

IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS CÁLCULOS DE CURTO-CIRCUITO NO SOFTWARE PSP-UFU

Thales Lima Oliveira, Geraldo Caixeta Guimarães, Fernando Bento Silva
thaleslima.ufu@gmail.com, gcaixetag@gmail.com, fbentosilva@hotmail.com
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG

Resumo - Este artigo apresenta a implementação do cálculo de curto-circuito no *software* intitulado PSP-UFU (Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia). O PSP-UFU foi originalmente desenvolvido para o estudo de fluxo de carga e análise dinâmica através do programa TransUFU. O *software* permite modelar qualquer rede elétrica através de uma interface gráfica. Para realizar a implementação foi utilizada a linguagem de programação C++, a qual é bastante empregada na academia e tem a vantagem de ser uma linguagem orientada a objetos. Para validar a nova ferramenta de simulação, alguns casos de curto-circuito foram criados no PSP-UFU e os resultados foram comparados com aqueles provenientes de outro simulador já conhecido. É importante destacar que o PSP-UFU é um programa de código fonte aberto, possibilitando a criação de novas ferramentas além daquelas desenvolvidas nesta pesquisa.

Palavras-Chave - Cálculo de Curto-circuito, Código aberto, Interface gráfica de usuário, PSP-UFU, Sistema de potência.

IMPLEMENTATION AND VALIDATION OF SHORT-CIRCUIT CALCULATIONS IN PSP-UFU SOFTWARE

Abstract - This paper presents the implementation of short-circuit calculation in software entitled PSP-UFU (Power Systems Platform of Federal University of Uberlândia). PSP-UFU was originally developed for load flow study and power system dynamic analysis through TransUFU program. The software allows the modeling of any electrical power system through a graphical interface. To perform the implementation it was used the programming language C ++, which is widely employed in academia and has the advantage of being an object-oriented language. To validate the new simulation tool, some short-circuit cases were created in PSP-UFU and the results were compared with those from well-known simulator. It is important to highlight that PSP-UFU is an open source program, enabling the creation of new tools in addition to those developed in this research.

Keywords - Graphical user interface, Open source, Power system, PSP-UFU, Short-circuit calculation.

I. INTRODUÇÃO

Com o advento dos computadores tornou-se possível a simulação e análise de eventos através de modelagens matemáticas, providenciando uma grande economia de recursos. No âmbito de sistemas elétricos de potência, é possível então, simular o comportamento de um circuito elétrico de grande porte e verificar seu comportamento nominal, além de ser possível aplicar distúrbios na rede e examinar suas consequências.

O avanço tecnológico do *hardware* de computadores possibilitou uma integração maior com o utilizador dos programas computacionais de sistemas de potência através da interface gráfica do usuário (GUI, do inglês *Graphical User Interface*), permitindo a interação do utilizador através de elementos gráficos como ícones e outros indicadores visuais, proporcionando assim, uma maior agilidade na criação dos circuitos e análise dos mesmos. Vários programas foram desenvolvidos com essa nova funcionalidade, os quais são, em grande parte, comerciais.

Observa-se então, a importância de um *software* de análise de sistemas elétricos de potência gratuito com uma interface gráfica amigável. Uma outra característica desejável é que o programa seja de código aberto (*open-source*) para a criação de novos elementos elétricos e desenvolvimentos de novas funcionalidades.

Dentro desse contexto iniciou-se o desenvolvimento de uma plataforma de análises de sistemas elétricos de potência, capaz de realizar as seguintes funções: estudo de fluxo de carga, cálculo de curto-circuito simétrico e assimétrico, e análise dinâmica através do programa TransUFU [1]. Por meio de uma GUI é possível criar uma rede de potência genérica, onde estão presentes os principais elementos elétricos que podem ser inseridos, manipulados e visualizados através de várias ferramentas gráficas.

A linguagem de programação escolhida para o desenvolvimento do programa foi o C++, que consiste em uma linguagem multi-paradigma, o qual se destaca a orientação a objetos, sendo uma das linguagens mais populares e bastante utilizada na academia. Para o desenvolvimento da interface gráfica foi empregado o wxWidgets, um *framework* para criação de GUI multiplataforma [2].

O *software* desenvolvido foi batizado de Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia (PSP-UFU).



