

O *software* PSP-UFU, plataforma gráfica e gratuita para estudos de fluxo de carga, curto-circuito e análise dinâmica de sistemas elétricos de potência

Thales Lima Oliveira, Geraldo Caixeta Guimarães, Márcio Augusto Tamashiro, Raul Vitor Arantes Monteiro, Leonardo Rosenthal Caetano Silva, Arthur Costa de Souza
Universidade Federal de Uberlândia – UFU – FEELT – Uberlândia, Brasil
thaleslima.ufu@gmail.com

Resumo—Este artigo apresenta a análise criteriosa do *software* PSP-UFU (Plataforma de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Uberlândia), desenvolvido para o cálculo de fluxo de carga, cálculo de curto-circuito e análise dinâmica de qualquer sistema de potência. A interface gráfica criada permite a construção de qualquer rede elétrica por meio da manipulação de elementos visuais. Foram realizadas simulações de alguns sistemas testes no PSP-UFU e os resultados comparados com os programas ANAREDE, para os casos de fluxo de carga, e ANAFAS, para curto-circuito. Na análise dinâmica são aplicados diversos tipos de distúrbios e observado o comportamento da rede. É importante destacar que o PSP-UFU é um programa gratuito de código fonte aberto, possibilitando a criação de novas ferramentas.

Palavras chave— Plataforma de Sistemas de Potência, interface gráfica de usuário, código aberto, análise de sistemas de potência.

I. INTRODUÇÃO

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

O avanço tecnológico de *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 usuário por meio 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 que além de gratuito possua 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 desenvolveu-se uma plataforma de análises de sistemas elétricos de potência, capaz de realizar as seguintes funções: estudo de fluxo de carga, cálculo de curto-circuito (balanceado e desbalanceado) e análise dinâmica, a qual é realizada em conjunto com o programa existente 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 por meio das várias ferramentas gráficas.

O papel do programa nos estudos dinâmicos é gerar, por intermédio do circuito elétrico criado na GUI, o arquivo de dados de entrada do TransUFU, executá-lo e capturar seus resultados que são apresentados em forma de gráficos.

Com o intuito de validar as ferramentas de cálculo criadas, foram realizadas simulações de alguns sistemas testes no PSP-UFU e os resultados comparados com os programas ANAREDE [2], para os casos de fluxo de carga, e ANAFAS [3], para curto-circuito. Na análise dinâmica são apresentados seus resultados sem uma análise comparativa, pois a solução para esse tipo de estudo é obtida por meio do TransUFU que é um *software* já consolidado [4].

O ANAREDE (Análise de Redes Elétricas) é o programa computacional mais utilizado no Brasil na área de Sistemas Elétricos de Potência [5]. É um *software* desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) e consiste na união de uma série de aplicações com várias funções e dentre elas está presente o fluxo de carga [5], [6]. Na última versão do programa é possível construir a rede elétrica de potência por meio de uma interface gráfica.

Assim como o ANAREDE, o ANAFAS (Análise de Falhas Simultâneas) foi desenvolvido pelo CEPEL e tem como função a análise de falhas em sistemas elétricos de qualquer porte, permitindo a modelagem fiel do sistema e a simulação de diversos tipos de defeito, dentre eles o curto-circuito [7].

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

O programa PSP-UFU possui três grandes funcionalidades: **(a)** cálculo do fluxo de carga; **(b)** cálculo de curto-circuito (balanceado e desbalanceado); **(c)** análise dinâmica em conjunto com o programa TransUFU.

