

## **ESTUDOS DE FLUXO DE CARGA, CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO E ANÁLISE DINÂMICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

**Guilherme de Azevedo Borges**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia – Goiás

**Alana da Silva Magalhães**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia – Goiás

### **1 INTRODUÇÃO**

O estudo de fluxo de carga ou potência em sistemas elétricos é essencial para projetar a infraestrutura e prever as tensões, correntes e potências necessárias. A norma IEEE Std 3002.2 de 2018 (IEEE, 2018) permite simular situações que dificilmente poderiam ser testadas com segurança no mundo real. Além disso, esse tipo de análise possibilita identificar problemas relacionados à perda do sistema, carregamento de novos equipamentos e outras ocorrências. Uma delas é a ocorrência de faltas nos sistemas elétricos que resultam em grandes variações nas correntes e na tensão da rede trifásica. Assim, análises dinâmicas permitem estudar curtos-circuitos nesses sistemas enquanto as análises estatísticas focam-se no fluxo de carga. Essa discussão é baseada em normais técnicas padronizadas para obter um embasamento teórico confiável para os procedimentos usados nos estudos acadêmicos sobre esse tema importante da engenharia elétrica.

Andrade (2014) destaca a importância do estudo de proteção em sistemas elétricos para garantir que os dispositivos da subestação atuem corretamente. Souza (2018), por sua vez, defende que é necessário realizar simulações computacionais para avaliar se o sistema é estável e determinar limites de potência reativa nas linhas de transmissão. Para isso, diversos softwares podem ser utilizados, pois cada um fornece informações diferentes sobre o mesmo circuito. Assim, somente com a combinação dos resultados obtidos por vários programas é possível ter uma análise completa da rede elétrica.

Munhoz, Castillo e Montero (1998) destacam a motivação da utilização de softwares para análises em sistemas elétricos. O usuário é capaz de realizar diagnósticos e soluções com mais precisão se as características forem fiéis. Arend, Ney e Bernardon (2017) mostram como mudar uma região crítica para outra menos instável por meio do uso desses softwares. Guarini et al. (2007) reforçam a necessidade de estudos em Sistemas Elétricos de Potência devido à expansão desse setor no Brasil que



exige simulações para prevenir blecautes. Softwares auxiliam na obtenção dos melhores resultados nesses processos.

O fluxo de carga é uma ferramenta importante para determinar o estado da rede e distribuição de potência. Estudos podem ser realizados para avaliar como o sistema se comportaria em casos específicos, melhorando os perfis de tensão e corrente. Passos Filho (2000) afirma que modelagens mais práticas são possíveis através dos resultados obtidos com a análise do fluxo de potência. Isso permite que soluções exclusivas sejam desenvolvidas para cada situação, auxiliando no planejamento e operação desses sistemas elétricos complexos.

Antes da década de 70, os estudos de fluxo de potência geravam superdimensionamento dos sistemas elétricos devido à falta de ferramentas matemáticas precisas. Com o aumento dessas solicitações, os limites do sistema eram atingidos e havia um grande aumento nas perdas. Jastale (2020) utiliza o fluxo para analisar previamente esses possíveis limites, enquanto Gomes (2018) observa as tensões e correntes em casos de curto-circuito. Oliveira (2010), por sua vez, destaca que apesar da menor incidência desse tipo específico de curto-circuito na rede elétrica, seu impacto é significativo e exige um dimensionamento adequado dessa rede e suas proteções com a análise trifásica.

Rosentino (2010) e Mariano (2017) apontam a necessidade de avaliar as correntes de falta, bem como as solicitações térmicas e dinâmicas para o dimensionamento adequado das redes. Bourges et al. (2012) destacam a importância da localização dos pontos mais críticos em um SEP mediante faltas, pois regiões distantes das unidades geradoras podem ser afetadas pela instabilidade de tensão e corrente. Assim, é importante analisar comportamentos do sistema para manter sua estabilidade e realizar mudanças/melhorias quando necessário.

## **2 OBJETIVO**

O presente estudo visa analisar o uso de softwares para realizar os estudos de fluxo de carga, curto-circuito trifásico e análise dinâmica em sistemas elétricos de potência. O Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro é responsável por conduzir a energia gerada principalmente por usinas hidrelétricas até consumidores corporativos e residências, mas pode sofrer diversos tipos de variações na corrente, resultando em falta na rede. Assim, a simulação dessas falhas com medidas preventivas seria benéfica para toda a sociedade. Os objetivos gerais da pesquisa são: i) realizar os estudos do fluxo da carga; ii) avaliar as consequências do curto-circuito trifásico; iii) executar análises dinâmicas nos sistemas elétricos de potência e iv) comparativo dos resultados obtidos pelos diferentes softwares utilizados. Já entre os específicos destacam-se: i) apresentação da modelagem dos principais equipamentos necessários à gestão desse problema; ii) fundamentação teórica desses estudos e iii) comparação dos dados obtidos mediante uma falta trifásica no sistema elétrico. Dessa forma, é possível evitar o colapso nas redes industriais bem como fornecimento irregular à população.

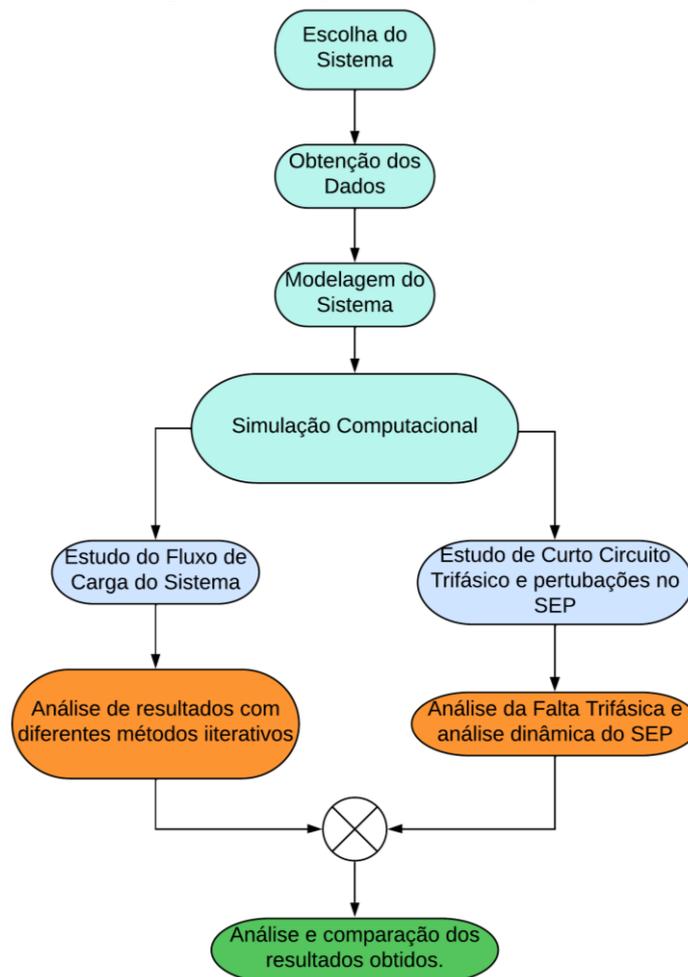
---



### 3 METODOLOGIA

Realizando a utilização de softwares, apresentadas as etapas para realização dos estudos de: i) fluxo de carga; ii) curto-circuito trifásico; e iii) análise dinâmica do SEP. As seções a seguir irão apresentar detalhadamente desde a escolha do sistema à análise dos resultados. A Figura 1 apresenta o conjunto de passos e/ou processos empregados durante a realização do trabalho.