XIII CEEL - ISSN 2178-8308
12 a 16 de Outubro de 2015
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

Este artigo aborda a implementação e validação do cálculo do curto-circuito de qualquer sistema elétrico de potência nesse software sendo que a necessária condição inicial deverá provida ao se processar o programa de fluxo de carga que foi inserido numa etapa anterior.

II. ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO

O objetivo principal da análise de curto-circuito é o cálculo das correntes e tensões de falta para especificação de disjuntores e relés de proteção [3]. Através do cálculo de faltas assimétricas podem-se observar os desequilíbrios das tensões e correntes, além de seu impacto no sistema.

Como resultado do cálculo de curto-circuito, obtêm-se os módulos e ângulos das tensões e correntes (no ponto da falta, nos ramos e contribuições dos geradores) durante a falta.

Uma vez que o sistema modelado no PSP-UFU é balanceado e aplicam-se faltas desbalanceadas, é necessário o uso do método de “componentes simétricas”, ou teorema de Fortescue [4]. Através deste método foi possível a implementação de diferentes tipos de falta, além do **curto-circuito trifásico**, as quais são as seguintes: **fase-fase**, **fase-fase-terra** e **fase-terra**.

III. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para representar matematicamente uma rede elétrica precisamos dos parâmetros característicos de cada elemento, que será representado em uma forma matricial. Essa matriz característica do sistema é chamada Matriz das Admitâncias (Y_{bus}). Para a construção de Y_{bus} , devemos modelar alguns componentes básicos do sistema: geradores, linhas de transmissão, transformadores e elementos passivos.

No cálculo de curto-circuito assimétrico necessita-se da formação de três matrizes admitâncias: sequência positiva (idêntica à utilizada para falta trifásica), sequência negativa e sequência zero. A formação das três matrizes é para a aplicação do método de componentes simétricas [4].

A. Modelagem dos componentes do sistema

Para a sequência positiva e negativa, os geradores são modelados como uma resistência em série com uma indutância. Na sequência zero deve-se acrescentar três vezes o valor da impedância de aterramento, caso a ligação do gerador seja estrela aterrado.

A linha de transmissão pode ser modelada segundo seu equivalente π (π), definido por três parâmetros para cada sequência: a resistência série, reatância série, e duas susceptâncias shunt.

O transformador, consiste basicamente em uma impedância ($R + jX$) em série com um transformador ideal de relação de transformação $t:1$, onde t pode ser um número complexo e representa o TAP e a defasagem.

Os elementos shunt, como indutores, capacitores shunt e cargas passivas, são representados simplesmente por suas admitâncias. Como seus parâmetros de entrada são normalmente as suas potências nominais, deve-se encontrar as admitâncias com a seguinte equação:

$$\dot{Y} = \frac{P - jQ}{V^2} \quad (1)$$

De posse desses parâmetros podemos construir a matriz Y_{bus} seguindo as equações expostas abaixo:

$$\dot{Y}_{ij} = -\dot{y}_{ij} \quad (2)$$

$$\dot{Y}_{ii} = \dot{y}_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \dot{y}_{ij} \quad (3)$$

Onde:

Y_{ii} e Y_{ij} - Elementos da diagonal e fora da diagonal, respectivamente, da matriz admitância;

y_{ij} - Admitância dos parâmetros série da linha ou transformador;

y_{ii} - Admitância shunt composta pelas capacitâncias shunt da linha, dos capacitores e reatores shunt, além das cargas.

O transformador que possuir TAP fora do nominal e/ou defasagem diferente de zero deve ser inserido na matriz admitância de sequência positiva segundo a equação matricial abaixo [3] [5]:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_{ii} & \dot{Y}_{ij} \\ \dot{Y}_{ji} & \dot{Y}_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y} & -t \cdot \dot{y} \\ -t^* \cdot \dot{y} & |t|^2 \cdot \dot{y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para a sequência negativa é utilizado a equação (4), porém o valor de t é o seu conjugado.

Os valores de sequência zero dos transformadores a serem inseridos na sua matriz correspondente depende de sua conexão segundo a tabela abaixo [5]:

Tabela I - Valores da matriz admitância de sequência negativa de acordo com a conexão do transformador.

Tipo de conexão	Y_{ii}	Y_{ij}
Estrela* - Estrela*	Admitância de seq. zero	Admitância de seq. zero
Estrela* - Delta	Admitância de seq. zero	0,0

Onde:

Y_{ii} e Y_{ij} - Elementos da diagonal e fora da diagonal, respectivamente, da matriz admitância;

Estrela* - Conexão estrela aterrado.