- (a)** O fluxo de carga consiste na determinação das tensões de barras e potência nos ramos sob condições reais ou ideais de operação normal do sistema elétrico. Esses estudos são fundamentais para planejar a expansão do sistema, uma vez que a operação satisfatória desse sistema depende do conhecimento dos efeitos da interligação com outros sistemas, de novas cargas, de novas centrais geradoras e de novas linhas antes que elas sejam instaladas [8]. Como é necessário um método de solução numérica para resolver o sistema, desenvolveu-se dois deles: Gauss-Seidel e Newton-Raphson, e cabe ao usuário a escolha da técnica a ser utilizada nos cálculos.
- (b)** As faltas podem ser muito prejudiciais a um sistema de potência. 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 [9]. Com o cálculo de curto-circuito do PSP-UFU também é possível determinar o nível de curto-circuito em todos os barramentos do sistema criado.
- (c)** O programa TransUFU fornece a resposta dinâmica de um sistema elétrico de potência face a dois distúrbios: chaveamentos e faltas [1]. Esse comportamento do circuito é utilizado nos estudos de estabilidade transitória do sistema. O papel do PSP-UFU é interpretar o circuito gráfico criado pelo usuário para gerar o cartão de entrada de dados do TransUFU e então executá-lo. Ao fim dos cálculos, o usuário poderá abrir os dados de saída por meio de gráficos no tempo que são gerados pelo TransUFU. Esses dados de entrada são inseridos em formulários, assim como é feito nos outros estudos.

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 [10].

São inúmeros os motivos da escolha do C++, podendo citar os seguintes: 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 [10]. 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 e ainda existe a possibilidade de criar uma aplicação para Mac em versões futuras.

O *software* possui um manual de usuário que pode acessado em qualquer computador que tenha um navegador de internet, além da documentação de todo o código, uma vez que o PSP-UFU foi criado com o intuito de que qualquer programador possa desenvolver novas ferramentas.

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 padrão *Ribbon* “Arquivos”. Após a criação do novo projeto será possível adicionar os elementos de uma rede elétrica. A Figura 1 apresenta a tela principal do programa.

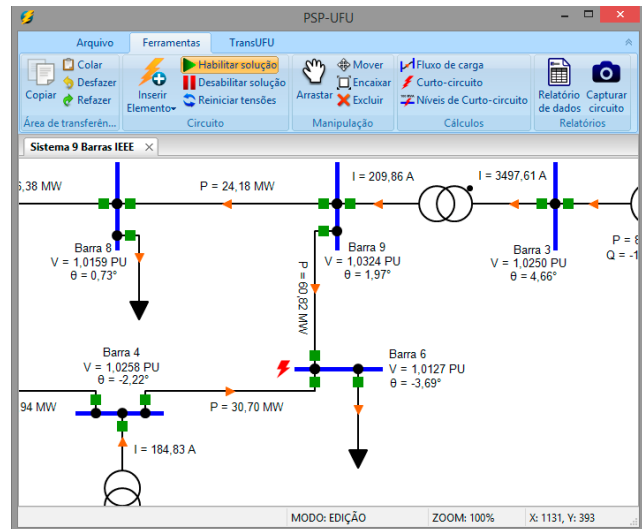


Figura 1. Tela principal do programa PSP-UFU no sistema operacional Windows.

Os elementos elétricos atualmente presentes no *software* são: barramento, gerador, transformador (onde é possível selecionar o TAP, defasagem e a sua ligação), linha de transmissão, carga (potência e impedância constantes), compensador síncrono, capacitor shunt, reator shunt e motor de indução. Esses componentes, com exceção dos barramentos, são conectados em uma ou entre duas barras (linha de transmissão e transformadores), e poderão ser inseridos por meio de um menu *Ribbon*, um menu de contexto ou por teclas de atalho referentes a cada objeto.

Também foram criados dois elementos de texto: um permanente, que pode ser inserido na rede criada para obter alguns dados de forma rápida ou destacá-los em relatórios; e um elemento de texto temporário, que exibe alguns resultados na área de trabalho ao permanecer com o ponteiro do mouse sobre um elemento durante alguns segundos.

Cada elemento possui propriedades elétricas e gráficas, que podem ser editadas em 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 circuito pode-se solucionar o fluxo de carga e curto-circuito individualmente pelo menu “Ferramentas”, a análise dinâmica é realizada por meio do menu “TransUFU”. 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 no menu “Opções do projeto”, o qual pode-se 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, etc. Para a análise dinâmica utiliza-se o menu “Opções do TransUFU”, onde está presente todas as opções do mesmo.