**Figura 1:** Fluxograma da Metodologia.



O modelo é constituído por um conjunto de: i) nove barras; ii) seis linhas de transmissão; iii) três transformadores de potência; iv) três centros de geração de energia; e v) três centros de carga.

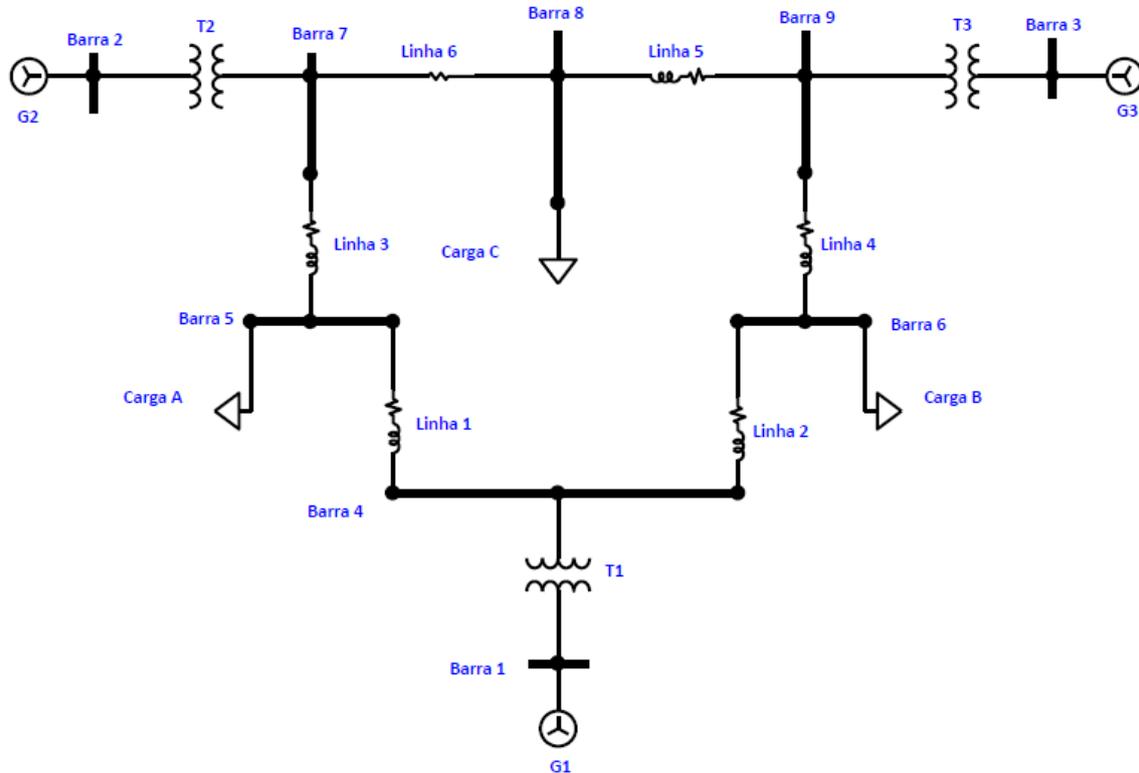
O critério de escolha do sistema baseou-se pela aplicabilidade dos conceitos de análise de SEP's, como os estudos já mencionados. A complexidade do sistema, garante a avaliação de todos os componentes que compõem um tipo de rede que possui os três aspectos fundamentais de um sistema, sendo: i) geração; ii) transmissão; iii) distribuição; e iv) consumo de um SEP.

Foi escolhido o modelo de 9 barras do IEEE e Vittal et al. (1977) para obtenção dos dados. Os parâmetros foram definidos pelo ANAREDE. Devido a três softwares de simulação, é necessária atenção na inserção dos dados para que todos os parâmetros sejam iguais entre os programas. A modelagem do sistema requer uma adaptação de modo a se encaixar em cada software específico. Para



isso, é necessário realizar uma modelagem matemática para que todos os parâmetros sejam idênticos entre os softwares. A Figura 2 apresenta o modelo adaptado para a realização dos estudos (VITTAL et al., 2019).

Figura 2: Circuito exemplo IEEE de 9 Barras.



No pacote Cepel e no PSP-UFU, o nível de tensão pode ser configurado em p.u.. No ANAREDE, é necessário inserir e/ou desenhar cada elemento do sistema para parametrização das barras com definição de um grupo base de tensão.

Para os geradores, é necessário inserir os transformadores e para as cargas não há a necessidade em configurar, já que na parametrização das barras foi inserido o consumo ativo e reativo. Com isso, todos os componentes estariam prontos para o fluxo de potência automatizado pelo software. No entanto, esses dados ainda não seriam considerados como resultados da avaliação do sistema.

O modelo do sistema de 9 barras foi parametrizado no ANAREDE e o arquivo base exportado para o ANAFAS. O arquivo "ANA" e "lst" devem ser carregados com as configurações, realizando a conversão que resulta em um arquivo já modelado. Assim, é possível fazer os estudos de curto-circuito trifásico no software ANAREDE e ANAFAS.

O processo de modelagem no PSP-UFU segue as mesmas etapas do ANAREDE, com o sistema já parametrizado no mesmo, é possível obter o modelo no software da UFU.

O uso de softwares é uma forma eficiente para modelar e avaliar resultados em estudos da análise de sistemas interligados. Para isso, métodos iterativos como o gauss-seidel e newton raphson



podem ser utilizados para verificar o fluxo de carga ótimo, assim como o curto-circuito nas barras monofásico, bifásico, bifásico-terra e trifásico. Nesse sentido, os softwares ANAFAS, ANAREDE E PSP-UFU são recomendados para simulações, pois possuem características distintas. O ANAFAS realiza análises de falta no sistema e suas consequências na rede, enquanto o ANAREDE analisa fluxo de carga e dimensionamento do mesmo. Por último, o PSP-UFU é utilizado para análise detalhada da topologia das redes elétricas. Assim, os softwares citados permitem a otimização dos resultados obtidos nos estudos sobre análise de sistemas interligados por meio da modelagem matemática e convergência dos resultados.

Para realizar os estudos de fluxo de carga, é necessário escolher alguns parâmetros para que o sistema realize a conversão dos resultados como: i) método de iteração para convergência; ii) número máximo de iterações; e iii) precisão dos resultados.

Para realizar o estudo de curto-circuito, é necessário parametrizar algumas opções de estudo como: i) barra de falta; ii) tempo de duração; iii) instante de ocorrência da falta; e iv) orientação da tensão de referência. Utilizando os softwares escolhidos, os parâmetros são descritos, sendo: i) barra de ocorrência da falta; e ii) orientação da tensão de referência. Com tais parâmetros estabelecidos, é possível realizar a configuração em cada software.

Será realizada uma análise de dados e informações geradas por cada relatório entre os softwares PSP-UFU, ANAREDE e ANAFAS para comparar os resultados obtidos. O sistema de 9 Barras será usado como referência para validar o percentual de igualdade dos valores. A comparação servirá também para avaliar o desempenho desses programas a partir da identificação das diferenças entre seus resultados e auxiliar na melhoria do processo de análise dos dados.

#### **4 DESENVOLVIMENTO**

O Brasil possui extensões territoriais grandes, entre as quais há linhas de transmissões que levam as fontes geradoras até os locais onde a energia se destina: indústrias e residências. O fluxo de carga é um processo que estuda os sistemas elétricos e permite verificar as características de comportamento dele. Esse fluxo mostra a potência que flui pelo sistema, sendo possível representá-lo por barras ou linhas de transmissão. Através da simulação dos dados obtidos com o fluxo de carga, podem ser previstas ocorrências reais com mais facilidade, permitindo estabelecer medidas contingenciais para prevenir falhas no sistema elétrico. Além disso, também se tornam visíveis outros aspectos importantes da rede com relação às solicitações entre as barras de carga/geradora, assim com impactos gerados nas perturbações presentes na mesma.