Para as demais conexões os valores a serem inseridos na matriz admitância são zero.

Após a formação das matrizes admitância de sequência, invertem-se as mesmas para obtenção da matriz impedância de barras (Z_{bus}) e utilização de seus valores nas equações de cálculo do curto-circuito.

B. Equacionamento

Para cada tipo de falta são calculadas as suas correntes de sequência [3], conforme a Tabela II, onde:

$$\begin{aligned} Z_{ii}^1 &= Z_{ii}^1 + 0,5Z_f \\ Z_{ii}^2 &= Z_{ii}^2 + 0,5Z_f \\ Z_{ii}^0 &= Z_{ii}^0 + 0,5Z_f \end{aligned} \quad (5)$$

Z_{ii}^1, Z_{ii}^2 e Z_{ii}^0 - Elementos correspondentes ao barramento i da diagonal da matriz de impedâncias de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente;

Z_f - Impedância de falta;

E_i - Tensão pré-falta do barramento i .

Tabela II - Equações para cálculo das faltas.

Falta	Corrente seq. positiva	Corrente seq. negativa	Corrente seq. zero
F-T	$\frac{E_i}{Z_{ii}^1 + Z_{ii}^2 + Z_{ii}^0 + 3Z_f}$	I_f^1	I_f^1
F-F	$\frac{E_i}{Z_{ii}^1 + Z_{ii}^2 + Z_f}$	$-I_f^1$	0,0
F-F-T	$\frac{E_i}{(Z_{ii}^2 \cdot Z_{ii}^0) / (Z_{ii}^2 + Z_{ii}^0) + Z_{ii}^1}$	$\frac{-Z_{ii}^0 \cdot I_f^1}{Z_{ii}^2 + Z_{ii}^0}$	$\frac{-Z_{ii}^2 \cdot I_f^1}{Z_{ii}^2 + Z_{ii}^0}$
3F-T	$\frac{E_i}{Z_{ii}^1 + Z_f}$	0,0	0,0

A partir do cálculo das correntes de falta, pode-se obter as tensões de falta em todos os barramentos por meio das equações matriciais:

$$\begin{aligned} [V_f^1] &= [E] - [Z_1] \cdot [I_f^1] \\ [V_f^2] &= -[Z_2] \cdot [I_f^2] \\ [V_f^0] &= -[Z_0] \cdot [I_f^0] \end{aligned} \quad (6)$$

Para converter os valores de tensão e corrente para seus valores de fase basta aplicar a matriz transformação do método das componentes simétricas [4] [5]:

$$\begin{aligned} [\dot{V}_{abc}] &= [A] \cdot [\dot{V}_{012}] \\ \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

Onde:

$V_a, V_b,$ e V_c - Valores de fase;

$V_0, V_1,$ e V_2 - Valores de sequência (zero, positiva e negativa, respectivamente);

a - Valor de $1,0 \angle 120^\circ = 1e^{j2\pi/3} = -0,5 + j0,866$.

IV. PLATAFORMA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (PSP-UFU)

O PSP-UFU teve como objetivo inicial proporcionar o estudo de fluxo de carga e a análise dinâmica de um sistema elétrico de potência através da criação dos circuitos com o auxílio de elementos gráficos de forma fácil e intuitiva. Este artigo salienta a inclusão do cálculo de curto-circuito, seja simétrico, seja assimétrico, na última versão do *software*.

Como o programa PSP-UFU é gratuito, o mesmo é possível de ser adquirido através do contato por e-mail com os autores deste artigo.

A. Linguagem de programação e bibliotecas utilizadas

Para proporcionar uma GUI, tornou-se necessário o estudo de uma linguagem de programação e ferramentas para auxiliar a sua criação. Foi escolhida a linguagem de programação C++ com suas bibliotecas padrões em conjunto com as bibliotecas de criação de interface gráfica do wxWidgets [2].

São inúmeros os motivos para a escolha do C++ como a linguagem de programação, os quais podem-se citar as principais: linguagem gratuita e aberta; grande portabilidade, o que permite seu uso em várias plataformas, vasto suporte bibliográfico, tanto por meio de livros quanto em fóruns de discussão online e finalmente possui o paradigma de orientação a objetos, o qual foi utilizado na criação do PSP-UFU.