III. SISTEMAS TESTE

Para a análise das ferramentas de fluxo de carga e curto-circuito foram realizadas simulações nos sistemas teste do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) de 14 e 118 barras [11]. No sistema de 14 barras foram realizados estudos mais detalhados, exibindo o resultado em todos os barramentos e a execução da análise dinâmica, enquanto no sistema de 118 barras são apresentadas análises mais simplificadas com a intenção de atestar a eficácia do PSP-UFU mesmo em redes com números maiores de barras.

As Figuras 2 e 3 mostram os sistemas teste de 14 e 118 barras, respectivamente, criados no PSP-UFU.

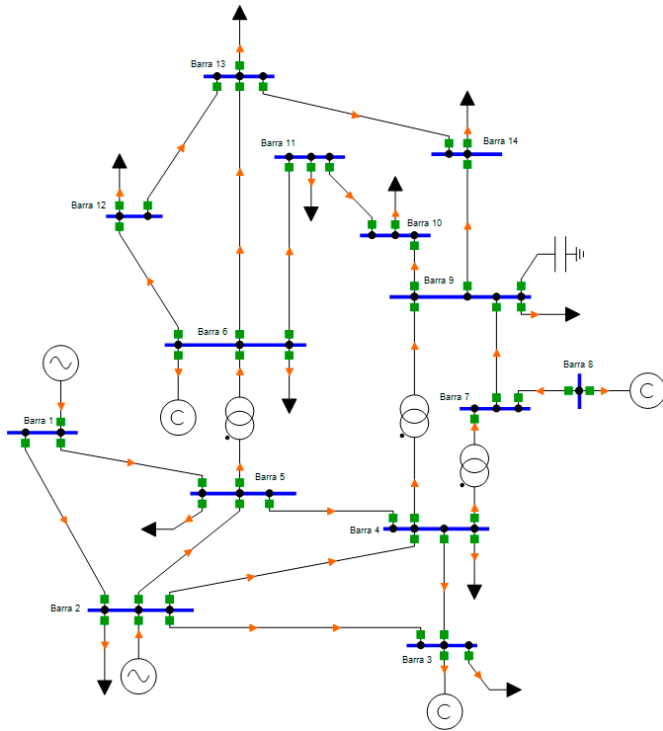


Figura 2. Sistema de 14 barras criado no PSP-UFU.

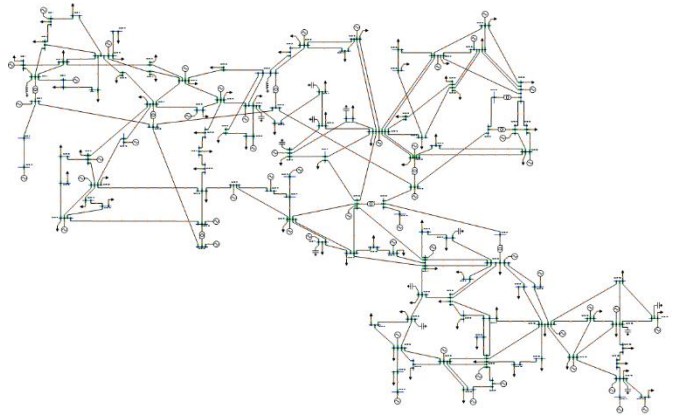


Figura 3. Sistema teste de 118 barras criado no PSP-UFU.

Para as constantes das máquinas síncronas e compensadores síncronos utilizou-se a Tabela 1:

Tabela 1. Constantes típicas de máquinas síncronas [12].