A estabilidade é um dos principais fatores para o funcionamento adequado de uma rede elétrica. É necessário que as tensões permaneçam dentro dos limites máximos definidos, além disso, existem parâmetros limitantes que servem como controle da severidade das perturbações no Sistema Elétrico



de Potência (SEP). Essas variações aleatórias afetam a qualidade e/ou estabilidade da rede e são percebidas pelos usuários através do brilho intermitente das luzes em baixa tensão.

No Brasil, a frequência nominal de oscilação é entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Quando ocorrem distúrbios na rede de distribuição, as unidades geradoras precisam manter essa faixa para garantir equilíbrio entre geração e consumo.

Outra preocupação importante em relação à operação dos SEPs é o curto-circuito, que consiste num circuito de baixa impedância entre potenciais distintos e pode levar as tensões das barras até zero enquanto elevam as correntes do circuito acima dos valores iniciais. Em nosso país, devido à grande diversidade tecnológica da geração distribuída, essas falhas tendem a ser mais frequentes. Para minimizar os impactos delas sobre o sistema energético é preciso adotar medidas técnicas adequadas além disso existem várias outras causas potenciais comuns: isolações inadequadas; problemas mecânicos; descargas atmosféricas diretamente indiretamente; surtos por chaveamento; sobrecorrente por excessiva carga e erros humanos na manutenção e inspeção. Dessa forma, torna se fundamental prever falhas futuras para evitar perdas tecnológicas significativas no SEL

Os curtos-circuitos são classificados como permanentes e temporários. Os CC's permanentes acontecem quando a falha danifica o sistema, necessitando de uma equipe para corrigir o problema. Já os temporários possuem um sistema de proteção que envolve disjuntor e relé de supervisão, desligando o sistema logo após detecção do nível de segurança.

Em um sistema trifásico, há a junção das três fases sendo denominado curto simétrico. A tensão pré-falta cai abruptamente até 0 enquanto as fontes alimentam correntes de curto  $I_{cc}$  conforme a “força” das barras. Quando cada barra atinge o limite estabelecido pelo protetor, ele age interrompendo a falta. Assim, é possível analisar capacidade da barra em relação à falta pela contribuição à corrente e queda na tensão durante este processo - definida com  $S_{cc}$  (potência/tensão pré-falta x corrente).

Estudos sobre curtos-circuitos permitem simulações que auxiliam na operação do sistema assim com parâmetros de interrupções dos equipamentos; capacidade térmica dos componentes; regulação dos relés; esforços mecânicos e cálculo da malha terrestre (SATO & FREITAS 2015). O conhecimento destas informações torna a prevenção e o controle mais simples se forem realizadas por meio softwares computacionais para interpretação nos circuitos mais complexos (GALLI et al., 2017).

A simulação é uma técnica utilizada para substituir ou amplificar experiências, permitindo a análise de modelos através da abstração. O uso desta técnica facilita o processo de aprendizagem e a obtenção de resultados mais precisos em sistemas complexos. A simulação se baseia na criação de um ambiente virtual que permite verificar e testar resultados antes da implementação na realidade, sendo possível observar como os parâmetros escolhidos afetam o comportamento do sistema. Os softwares desenvolvidos para estudos por meio dessa ferramenta oferecem telas interativas que auxiliam no processamento dos dados.



O mercado oferece uma variedade de softwares para simulações, como por exemplo, os da CEPEL: Análise de Falhas Simultâneas (ANAFAS), Análise de Redes Elétricas (ANAREDE), Fluxo de Potência Ótimo (FLUPOT) e Comportamento Harmônico e Análise Modal (HARMZS). Outros softwares também podem ser encontrados como o xSpider (EATON, 2019), OpenDSS (EPRI, 1997) e ETAP (ETAP, 2019). Além disso há os softwares open source com a PSP-UFU criada pela Universidade Federal de Uberlândia.

A ANAREDE é um software voltado para estudo de operação e planejamento em sistemas elétricos grandes desenvolvidos pelo CEPEL. Dentre as ferramentas do programa destacam-se métodos iterativos para resolver equações calculadas com fluxo potência, equivalente rede e definição das redes complementares. Assim obtém-se curvas PV que mostram a relação entre potência/tensão do sistema verificando estabilidade/restrições necessárias à análise.

Já a ANAFAS foi criada visando análises faltantes em qualquer porte sendo possível realizar estudos individuais ou macro automaticamente gerados pelo próprio software apresentando soluções baseadas na falha especificada além dos relatórios informativos sobre tensões/corrente faltantes bem com contribuição dos elementos sob observação e monitoramento caso por caso pelo usuário sem requisitos extraordinários hardware ou software.

Por fim, o PSP-UFU demonstra veracidade e precisão de resultados quando utilizado como ferramenta de aplicação em um ambiente de pesquisa oferecendo gratuitamente sua distribuição e sendo um software fácil de usar e apresentar dados da saída do fluxo de carga e das faltas estipuladas (OLIVEIRA, 2019).

Para implementar um sistema real, é necessário iniciar com o levantamento das características do sistema a ser estudado. Nesta etapa deve-se conhecer o tamanho e os equipamentos que compõem sua infraestrutura. Após isso, softwares são empregados para calcular as variáveis sob diferentes condições, permitindo verificar se o projeto atende às expectativas estabelecidas no início. Caso haja alguma discrepância entre os resultados e o projeto inicial, é possível realizar ajustes na infraestrutura para melhorar seu desempenho.

Na sequência, é necessário instalar todos os equipamentos de acordo com as especificações do projeto e configurá-los adequadamente. Por fim, são realizados testes finais antes que o sistema seja colocado em operação. Assim, esta seção descreve os resultados obtidos por meio da simulação computacional de um sistema conforme metodologia detalhada anteriormente.

Foi utilizado o arquivo de base do sistema de 9 barras que está inserido nos exemplos do ANAREDE, é necessário realizar a configuração do PSP-UFU conforme os dados do arquivo selecionado. Para realizar a extração dos dados, é necessário acessar a tela do “Gerenciador de Dados” do ANAREDE.



Com a tela de seleção conforme mostra a Figura 7, os dados são apresentados conforme é realizada a escolha clicando em cada tipo de equipamento.

**Figura 3:** Tela do “Gerenciador de Dados” do ANAREDE.



Com a tela de seleção conforme mostra a Figura 3, os dados são apresentados conforme é realizada a escolha clicando em cada tipo de equipamento.

**Tabela 1:** Dados extraídos dos Geradores.

Nome do Gerador	Nome da Barra	Tipo da Barra	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Ger. Ativa (MW)	Ger. Reativa (MW)
Gerador 1	Barra 1	2	1,07	0	142,5	10,88
Gerador 2	Barra 2	1	1,07	-1,8	90	-2,6
Gerador 3	Barra 3	1	1,07	-1,4	85	-13,7

A Tabela 1 tem dados básicos sobre região, tensão e ângulo dos geradores. As potências ativas/reactivas também são mostradas. Para estudos no PSP-UFU, é preciso os valores de impedância de sequência, sem a parametrização das impedâncias, os valores referentes às simulações de faltas apresentam erro, impedindo então a realização das configurações.

A tela apresenta a sigla que denota Sem um Número (Not a Number - NAN), mostrando que há falta de dados para a continuidade das configurações. Entretanto, o software apresenta um arquivo base com o circuito de 9 barras para a realização de simulações. Os valores das impedâncias são extraídos e tabelados como mostra a Tabela 2.