O wxWidgets é um *framework* para criação de GUI multiplataforma [2]. Suas bibliotecas são distribuídas de forma aberta e gratuita, além de serem de domínio público. Com isso foi possível desenvolver uma interface gráfica amigável com aparência nativa nas plataformas Windows e Linux.

B. Criação de uma rede elétrica no PSP-UFU

Os projetos podem ser criados através da barra de menu principal na opção “Novo Projeto” no menu *Ribbon* “Arquivos”. Após a criação do novo projeto será possível adicionar os elementos de uma rede elétrica. A Fig. 1 apresenta a tela principal do programa.

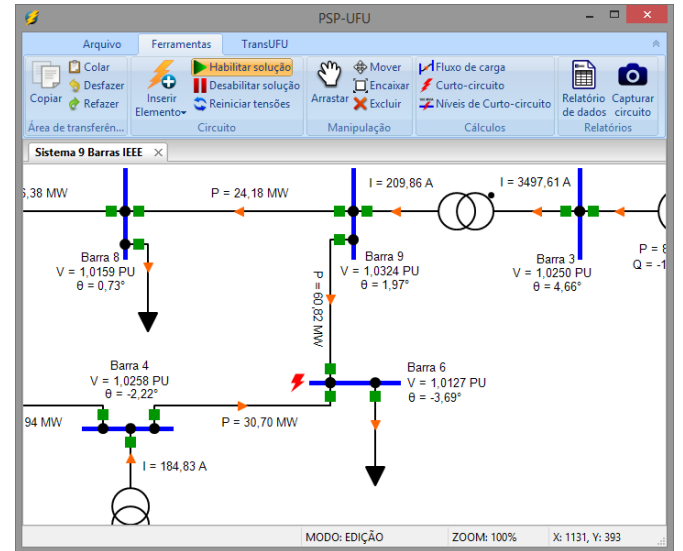


Fig. 1. Tela principal do programa PSP-UFU

Os elementos elétricos desenvolvidos são: barramento, gerador, transformador, linha de transmissão, carga (potência constante e impedância constante), compensador síncrono, capacitor shunt, reator shunt e motor de indução. Esses elementos, com exceção dos barramentos, são conectados em uma ou entre duas barras (linha de transmissão e transformadores), e poderão ser inseridos através de um menu *Ribbon*, um menu de contexto ou pelas teclas de atalho de cada referentes a cada objeto.

Também foi criado um elemento de texto, que pode ser inserido na rede criada, para obter alguns dados de forma rápida ou destacá-los em relatórios.

Cada elemento possui propriedades elétricas e gráficas, que podem ser editadas através de formulários, que são exibidas ao selecionar e clicar duas vezes sobre o objeto a ser modificado.

Para manipular a rede criada foram desenvolvidas algumas ferramentas intuitivas e de fácil utilização, são elas: selecionar, mover, girar, arrastar, *zoom*, encaixar, desfazer, refazer, copiar, colar, e excluir. Tais ferramentas permitem a personalização, navegação e auxiliam a criação de redes elétricas de potência no *software* PSP-UFU.

C. Solução da rede elétrica criada

Após a criação do sistema elétrico pode-se solucionar o fluxo de carga e curto-circuito individualmente através do menu “Ferramentas”. Caso a ferramenta de solução instantânea esteja ativada, os cálculos de curto e fluxo de carga são realizados a cada modificação da rede, como acionamento de disjuntores e modificação dos parâmetros de um elemento.

As opções genéricas de curto-circuito e fluxo de carga são encontradas em um formulário acessado clicando em “Opções do projeto”, que permite editar a potência base do sistema, o ângulo do barramento de referência, o máximo de iterações que o método numérico poderá atingir e o erro para convergência do método selecionado.

V. SIMULAÇÃO E ANÁLISE

Com o intuito de validar os cálculos de curto-circuito desenvolvidos, comparou-se os resultados de um sistema de nove barras [6] gerados pelo PSP-UFU com o *software* PowerWorld Simulator [7].

O PowerWorld Simulator é um pacote de simulação computacional de sistemas elétricos de potência desenvolvido para analisar a operação de sistemas de alta tensão [8], como, por exemplo, o sistema de nove barras mostrado na Fig. 2 abaixo, cujos dados estão indicados na Tabela III.