	Turbo-Geradores			Geradores Hidráulicos			Compensadores Síncronos		
	Min.	Médio	Máx.	Min.	Médio	Máx.	Min.	Médio	Máx.
Reatâncias (p.u.)									
x_d	0,95	1,10	1,45	0,60	1,15	1,45	1,50	1,80	2,20
x_q	0,92	1,08	1,42	0,40	0,75	1,00	0,95	1,15	1,40
x'_d	0,12	0,23	0,28	0,20	0,37	0,50	0,30	0,40	0,60
x'_q	0,12	0,23	0,28	0,40	0,75	1,00	0,95	1,15	1,40
x''_d	0,07	0,12	0,17	0,13	0,24	0,35	0,18	0,30	0,43
x''_q	0,10	0,15	0,20	0,23	0,34	0,45	0,23	0,30	0,43
x_p	0,07	0,14	0,21	0,17	0,32	0,40	0,23	0,34	0,45
x_2	0,07	0,12	0,17	0,13	0,24	0,35	0,17	0,24	0,37
x_0	0,01		0,10	0,02		0,21	0,03		0,15
Resistências (p.u.)									
r_a	0,0015		0,005	0,003		0,20	0,002		0,015
r_2	0,025		0,045	0,012		0,20	0,025		0,07
Constantes de tempo (s)									
T'_{d0}	2,8	5,6	9,2	1,5	5,6	9,5	6,0	9,0	11,5
T'_d	0,4	1,1	1,8	0,5	1,8	3,3	1,2	2,0	2,8
$T''_d = T''_q$	0,02	0,035	0,05	0,01	0,035	0,05	0,02	0,035	0,05
T_d	0,04	0,16	0,35	0,03	0,15	0,25	0,1	0,17	0,3

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

As impedâncias de sequência negativa da rede de transmissão, de cargas estáticas e geradores são idênticas às impedâncias de sequência positiva. Nas linhas de transmissão, as correntes de sequência zero estão em fase, percorrendo pelos cabos e retornando no neutro aterrado. Como resultado, as impedâncias de sequência zero das linhas são diferentes das demais sequências, geralmente maiores [9]. Para a análise desse caso utilizou-se a seguinte aproximação: $Z_0 = 2,5Z_1$.

IV. ESTUDO DE FLUXO DE CARGA

Para o estudo de fluxo de carga foram construídos os sistemas de 14 e 118 barras tanto no PSP-UFU quanto no ANAREDE.

A. Sistema teste de 14 barras

Os resultados referentes aos dados de barras calculados pelo PSP-UFU são mostrados na Tabela 2:

Tabela 2. Resultados de barras do cálculo de fluxo de carga realizado pelo PSP-UFU.

Nome	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração ativa (MW)	Geração reativa (MVar)	Carga ativa (MW)	Carga reativa (MVar)
Barra 1	1,060000	0,00000	232,3923	-16,54917	0,00000	0,00000
Barra 2	1,045000	-4,98257	40,00000	43,55680	21,70000	12,70000
Barra 3	1,010000	-12,72506	0,00000	25,07527	94,20000	19,00000
Barra 4	1,017671	-10,31286	0,00000	0,00000	47,80000	-3,90000
Barra 5	1,019514	-8,77381	0,00000	0,00000	7,60000	1,60000
Barra 6	1,070000	-14,22088	0,00000	12,73091	11,20000	7,50000
Barra 7	1,061520	-13,35956	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Barra 8	1,090000	-13,35956	0,00000	17,62343	0,00000	0,00000
Barra 9	1,055932	-14,93845	0,00000	0,00000	29,50000	16,60000
Barra 10	1,050985	-15,09721	0,00000	0,00000	9,00000	5,80000
Barra 11	1,056907	-14,79055	0,00000	0,00000	3,50000	1,80000
Barra 12	1,055189	-15,07551	0,00000	0,00000	6,10000	1,60000
Barra 13	1,050382	-15,15620	0,00000	0,00000	13,50000	5,80000
Barra 14	1,035530	-16,03357	0,00000	0,00000	14,90000	5,00000

As diferenças relativas dos resultados apresentados pelo PSP-UFU e o ANAREDE são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3. Divergência dos resultados dos programas PSP-UFU e ANAREDE.