**Tabela 2:** Dados da reatância dos Geradores do PSP-UFU.

Nome dos Geradores	Impedâncias de Sequência (p.u.)		
	Reatância Posi. ( $X_1$ )	Reatância Negat. ( $X_2$ )	Reatância Zero ( $X_0$ )
Gerador 1	0,051680	0,074290	0,020672
Gerador 2	0,101830	0,149365	0,040732
Gerador 3	0,154105	0,202053	0,061642



As resistências foram consideradas como 0, e as reatâncias apresentadas em p.u., com isso, é possível realizar a simulação das faltas do sistema. Com os dados tabelados, os próximos dados a serem obtidos serão das barras do sistema. Realizando o mesmo processo de extração de dados, a Tabela 3 apresenta os dados das barras do sistema.

**Tabela 3:** Dados extraídos do conjunto de 9 Barras do sistema.

Nome da Barra	Tipo	Tensão Base (kV)	Tensão (p.u.)	Ângulo (graus)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MW)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MW)
Barra 1	2 - Ref.	1	1,075	0	142,5	10,88		
Barra 2	1- PV	1	1,075	-1,8	90	-2,6		
Barra 3	1- PV	1	1,075	-1,4	85	-13,7		
Barra 4	0 - PQ	1	1,072	-4,1				
Barra 5	0 - PQ	1	1,05	-7,7			125	50
Barra 6	0 - PQ	1	1,064	-6,7			90	30
Barra 7	0 - PQ	1	1,078	-4,6				
Barra 8	0 - PQ	1	1,069	-6,4			100	35
Barra 9	0 - PQ	1	1,083	-3,9				

Conforme apresenta a Tabela 3, os dados extraídos mostram as tensões de cada barra, conforme a tensão base das barras, os ângulos de cada uma, assim como apresenta a geração inserida na barra, assim como a carga instalada. Os próximos dados a serem obtidos são apresentados na Tabela 4 que mostra os dados dos geradores do sistema.

**Tabela 4:** Dados dos geradores extraídos do conjunto de 9 Barras do sistema.

Barra DE	Barra PARA	Resistência * (%)	Reatância (%)	Tap	Capacidade Normal (MVA)
Barra 1	Barra 4	0	5,76	1	250
Barra 2	Barra 7	0	6,25	1	200
Barra 3	Barra 9	0	5,86	1	300

A Tabela 4 informa as barras dos trafos: "DE" e "PARA", além de resistência, reatância, tap e capacidade normal. A Tabela 5 mostra os dados das linhas do sistema com suas configurações.

**Tabela 5:** Dados extraídos das linhas do sistema.

Nome	Barra DE	Barra PARA	Resistência (%)	Reatância (%)	Susceptância (Mvar)	Capacidade Normal (MVA)
Linha 1	Barra 4	Barra 5	1	8,5	17,6	300
Linha 2	Barra 4	Barra 6	1,7	9,2	15,8	200
Linha 3	Barra 6	Barra 9	3,9	17	35,8	200
Linha 4	Barra 7	Barra 5	3,2	16,1	30,6	300
Linha 5	Barra 7	Barra 8	0,85	7,2	14,9	300
Linha 6	Barra 8	Barra 9	1,19	10,08	20,9	300

A Tabela 5 contém dados como resistência, reatância, susceptância e capacidade de cada linha. Assim, é possível montar um circuito no PSP-UFU para estudar fluxo de carga e curto-circuito.





**Figura 5:** Relatório escolhido para a análise de fluxo de carga.

Elementos Série

Linhas (RLIN)

Circuitos com Terminal Aberto (OPEN)

Linhas no Limite % (RLIL)  %

Shunts de Linha (RSHL)

Banco Shunt de Linha (RBSL)

Transformadores (RTRA)

Compensadores Série (RCSC)

Dados de Linha (DADL)

Transformadores LTC (RLTC)

Transformadores LTC no Limite (RTPL)

Dados Complementares de Transf. (RCTR)

Dados de Compensador Série (DADC)

Conforme apresentado abaixo, a Tabela 6 apresenta o fluxo de carga gerado pelo software com o relatório RLIN.

**Tabela 6:** Resultados da conversão do fluxo de carga no ANAREDE.

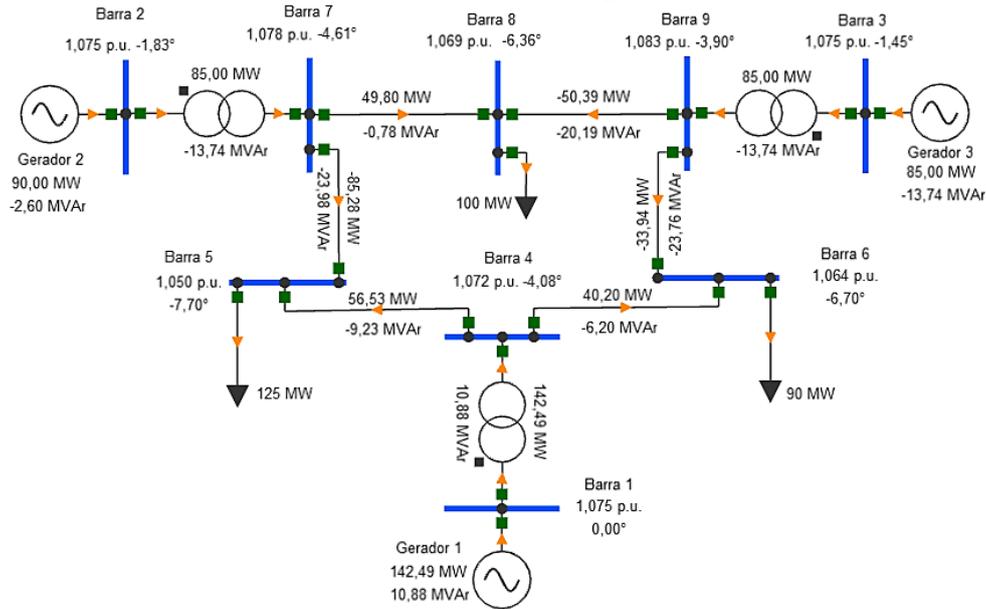
Barra DE	Tipo	Barra PARA	Fluxo At. (MW)	Fluxo Reat. (MW)	Fluxo (MVA)	Capac. Normal (MVA)	Perda Ativa (MW)	Perda Reat. (MW)
Barra 1	2 - Ref.	Barra 4	142,49	10,88	142,91	250	0,00	10,18
Barra 2	1 - PV	Barra 7	90,00	-2,60	90,04	200	0,00	4,38
Barra 3	1 - PV	Barra 9	85,00	-13,74	86,10	300	0,00	3,76
Barra 4	0 - PQ	Barra 1	-142,49	-0,70	142,49	250	0,00	10,18
Barra 4	0 - PQ	Barra 5	85,96	9,93	86,53	300	0,68	-14,05
Barra 4	0 - PQ	Barra 6	56,53	-9,23	57,28	200	0,47	-15,46
Barra 5	0 - PQ	Barra 4	-85,28	-23,98	88,59	300	0,68	-14,05
Barra 5	0 - PQ	Barra 7	-39,72	-26,02	47,48	300	0,48	-32,22
Barra 6	0 - PQ	Barra 9	-33,94	-23,76	41,43	200	0,4	-39,54
Barra 6	0 - PQ	Barra 4	-56,06	-6,24	56,41	200	0,5	-15,46
Barra 7	0 - PQ	Barra 2	-90,00	6,98	90,27	200	0,0	4,38
Barra 7	0 - PQ	Barra 5	40,20	-6,20	40,68	300	0,5	-32,22
Barra 7	0 - PQ	Barra 8	49,80	-0,78	49,80	300	0,19	-15,59
Barra 8	0 - PQ	Barra 7	-49,61	-14,81	51,78	300	0,19	-15,59
Barra 8	0 - PQ	Barra 9	-50,39	-20,19	54,28	300	0,27	-21,91
Barra 9	0 - PQ	Barra 3	-85,00	17,49	86,78	300	0,00	3,76
Barra 9	0 - PQ	Barra 6	34,34	-15,77	37,79	200	0,40	-39,54
Barra 9	0 - PQ	Barra 8	50,66	-1,72	50,69	300	0,27	-21,91

A Tabela 6 apresenta o fluxo nos ramos, sendo os fluxos apresentados: i) de potência ativa; ii) de potência reativa; iii) potência aparente; assim como iv) capacidade normal do ramo; v) as perdas ativas; e vi) as perdas reativas. É notório verificar que o relatório do ANAREDE traz diversas informações importantes como por exemplo, as perdas reativas nos ramos.

