, a potência ativa fluiu da barra de maior ângulo para a de menor ângulo, neste caso a barra da carga. A potência reativa fluiu da barra de maior tensão para a de menor tensão, novamente a barra da carga.

A utilização do módulo “Tensão de Geração” possibilitou verificar o funcionamento dos bancos de capacitores no controle de tensão nas barras. A utilização do banco de capacitores Q1 conectado diretamente à barra da carga apresentou melhor desempenho para controle de tensão, haja vista que a oposição dos fasores de corrente capacitiva e corrente indutiva ocorre na barra da carga, sem que seja necessária maior corrente na LT.

Como proposta de trabalhos futuros tem-se o desenvolvimento de módulos adicionais ao programa ASP para cálculo de ajustes e simulação de relés de proteção, contemplando as funções de proteção de distância (21), sobrecorrente (50/51) e diferencial (87).

REFERÊNCIAS

- [1] W. D. Stevenson Jr, *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. 2ª ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1986, 236 p, il.
- [2] A. J. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Editora Blücher Ltda., 1983.
- [3] CANOSSA, Jaine Henrique. *Um programa interativo para estudos de fluxo de potência*. 2007.166p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
- [4] J. Prajapati, V. Patel and H. Patel, "Load flow, short circuit and stability analysis using Matlab," *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)*, Coimbatore, 2014, pp. 1-5.
- [5] OLIVEIRA, Thales Lima. *Desenvolvimento de uma plataforma computacional gráfica e de código aberto para estudos de sistemas de potência*. 2016. 179f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- [6] L. C. Zanetta Jr., *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2005.
- [7] Abdul Wahab (2018). *Newton raphson based Load flow for three bus power system*. Acedido em 18 de Março de 2018, em <https://www.mathworks.com/matlabcentral/>.