Nome	Tensão	Ângulo	Geração ativa	Geração reativa	Carga ativa	Carga reativa
Barra 1	0,0000%	0,0000%	0,0010%	0,0050%	0,0000%	0,0000%
Barra 2	0,0000%	0,0435%	0,0000%	0,0005%	0,0000%	0,0000%
Barra 3	0,0000%	0,0026%	0,0000%	0,0011%	0,0000%	0,0000%
Barra 4	0,0323%	0,0037%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 5	0,0476%	0,0209%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 6	0,0000%	0,0005%	0,0000%	0,0007%	0,0000%	0,0000%
Barra 7	0,0452%	0,0136%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 8	0,0000%	0,0136%	0,0000%	0,0024%	0,0000%	0,0000%
Barra 9	0,0064%	0,0096%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 10	0,0014%	0,0015%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 11	0,0088%	0,0170%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 12	0,0179%	0,0066%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 13	0,0364%	0,0097%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%
Barra 14	0,0454%	0,0138%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

Por meio das tabelas apresentadas nota-se que os programas apresentaram resultados de barras praticamente idênticos, com a maior divergência de 0,0476%. Esse erro relativo é originado principalmente da diferença no número de casas decimais dos resultados de saída.

B. Sistema teste de 118 barras

As mesmas análises foram realizadas para esse caso, o qual apresentou uma divergência máxima de 0,1254%. Esse erro, apesar de maior comparado àquele do sistema de 14 barras, é bastante pequeno e originado de valores que estão próximos a zero.

V. ESTUDO DE CURTO-CIRCUITO

Assim como no fluxo de carga, nessa análise foram criados os sistemas testes de 14 e 118 barras.

Para a realização do cálculo de curto-circuito no ANAFAS são necessários os dados da rede em sua situação pré-falta, ou

seja, é exigido o resultado do fluxo de carga. Para isso foi utilizada a solução do ANAREDE.

A. Sistema teste de 14 barras

Os resultados das correntes curto-circuito para diversos tipos de faltas (todas sem impedância de falta) na barra 6 são apresentados nas tabelas abaixo:

Tabela 4. Correntes de curto-circuito trifásico do sistema de 14 barras calculadas pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)
PSP-UFU	1935,356	-89,5	1935,356	150,5	1935,356	30,5
ANAFAS	1935,337	-89,5	1935,337	150,5	1935,337	30,5
Erro (%)	0,0010%	0,0000%	0,0010%	0,0000%	0,0010%	0,0000%

Tabela 5. Correntes de curto-circuito fase-fase (fases B-C) do sistema de 14 barras calculadas pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)
PSP-UFU	0,000	0,0	1676,068	-179,5	1676,068	0,5
ANAFAS	0,000	0,0	1676,073	-179,5	1676,073	0,5
Erro (%)	0,0000%	0,0000%	0,0003%	0,0000%	0,0003%	0,0000%

Tabela 6. Correntes de curto-circuito fase-fase-terra (fases B-C) do sistema de 14 barras calculadas pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)
PSP-UFU	0,000	0,0	2001,322	142,1	2174,894	35,4
ANAFAS	0,000	0,0	2001,314	142,1	2174,895	35,4
Erro (%)	0,0000%	0,0000%	0,0004%	0,0000%	0,0001%	0,0000%

Tabela 7. Correntes de curto-circuito fase-terra (fase A) do sistema de 14 barras calculadas pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)
PSP-UFU	2182,542	-91,7	0,000	0,0	0,000	0,0
ANAFAS	2182,551	-91,7	0,000	0,0	0,000	0,0
Erro (%)	0,0004%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%	0,0000%

Os resultados são bastante próximos, com uma divergência máxima de 0,001%.

A maior divergência encontrada nas tensões durante o curto-circuito para todos os tipos de faltas supracitadas possui o valor de 0,48% e pode ser considerado baixo, pois origina na comparação de valores pequenos.

B. Sistema teste de 118 barras

Para o sistema teste de 118 barras foi aplicado um curto-circuito trifásico na barra 69 sem impedância de falta. Os resultados comparativos das correntes de curto são apresentados na Tabela 8:

Tabela 8. Corrente de curto-circuito trifásico de 118 barras calculadas pelos programas PSP-UFU e ANAFAS.