Utilizando um número de precisão com escala de  $10^{-4}$  e realizando um número máximo de até 20 iterações, é possível obter a tela do PSP-UFU com os fluxos já apresentados como apresenta a Figura 6.



**Figura 6:** Circuito com fluxo de carga do PSP-UFU.



A Figura 6 apresenta os fluxos de carga nos ramos assim como os dados básicos parametrizados referentes as barras e geradores do sistema. O software realizou os cálculos do fluxo de carga realizando um total de 5 iterações em um tempo de 1ms (um milissegundo) utilizando o método de Newton Raphson. A Tabela 7 apresenta os dados do fluxo de carga nos ramos.

**Tabela 7:** Resultados da conversão do fluxo de carga no PSP-UFU.

Nome	De	Para	Potência Ativa (MW)	Potência Reat. (MVAr)
Linha 1	Barra 7	Barra 8	49,798	-0,783
Linha 1	Barra 8	Barra 7	-49,612	-14,810
Linha 2	Barra 8	Barra 9	-50,388	-20,190
Linha 2	Barra 9	Barra 8	50,660	-1,722
Linha 4	Barra 5	Barra 4	-85,280	-23,980
Linha 4	Barra 4	Barra 5	85,958	9,929
Linha 5	Barra 4	Barra 6	56,534	-9,228
Linha 5	Barra 6	Barra 4	-56,061	-6,236
Linha 3	Barra 7	Barra 5	40,202	-6,197
Linha 3	Barra 5	Barra 7	-39,720	-26,020
Linha 6	Barra 6	Barra 9	-33,939	-23,764
Linha 6	Barra 9	Barra 6	34,340	-15,773
Trafo 2	Barra 2	Barra 7	90,000	-2,596
Trafo 2	Barra 7	Barra 2	-90,000	6,980
Trafo 3	Barra 3	Barra 9	85,000	-13,736
Trafo 3	Barra 9	Barra 3	-85,000	17,495
Trafo 1	Barra 1	Barra 4	142,491	10,880
Trafo 1	Barra 4	Barra 1	-142,491	-0,701

O software apresenta os dados convertidos com um total de até 12 casas decimais em seu relatório, entretanto, a Tabela 7 apresenta apenas um total de 4 casas para facilitar verificação. Esta,



exibe então o tipo de ramo equipamento em que se concentra o fluxo, as barras qual estão conectados os equipamentos, assim como o fluxo ativo e reativo dos trechos.

Conforme apresentado na metodologia, será realizado a comparação dos resultados entre os softwares, ANAREDE e o PSP-UFU. Para realizar os comparativos, a Equação 1 apresenta o cálculo utilizado.

$$Dif_{. \%} = \frac{D_{ref.} - D_{obt.}}{D_{ref.}} \quad (1)$$

Onde:

$Dif_{. \%}$  = apresenta a diferença percentual

$D_{ref.}$  = apresenta o dado de referência do software

$D_{obt.}$  = apresenta o dado obtido pelo outro software

A Equação 1 apresenta a diferença percentual utiliza o  $D_{ref.}$ , como dado de referência, e subtrai ao  $D_{obt.}$ , dado obtido pelo outro software, e dividido pelo dado de referência. Nesse comparativo, serão utilizados os valores do pacote Cepel como referência.

A Tabela 8 apresenta os desvios dos resultados do fluxo de carga entre o ANAREDE, na Tabela 6 e o PSP-UFU, na Tabela 7.

**Tabela 8:** Diferença Percentual dos fluxos de potência do sistema.

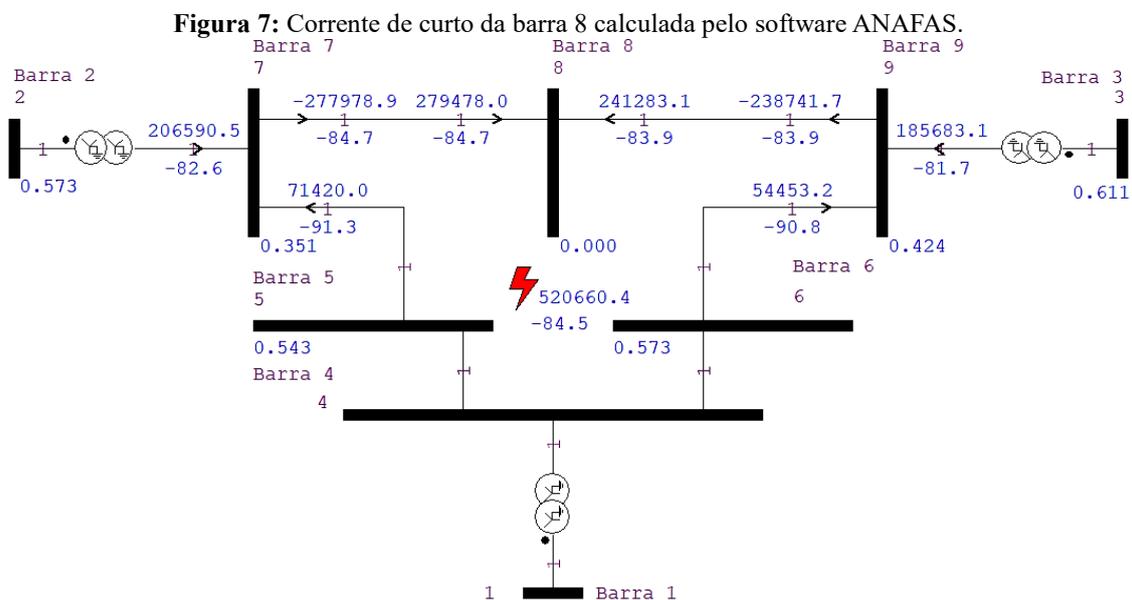
Barra DE	Barra PARA	Fluxo Ativo ANAREDE (MW)	Fluxo Reativo ANAREDE (MW)	Fluxo Ativo PSP-UFU (MW)	Fluxo Reativo PSP-UFU (MW)	Dif.% Fluxo Ativo	Dif.% Fluxo Reativo
Barra 1	Barra 4	142,49	10,88	142,49	10,88	0,00%	0,00%
Barra 2	Barra 7	90,00	-2,60	90,00	-2,60	0,00%	0,17%
Barra 3	Barra 9	85,00	-13,74	85,00	-13,74	0,00%	0,03%
Barra 4	Barra 1	-142,49	-0,70	-142,49	-0,70	0,00%	0,20%
Barra 4	Barra 5	85,96	9,93	85,96	9,93	0,00%	0,01%
Barra 4	Barra 6	56,53	-9,23	56,53	-9,23	0,01%	0,03%
Barra 5	Barra 4	-85,28	-23,98	-85,28	-23,98	0,00%	0,00%
Barra 5	Barra 7	-39,72	-26,02	-39,72	-26,02	0,00%	0,00%
Barra 6	Barra 4	-56,06	-6,24	-56,06	-6,24	0,00%	0,06%
Barra 6	Barra 9	-33,94	-23,76	-33,94	-23,76	0,00%	0,02%
Barra 7	Barra 2	-90,00	6,98	-90,00	6,98	0,00%	0,00%
Barra 7	Barra 5	40,20	-6,20	40,20	-6,20	0,01%	0,05%
Barra 7	Barra 8	49,80	-0,78	49,80	-0,78	0,00%	0,39%
Barra 8	Barra 7	-49,61	-14,81	-49,61	-14,81	0,00%	0,00%
Barra 8	Barra 9	-50,39	-20,19	-50,39	-20,19	0,00%	0,00%
Barra 9	Barra 3	-85,00	17,49	-85,00	17,50	0,00%	0,03%
Barra 9	Barra 6	34,34	-15,77	34,34	-15,77	0,00%	0,02%
Barra 9	Barra 8	50,66	-1,72	50,66	-1,72	0,00%	0,14%