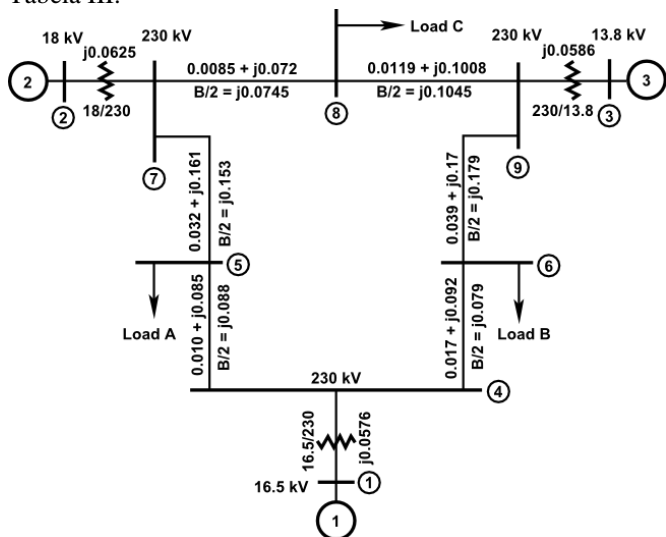


Fig. 2. Sistema de 9 barras com os dados de ramo na base de 100 MVA [6].

Tabela III - Dados dos geradores (valores das indutâncias em PU na base de 100 MVA) [6].

Gerador	1	2	3
MVA Nominal	247,5	192,0	128,0
kV	16,5	18,0	13,8
Fator de Potência	1,0	0,85	0,85
Tipo de turbina	hidráulica	vapor	vapor
Velocidade	180 rpm	3600 rpm	3600 rpm
X_d	0,146	0,8958	1,3125
X'_d	0,0608	0,1198	0,1813
X_q	0,0969	0,8645	1,2578
X'_q	0,0969	0,1969	0,25
X_l	0,0336	0,0521	0,0742
τ'_{do}	8,96 s	6,00 s	5,89 s
τ'_{q0}	0 s	0,535 s	0,6 s

A. Adequação do sistema para simulação

A simulação de curto-circuito no PSP-UFU e no PowerWorld necessitam das impedâncias de sequência do sistema, portanto, deve-se adequar os dados fornecidos.

As impedâncias de sequência negativa da rede de transmissão e de cargas estáticas são geralmente idênticas às impedâncias de sequência positiva [3].

Caso as tensões de sequência negativa sejam aplicadas nos terminais de uma máquina síncrona com o enrolamento de campo curto-circuitado e o rotor girando positivamente na velocidade síncrona, a corrente no estator enxerga a impedância de sequência negativa da máquina, definida como [4]:

$$X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2} \quad (8)$$

e

$$\begin{aligned} X''_d &= 0,85 X'_d \\ X''_q &= X'_q = X_q \end{aligned} \quad (9)$$

Onde:

- X_2 - Reatância de sequência negativa.
- X''_d - Reatância subtransitória de eixo direto
- X''_q - Reatância de subtransitória de eixo em quadratura.
- X'_d - Reatância transitória de eixo direto.
- X'_q - Reatância transitória de eixo em quadratura.
- X_q - Reatância em quadratura.

Nas linhas de transmissão, as correntes de sequência zero estão em fase, percorrendo através dos seus cabos e retornando através do neutro aterrado. Como resultado, as impedâncias de sequência zero das linhas são diferentes das demais sequências, geralmente maiores [3]. Para a análise desse caso será utilizada a seguinte aproximação:

$$Z_0 = 2,5 \cdot Z_1 \quad (10)$$

Onde:

- Z_0 - Impedância de sequência zero.
- Z_1 - Impedância de sequência positiva.

Se correntes de sequência zero são aplicadas no estator de uma máquina síncrona, não haverá campo girante, somente um campo pulsante estacionário. O campo pulsante irá se opor às correntes induzidas no rotor e um fluxo de entreferro muito pequeno será gerado. Portanto a reatância de sequência

zero é muito pequena e depende do espaçamento dos enrolamentos, variando de 0,15 a 0,6 vezes o valor de X_d'' [4]. Para as simulações foi utilizado o valor de $0,4 X_d''$. Para avaliar o programa, foi aplicado um curto-circuito fase-terra franco no barramento 6 do sistema da Fig. 3,

B. Simulação

Para a simulação foram utilizados transformadores com a conexão delta-estrela aterrado para simular todos os recursos implementados.