	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)	Corrente (A)	Ângulo (graus)
PSP-UFU	9648,312	-68,8	9648,312	171,2	9648,312	51,2
ANAFAS	9648,485	-68,8	9648,485	171,2	9648,485	51,2
Erro (%)	0,0018%	0,0000%	0,0018%	0,0000%	0,0018%	0,0000%

Observa-se que o maior erro obtido foi de 0,0018%, ou seja, os resultados são praticamente idênticos.

A maior divergência nas tensões durante a falta para esse sistema foi de 0,0966%.

VI. ANÁLISE DINÂMICA

Na análise dinâmica do sistema serão expostos os gráficos para três tipos de distúrbios: curto-circuito trifásico, perda de carga e perda de geração.

Não serão comparados os resultados com outro *software*, uma vez que o TransUFU já é consolidado e deve ser atestado somente a correta integração com o PSP-UFU.

A. Curto-circuito trifásico

O curto-circuito foi aplicado na barra 6 no instante de 1 segundo durante 100 ms. A Figura 4 mostra as tensões terminais de todas as máquinas síncronas do sistema.

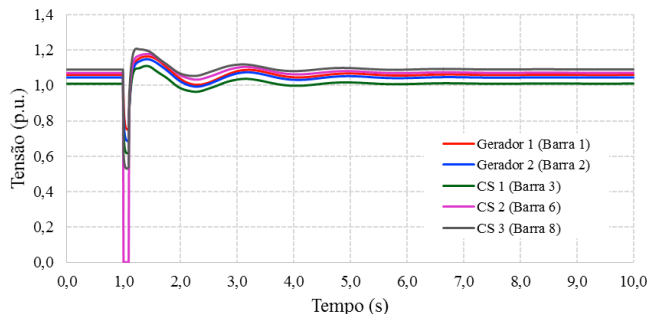


Figura 4. Tensão terminal das máquinas síncronas durante o curto-circuito.

Observam-se os afundamentos das tensões nos barramentos durante a permanência do curto-circuito, os quais destaca-se a tensão da barra 6 que se apresentou como o caso mais grave por ser o local do curto.

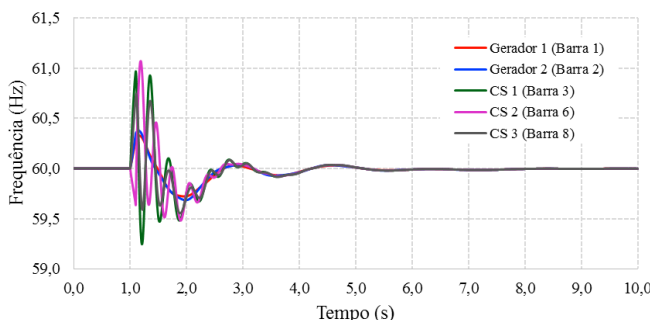


Figura 5. Frequência nos terminais das máquinas síncronas durante o curto-circuito.

A Figura 5 apresenta o comportamento da frequência das máquinas síncronas frente ao curto-circuito. Nota-se que a frequência oscila e retorna ao seu valor original, pois não há divergência na relação geração/carga após a perturbação.

As Figuras 6 e 7 representam o comportamento dinâmico da potência ativa e reativa, respectivamente, das máquinas síncronas. Os gráficos mostram comportamento típico para a perturbação aplicada.

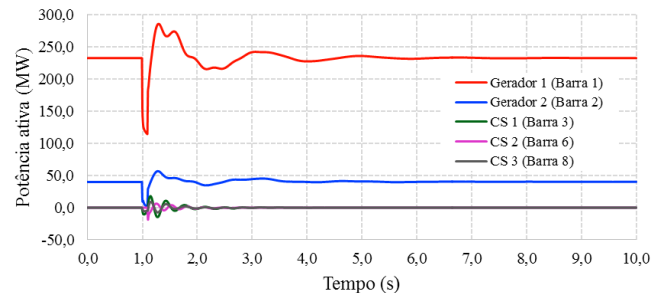


Figura 6. Potência ativa das máquinas síncronas durante o curto-circuito.