Os resultados encontrados na Tabela 8 apresentam o maior desvio de 0,3941% (potência reativa da Barra 7 para a Barra 2). É notório então verificar que o fluxo de carga nos softwares, apresenta uma



diferença maior nas potências reativas do que nas potências ativas, porém, a maior diferença nas potências ativas apresenta um valor de 0,0064% (referente ao fluxo da Barra 4 para a Barra 1).

Conforme metodologia apresentada, os softwares ANAFAS e PSP-UFU apresentam em suas áreas de trabalho, a representação da falta de forma diferente. Na realização dos estudos de curto-circuito, a falta trifásica considerada é realizada na barra 8. Não é realizado a parametrização do instante de ocorrência da falta, assim como tempo de duração, apresentando então os resultados de valores máximos obtidos. O software do pacote Cepel adotado é o ANAFAS e entrará em comparação com o PSP-UFU. Conforme a metodologia adotada, o sistema é apresentado mostrando a corrente em A (ampère) conforme mostra a Figura 13.



O software apresenta a corrente de curto indicada pelo símbolo de raio em vermelho, assim como o ângulo da corrente em sequência positiva. O ANAFAS não apresenta em todo o trecho as correntes de contribuição, o que implica a necessidade de geração de um relatório das contribuições. A Tabela 9 apresenta os dados da corrente de falta na barra 8 gerados pelo software.

**Tabela 9:** Dados do ANAFAS referente a corrente de falta na barra.

Nome da Barra com falta	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (p.u.)	Ângulo	Corrente (p.u.)	Ângulo	Corrente (p.u.)	Ângulo
Barra 8	9,018	-84,5	9,018	-24,5	9,018	-144,5

Verificando o impacto dos ramos do sistema, é necessário realizar uma análise das tensões do sistema mediante a ocorrência de uma falta. Para isso, é possível extrair as informações das tensões das barras com o mesmo relatório do curto na barra. A Tabela 10 apresenta os dados das tensões de barras pós falta.

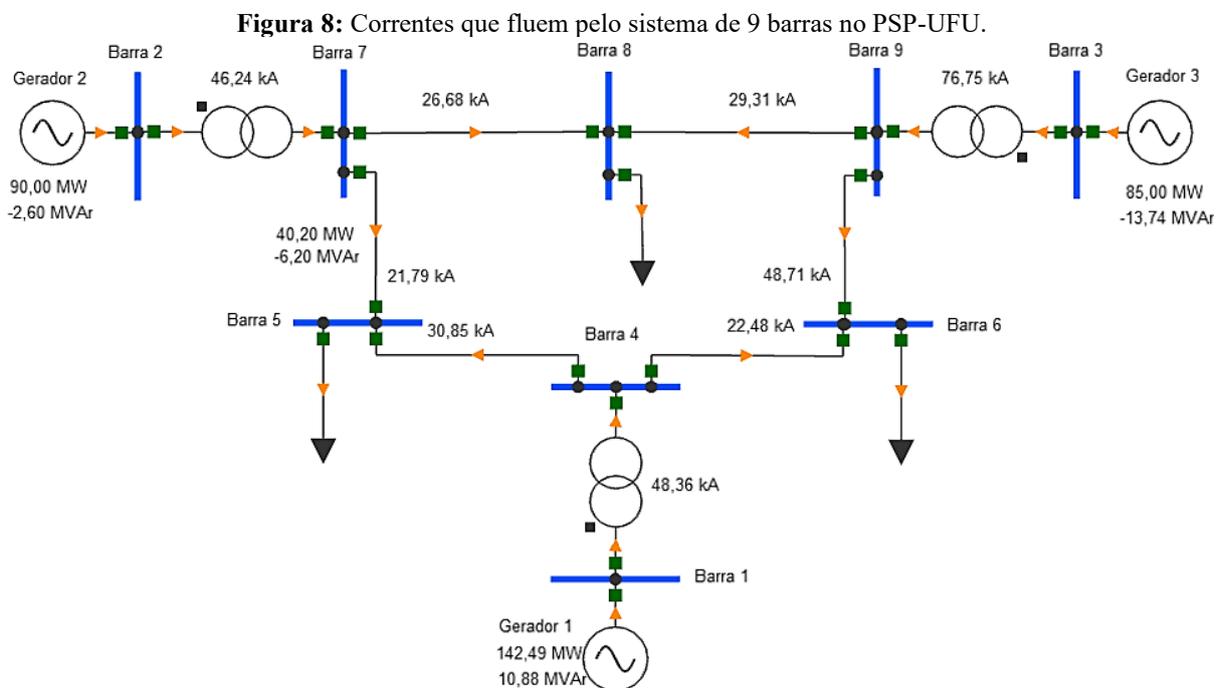


**Tabela 10:** Dados das tensões pós-falta no ANAFAS.

Nome da Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo	Tensão (p.u.)	Ângulo	Tensão (p.u.)	Ângulo
Barra 2	0,573	2,0	0,573	-118,0	0,573	122,0
Barra 3	0,611	2,1	0,611	-117,9	0,611	122,1
Barra 5	0,543	-5,4	0,543	-125,4	0,543	114,6
Barra 6	0,573	-4,1	0,573	-124,1	0,573	115,9
Barra 7	0,351	-1,5	0,351	-121,5	0,351	118,5
Barra 8	0,000	-84,5	0,000	-24,5	0,000	-144,5
Barra 9	0,424	-0,7	0,424	120,7	0,424	119,3

Com as tensões pós-faltas apresentadas, é notório que as barras mais próximas à barra da falta sofrem o maior impacto da queda da tensão, enquanto a tensão na barra 8 decai para zero. As barras 1 e 4 não são apresentadas pelo relatório, entretanto devido a fundamentação teórica, pode-se dizer que as mesmas não decaem drasticamente devido o ramo estar ligado a uma barra de referência.