De posse dos dados, foi simulado o sistema nos dois softwares. Abaixo é exibido o circuito criado no PSP-UFU:

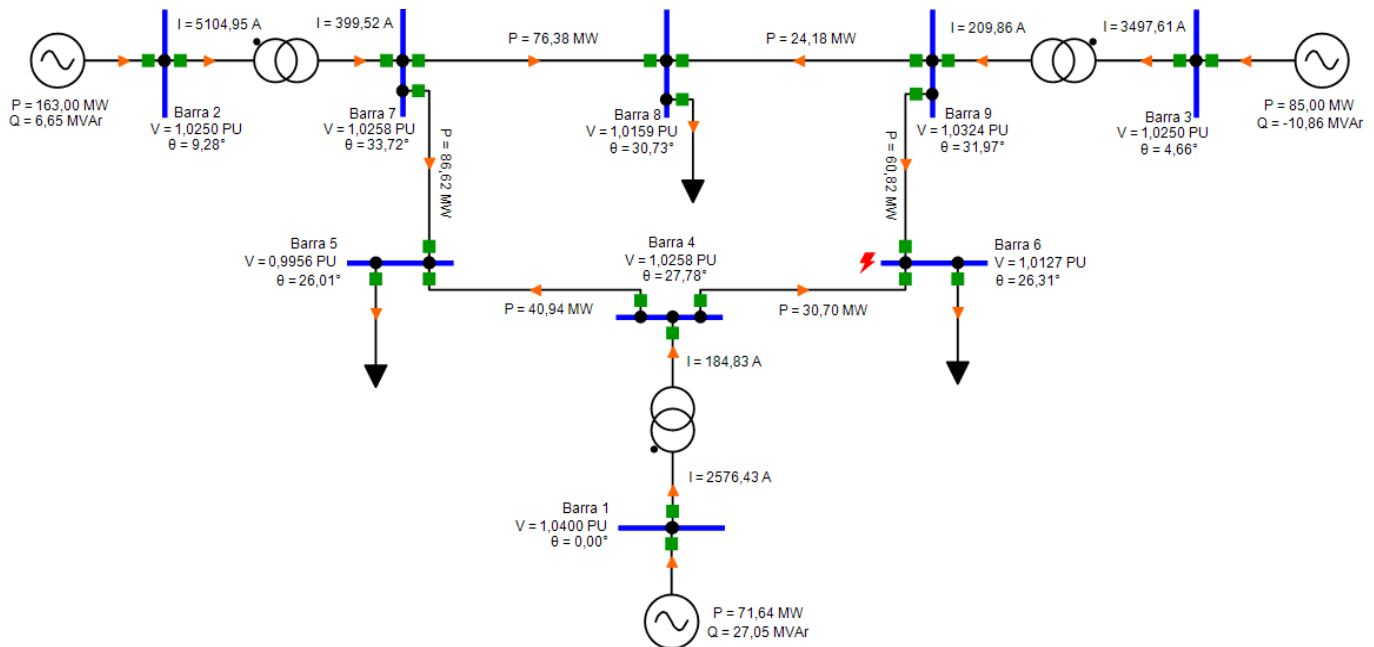


Fig. 3. Sistema de 9 barras simulado no PSP-UFU

O resultado das corrente de curto-circuito do PSP-UFU é mostrado da Tabela IV abaixo.

Tabela IV - Correntes de curto-circuito (em amperes) no PSP-UFU

Falta	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente	Ângulo	Corrente	Ângulo	Corrente	Ângulo
Barra 6	1770,3068	-50,97°	0,0000	0,00°	0,0000	0,00°

A diferença em relação ao PowerWorld da corrente de falta da fase A é de 0,0002%, ou seja, são praticamente idênticas. As tensões e ângulos durante a falta, calculados pelo PSP-UFU, são exibidos abaixo:

Tabela V - Tensões de curto-circuito (em PU) no PSP-UFU

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo
Barra 1	0,92850	-4,44°	0,94107	-114,87°	1,06663	119,79°
Barra 2	0,92640	6,77°	0,96228	-105,86°	1,04792	128,82°
Barra 3	0,86579	-0,83°	0,89852	-107,73°	1,05105	124,29°
Barra 4	0,64803	27,18°	1,03210	-88,25°	0,99872	144,22°
Barra 5	0,68584	26,61°	1,00433	-89,93°	0,96485	142,44°
Barra 6	0,00000	36,87°	1,14738	-99,64°	1,09406	153,69°
Barra 7	0,83303	35,43°	1,02555	-81,82°	0,99065	149,38°
Barra 8	0,77008	32,23°	1,01605	-84,53°	0,97831	146,23°
Barra 9	0,70685	33,18°	1,02956	-82,89°	0,99228	147,07°

As diferenças dos resultados da Tabela V com os resultados do PowerWorld estão indicadas na Tabela IV. As magnitudes das correntes e seus ângulos nos ramos do sistema, calculados pelo PSP-UFU, estão mostrados na Tabela VII.