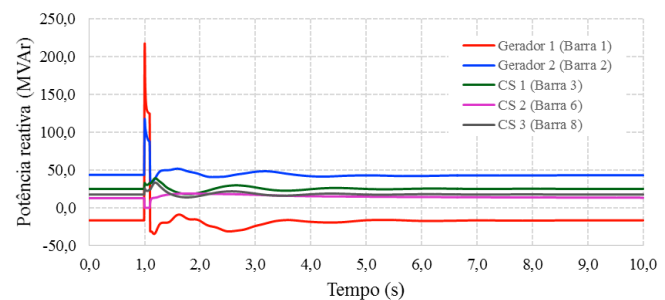


Figura 7. Potência reativa das máquinas síncronas durante o curto-circuito.

B. Perda de carga

Para essa perturbação foi removida a carga de 47,8 –j3,9 MVA da barra 4.

A perda de carga leva a aceleração das máquinas do sistema e consequentemente a elevação da frequência, como mostra a Figura 8.

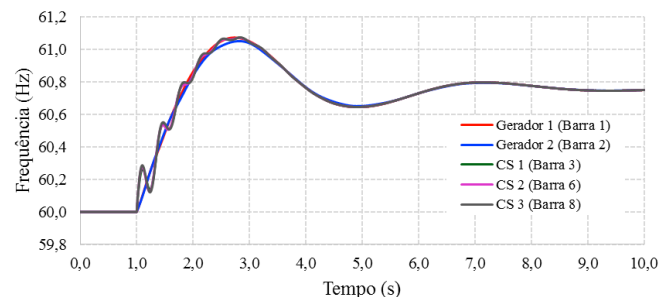


Figura 8. Frequência das máquinas síncronas na perda de carga.

Como não existe controle secundário nos reguladores de velocidade dos geradores a frequência não retorna para seu valor original.

As potências ativa e reativa das máquinas síncronas são apresentadas pelas Figuras 9 e 10, respectivamente.

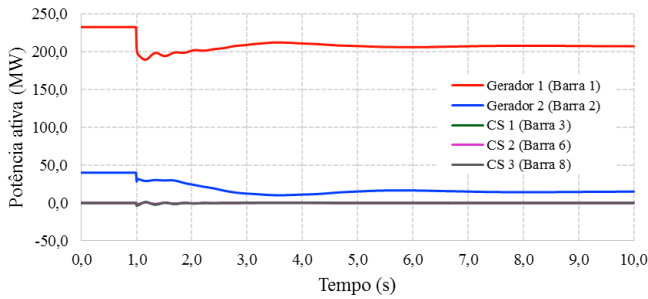


Figura 9. Potência ativa das máquinas síncronas na perda de carga.

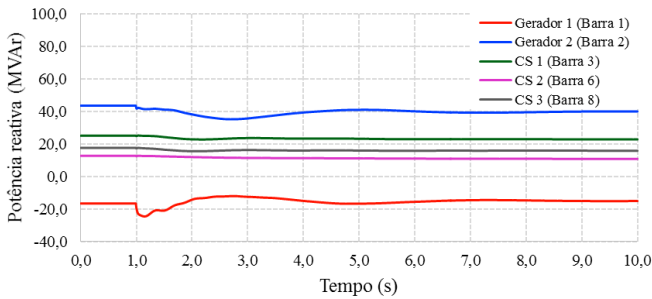


Figura 10. Potência reativa das máquinas síncronas na perda de carga.

C. Perda de geração

Para esse caso será removido o gerador 2 no instante de 1s.

De forma análoga à perda de carga, a perda de geração desacelera as máquinas que diminuem a frequência do sistema. A Figura 11 evidencia esse efeito.

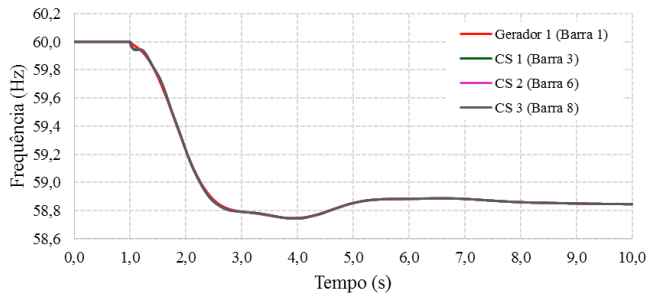


Figura 11. Frequência das máquinas síncronas na perda de geração.