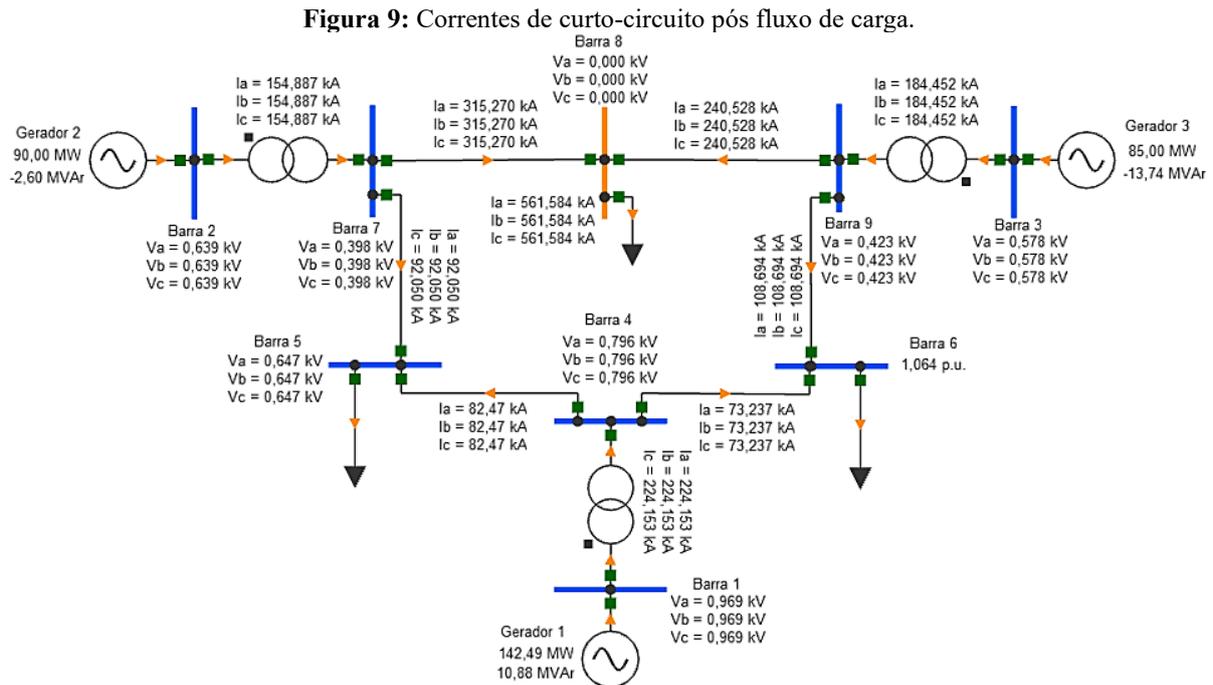
Realizando o estudo com o software, constata-se a possibilidade realizar o estudo de faltas utilizando o fluxo de carga do sistema. Sendo assim, é possível analisar os resultados mediante o regime de falta e, analisando uma aproximação de um caso com o sistema em funcionamento. As seções a seguir apresentam os resultados as considerações apontadas, mostrando então os resultados encontrados entre mediante as análises. Considerando as correntes do sistema originais, a Figura 8 apresenta o fluxo da corrente pré-falta no sistema.



Verificando a funcionalidade do software, é possível realizar uma análise do curto-circuito considerando a presença de fluxo de carga. Com a análise, é possível obter valores mais aproximados de um cenário real de acontecimentos. Com o sistema já montado devido as análises anteriores, será analisado a falta no software PSP-UFU.



Analisando a figura apresentada, é possível verificar que a maior corrente que circula pelas linhas é de 48,71kA, e verificando a maior corrente do sistema, pode-se notar a corrente que passa pelo transformador 3, com valor de 76,75kA. Tais contribuições serão utilizadas para realizar a análise do comportamento do sistema mediante a falta. Nota-se que é possível extrair os relatórios dos valores da corrente de curto após a realização do fluxo de carga, fazendo com que os resultados sofram algumas alterações como mostra a Figura 9, qual apresenta os dados da falta e as contribuições dos equipamentos para a corrente de curto na barra do local da falta.



A falta é representada com a coloração alaranjada da barra que foi selecionada para a ocorrência da falta. Para facilitar a compreensão dos resultados, o software imprime os relatórios no formato de tabela assim como nos estudos de fluxo de carga. A Tabela 11 apresenta os dados da corrente de curto na barra 8.

**Tabela 11:** Dados do PSP-UFU referente à corrente de curto na barra 8.

Nome da Barra com falta	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (p.u.)	Ângulo	Corrente (p.u.)	Ângulo	Corrente (p.u.)	Ângulo
Barra 8	9,7269	-84,3598	9,7269	155,6402	9,7269	35,6402

A Tabela 11 apresenta os dados da corrente de curto trifásica no sistema, assim como o ângulo de cada fase. Porém, para realizar uma análise macro do impacto da falta na barra, é necessário verificar as consequências da falta nas outras barras, nos geradores e nas linhas. A Tabela 12 apresenta o impacto da falta nas outras barras.



**Tabela 12:** Dados das tensões pós-falta na barra 8.

Nome da Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo	Tensão (p.u.)	Ângulo	Tensão (p.u.)	Ângulo
Barra 1	0,96908	0,6279	0,9691	-119,3721	0,9691	120,6279
Barra 2	0,63857	0,7896	0,6386	-119,2104	0,6386	120,7896
Barra 3	0,57787	2,5758	0,5779	-117,4242	0,5779	122,5758
Barra 4	0,79638	-3,5176	0,7964	-123,5176	0,7964	116,4824
Barra 5	0,64672	-7,2343	0,6467	-127,2343	0,6467	112,7657
Barra 6	0,65988	-5,6459	0,6599	-125,6459	0,6599	114,3541
Barra 7	0,39803	-2,8394	0,3980	-122,8394	0,3980	117,1606
Barra 8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Barra 9	0,42286	-0,4562	0,4229	-120,4562	0,4229	119,5438

A Tabela 12 apresenta o impacto da falta mostrando então as tensões pós-falta e seus ângulos. É notório a queda de tensão nas barras é significativa, principalmente na região próxima à falta como nas barras 7 e 9. Porém, ao verificar a barra 1, a mesma não sofre tanto impacto, visto que ela é a barra de referência do sistema, e que garante o funcionamento do sistema em caso de contingências. As barras 4, 5 e 6 são as que tensão decaí menos devido estar próxima à Barra 1. É perceptível que os geradores realizam a injeção de corrente na rede mediante a ocorrência da falta. A Tabela 13 apresenta as correntes que os geradores injetam na rede.

**Tabela 13:** Dados das correntes injetadas pelos geradores no PSP-UFU.

Geradores	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (p.u.)	Ângulo	Corrente (p.u.)	Ângulo	Corrente (p.u.)	Ângulo
Gerador 1	3,2052	-62,9895	3,2052	177,0105	3,2052	57,0105
Gerador 2	3,7174	-75,2736	3,7174	164,7264	3,7174	44,7264
Gerador 3	2,5909	-70,5672	2,5909	169,4328	2,5909	49,4328

Como uma forma de suprir a falta de impedância na barra, os geradores realizam a injeção de corrente solicitada pelo sistema, aumentando então no caso do Gerador 2 em até quase 5 vezes o valor da corrente nominal injetada antes da falta.

Como o Gerador 2 possui a maior contribuição se for observado as componentes de corrente, tais valores se dão devido o respectivo gerador possuir o maior valor de potência ativa do sistema e por estar próximo à barra que ocasionou a falta. A maior contribuição após o Gerador 2 se dá pelos Geradores 3 e 1 respectivamente, seguindo então a mesma consideração do valor de potência ativa de cada equipamento.

Para realizar as análises de comparação entre os softwares, os resultados obtidos serão utilizados para apresentar o desvio entre os softwares ANAFAS e o PSP-UFU. A corrente de falta trifásica foi obtida pelos dois softwares com resultados semelhantes, será considerado a falta do PSP-UFU considerando o fluxo de carga. A Tabela 14 apresenta o desvio dos resultados obtidos entre a Tabela 9 do ANAFAS e a Tabela 11 do PSP-UFU.