Tabela VI - Diferença das tensões de curto-circuito calculadas pelo PSP-UFU em relação ao PowerWorld

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo	Tensão	Ângulo
Barra 1	0,0004%	0,0698%	0,0001%	0,0023%	0,0003%	0,0026%
Barra 2	0,0005%	0,0536%	0,0004%	0,0045%	0,0001%	0,0017%
Barra 3	0,0003%	0,0830%	0,0004%	0,0023%	0,0003%	0,0020%
Barra 4	0,0005%	0,0054%	0,0002%	0,0049%	0,0004%	0,0016%
Barra 5	0,0006%	0,0175%	0,0002%	0,0030%	0,0004%	0,0014%
Barra 6	0,0000%	0,0000%	0,0003%	0,0008%	0,0002%	0,0004%
Barra 7	0,0004%	0,0033%	0,0003%	0,0006%	0,0003%	0,0010%
Barra 8	0,0003%	0,0152%	0,0000%	0,0059%	0,0001%	0,0032%
Barra 9	0,0007%	0,0019%	0,0000%	0,0044%	0,0001%	0,0001%

Tabela VII - Correntes de curto-circuito (em amperes) nos ramos calculadas pelo PSP-UFU

Início	Fim	Fase A		Fase B		Fase C	
		Corr.	Âng.	Corr.	Âng.	Corr.	Âng.
Barra 1	Barra 4	9521,56	-52,96°	7237,12	137,12°	2710,46	99,17°
Barra 2	Barra 7	6508,58	-16,41°	3867,41	-143,72°	5177,71	127,13°
Barra 3	Barra 9	6215,69	-29,82°	3071,24	172,56°	3572,49	131,08°
Barra 4	Barra 5	91,58	104,62°	125,18	-98,26°	86,38	98,23°
Barra 4	Barra 6	1141,54	-52,14°	85,08	-64,59°	51,57	116,24°
Barra 4	Barra 1	1058,00	129,82°	201,58	95,27°	136,37	-75,06°
Barra 5	Barra 7	265,92	171,87°	193,23	77,04°	232,40	-46,25°
Barra 5	Barra 4	63,10	-81,07°	139,60	63,20°	121,05	-96,42°
Barra 6	Barra 9	676,27	138,99°	143,70	83,18°	139,03	-56,42°
Barra 6	Barra 4	1154,17	127,74°	73,94	85,04°	81,79	-88,88°
Barra 7	Barra 8	228,93	-7,27°	144,57	-88,74°	223,03	145,42°
Barra 7	Barra 5	233,22	2,95°	185,83	-79,39°	228,60	152,44°
Barra 7	Barra 2	460,31	177,89°	329,32	96,52°	450,78	-31,02°
Barra 8	Barra 7	249,68	167,54°	153,06	76,89°	227,55	-43,88°
Barra 8	Barra 9	110,05	-66,71°	104,55	78,43°	50,45	-112,64°
Barra 9	Barra 8	148,40	115,73°	101,82	-71,47°	9,62	159,40°
Barra 9	Barra 6	645,77	-40,24°	165,97	-61,31°	127,63	164,39°
Barra 9	Barra 3	513,79	146,52°	266,80	114,83°	137,21	-15,96°

As diferenças das magnitudes das correntes da Tabela VII com os resultados do PowerWorld estão mostrados da tabela VIII.