Novamente a ausência de um controle secundário de velocidade impossibilita a frequência de retornar para 60 Hz.

A potência ativa é evidenciada na Figura 12:

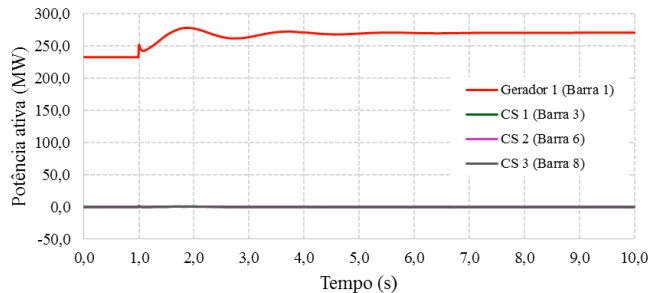


Figura 12. Potência ativa das máquinas síncronas na perda de geração.

VII. CONCLUSÕES.

Os resultados de fluxo de carga e curto-circuito no PSP-UFU do sistema teste de 14 barras apresentaram divergências mínimas com os programas da CEPEL, com erros relativos próximos a zero, atestando a correta operação dos algoritmos de cálculo desenvolvidos. Também obteve-se a mesma conclusão para o sistema teste de 118 barras, confirmando a eficácia do *software* para sistemas com um maior número de barramentos.

Para a análise dinâmica foram aplicados alguns distúrbios e observado o comportamento das máquinas síncronas da rede para cada um deles. Os resultados obtidos decorreram de forma conforme com a literatura, comprovando, assim, a integração adequada do PSP-UFU com o TransUFU.

Finalmente, ressalta-se que o PSP-UFU tem grande potencial para criação de novas ferramentas já que utiliza uma linguagem de programação de fácil compreensão (C++) com um vasto suporte, além de ser gratuito e possuir código fonte aberto.

REFERÊNCIAS

- [1] GUIMARÃES G. C. Manual do TransUFU: **Programa de Análise de Estabilidade Transitória da UFU**. Uberlândia, 2000.
- [2] CEPEL. **ANAREDE, versão 10.00.02**. Licença acadêmica. Rio de Janeiro, 2015.
- [3] CEPEL. **ANAFAS, versão 6.5.1**. Licença acadêmica. Rio de Janeiro, 2014. Foz do Iguaçu.
- [4] TAMASHIRO, M. A.; PERES, L. M.; PICCINI A. R.; RESENDE J. O. GUIMARÃES G. C.. **Avaliação de Programas Gratuitos para Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas Elétricos de Potência**. V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, Foz do Iguaçu, 2014.
- [5] CEPEL. **Programa ANAREDE - Análise de Redes Elétricas: Conheça o Programa**. Disponível em <<http://www.anarede.cepel.br/cprog.html>>. Acesso: 13 nov. 2015.
- [6] CEPEL. **Programa de Análise de Redes: Manual do Usuário**. Rio de Janeiro, 2015. 344p.
- [7] CEPEL. **Programa de Análise de Falhas simultâneas: Manual do Usuário**. Rio de Janeiro, 2014. 175p.
- [8] STEVENSON JR.; WILLIAN D.. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- [9] ARRILLAGA, J.; WATSON N. R.. **Computer Modelling of Electrical Power System**. 2ª ed. London: John Wiley & Sons, 2001.
- [10] WXWIDGETS. **wxWidgets: Cross-Platform GUI Library**. Disponível em <<http://www.wxwidgets.org/>>. Acesso: 20 out. 2015.
- [11] CHRISTIE, R. D. **Power System Test Case Archive**. Disponível em <<https://www.ee.washington.edu/research/pstca/>>. Acesso: 13 nov. 2015.
- [12] KIMBARK, E. W.. **Power System Stability: Synchronous Machines**. New York: John Wiley and Sons, 1956. v.3.