Tabela VIII - Diferença das correntes de curto-circuito nos ramos calculadas pelo PSP-UFU em relação ao PowerWorld

Origem		Fase A	Fase B Corrente	Fase C
Barra 1	Barra 4	0,0002%	0,0001%	0,0005%
Barra 2	Barra 7	0,0004%	0,0000%	0,0002%
Barra 3	Barra 9	0,0001%	0,0003%	0,0001%
Barra 4	Barra 1	0,0002%	0,0038%	0,0001%
Barra 4	Barra 5	0,0032%	0,0000%	0,0053%
Barra 4	Barra 6	0,0002%	0,0042%	0,0041%
Barra 5	Barra 4	0,0031%	0,0028%	0,0000%
Barra 5	Barra 7	0,0007%	0,0012%	0,0012%
Barra 6	Barra 4	0,0001%	0,0002%	0,0042%
Barra 6	Barra 9	0,0006%	0,0036%	0,0003%
Barra 7	Barra 5	0,0012%	0,0008%	0,0012%
Barra 7	Barra 8	0,0011%	0,0022%	0,0001%
Barra 7	Barra 2	0,0000%	0,0002%	0,0004%
Barra 8	Barra 9	0,0030%	0,0054%	0,0006%
Barra 8	Barra 7	0,0006%	0,0001%	0,0003%
Barra 9	Barra 6	0,0008%	0,0004%	0,0036%
Barra 9	Barra 3	0,0001%	0,0009%	0,0003%
Barra 9	Barra 8	0,0018%	0,0006%	0,0535%

Finalmente as Tabelas IX e X apresentam as contribuições dos geradores calculadas pelo PSP-UFU e a diferença percentual com os mesmos resultados no PowerWorld, respectivamente:

Tabela IX - Contribuições dos geradores na corrente de curto-circuito (em amperes) calculadas pelo PSP-UFU

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente	Ângulo	Corrente	Ângulo	Corrente	Ângulo
Gerador 1	9521,56	-52,96°	7237,12	137,12°	2710,46	99,17°
Gerador 2	6508,58	-16,41°	3867,42	-143,72°	5177,71	127,13°
Gerador 3	6215,69	-29,82°	3071,24	172,56°	3572,49	131,08°

Tabela X - Diferença das contribuições dos geradores na corrente de curto-circuito calculadas pelo PSP-UFU em relação ao PowerWorld

Nome	Fase A		Fase B		Fase C	
	Cor.	Âng.	Cor.	Âng.	Cor.	Âng.
Gerador 1	0,0002%	0,0053%	0,0001%	0,0009%	0,0005%	0,0018%
Gerador 2	0,0003%	0,0260%	0,0002%	0,0013%	0,0000%	0,0036%
Gerador 3	0,0001%	0,0110%	0,0003%	0,0006%	0,0001%	0,0010%

VI. CONCLUSÕES

Este artigo demonstrou que o procedimento de cálculo de curto-circuito implementado no PSP-UFU produziu resultados praticamente idênticos àqueles obtidos com o *software* PowerWorld Simulator. Além disso, foi mostrado que esse *software* proporciona, de forma fácil e intuitiva, ferramentas gráficas para construção de redes elétricas de potência genéricas.

Com a concretização de mais essa etapa de implementação computacional no PSP-UFU, chegou-se em uma ferramenta de simulação bastante versátil que inclui, na sua última versão, o cálculo de correntes de curto-circuito, além de continuar realizando estudos de fluxo de carga e análises dinâmicas de sistemas elétricos de potência. A versão atual do *software* poderá então ser utilizada por alunos e professores dos cursos de Engenharia Elétrica que atuam na área de sistemas de potência bem como por profissionais do setor de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- [1] GUIMARÃES G. C. “Manual do TransUFU: Programa de Análise de Estabilidade Transitória da UFU”, Universidade Federal de Uberlândia, 2000.
- [2] WXWIDGETS. “wxWidgets: Cross-Platform GUI Library”. Acedido em 05 de Maio de 2015, em: <http://www.wxwidgets.org>.
- [3] ARRILLAGA J.; WATSON N. R. “Computer Modelling of electrical power systems”. England: John Wiley & Sons, 2001.
- [4] ANDERSON P. M. “Analysis of faulted power systems”. New York: IEEE Press, 1995.
- [5] STEVENSON JR.; WILLIAN D. “Elementos de Análise de Sistemas de Potência”. 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [6] ANDERSON P. M.; FOUAD A. A. “Power System Control and Stability”. New York: IEEE Press, 1994.
- [7] POWERWORLD SIMULATOR. Versão 18. Educational License. United States: PowerWorld Corporation.
- [8] POWERWORLD CORPORATION. “PowerWorld Simulator overview”. Acedido em 05 de Maio de 2015, em: <http://www.powerworld.com/products/simulator/overview>.