**Tabela 14:** Diferença entre os resultados das correntes e ângulos do circuito.

Nome da Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	Corrente (p.u.)	Ângulo	Corrente (p.u.)	Corrente (p.u.)	Ângulo	Corrente (p.u.)
Barra 8	7,86%	0,17%	7,86%	735,27%	7,86%	124,66%

O desvio da Tabela 14 apresenta um percentual menor que 1% considerando o valor da corrente de curto, mostrando então que os softwares realizam uma convergência dos resultados de forma similar. Entretanto, os softwares não realizam concordância entre os ângulos apresentados, chegando perto então de 562% no caso da Fase B. A análise realizada apresenta o objetivo do estudo com pouca divergência. Realizando uma consideração (não apresentada no manual) baseada no conhecimento teórico do trabalho, é correto dizer que o ANAFAS considera o ângulo  $0^\circ$  como parâmetro inicial, enquanto o PSP-UFU utiliza os ângulos das barras, sendo assim os valores certamente apresentariam divergências.

Realizando uma análise das tensões do sistema, o PSP-UFU mostra as tensões de todas as barras do sistema, enquanto o ANAFAS mostra apenas as barras que não estão ligadas à barra de referência. A Tabela 15 apresenta o desvio entre a Tabela 10 do ANAFAS, e a Tabela 12 do PSP-UFU, em relação aos valores das tensões entre os softwares.

**Tabela 15:** Diferença entre as tensões pós-falta entre os softwares.

Nome da Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	Tensão (p.u.)	Ângulo	Tensão (p.u.)	Ângulo	Tensão (p.u.)	Ângulo
Barra 2	11,44%	60,52%	11,45%	1,03%	11,45%	0,99%
Barra 3	5,42%	22,66%	5,42%	0,40%	5,42%	0,39%
Barra 5	19,10%	33,97%	19,10%	1,46%	19,10%	1,60%
Barra 6	15,16%	37,70%	15,17%	1,25%	15,17%	1,33%
Barra 7	13,40%	89,29%	13,39%	1,10%	13,39%	1,13%
Barra 8	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100,00%
Barra 9	0,27%	34,83%	0,26%	199,80%	0,26%	0,20%

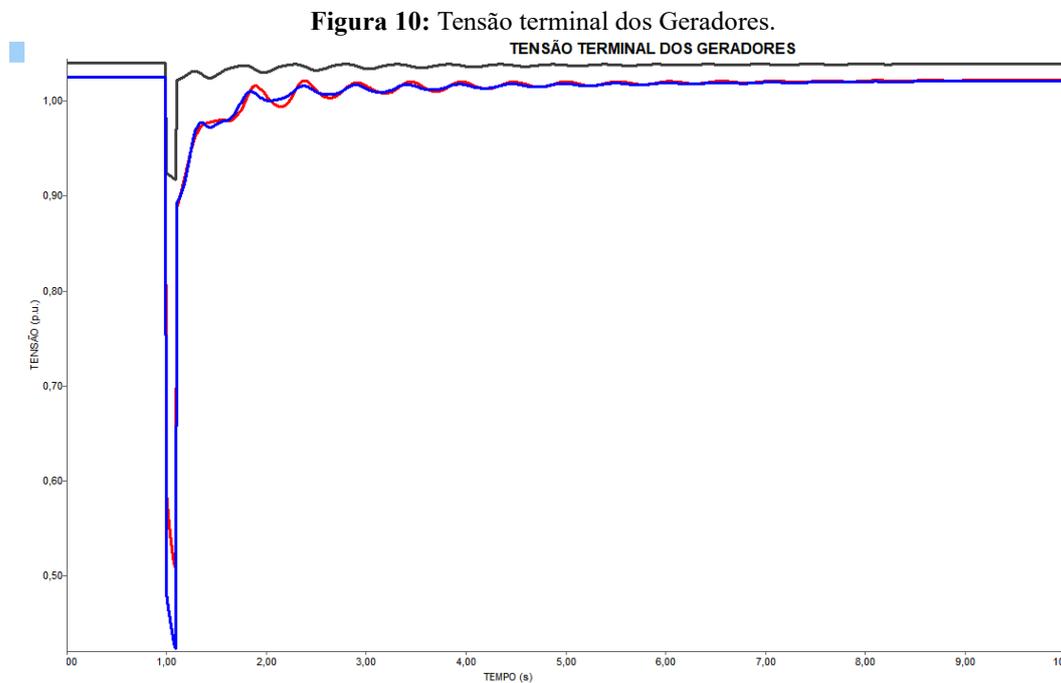
Como é possível observar, os softwares apresentam uma divergência de quase 89% (ângulo da corrente de falta da Barra 3 na fase A). As correntes de todas as barras apresentam uma divergência menor que 15%, como o caso da Barra 2 que apresenta a divergência menor que 4%. Os dois softwares apresentam no relatório das faltas, as correntes que circulam pelo sistema, mas, somente o PSP-UFU apresenta em seus relatórios, as contribuições dos geradores mediante a injeção de corrente no sistema.

Com a análise apresentada da falta trifásica pós realização do fluxo de carga no PSP-UFU, houve a realização do mesmo tipo de análise no software ANAFAS. Considera-se então, que o software não exporta os dados do fluxo do ANAREDE, as faltas são consideradas sem a presença de um fluxo de carga, denotando então um valor de ângulo  $0^\circ$  como base do processo de convergência dos resultados.

Para realizar uma análise do comportamento sistema, uma verificação no formato de gráficos auxiliaria na compreensão dos resultados. O PSP-UFU realiza o processo de execução de estabilidade



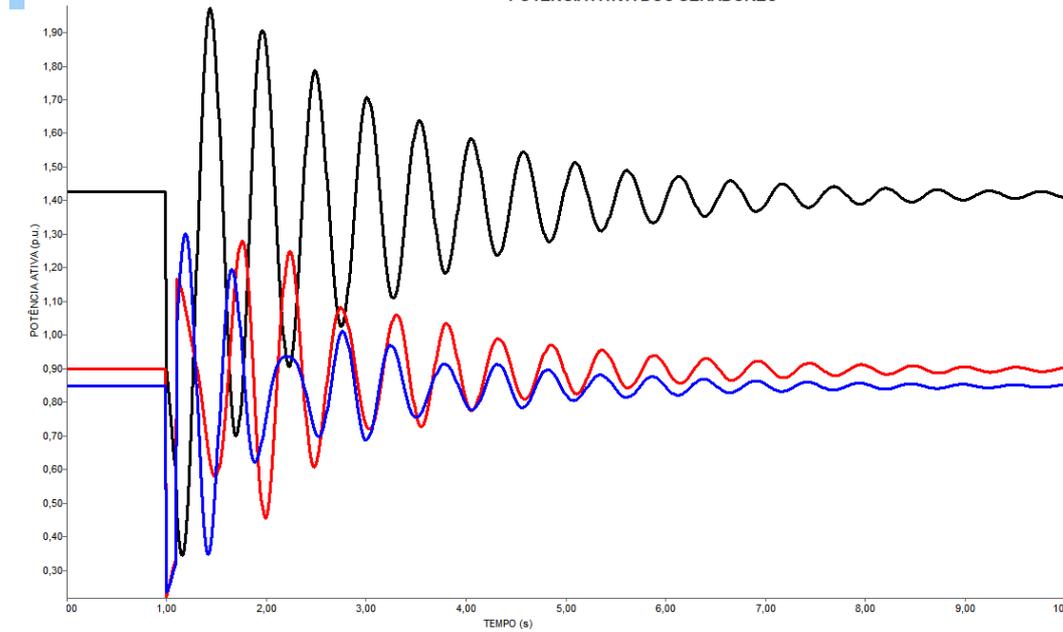
e assim apresenta uma tela onde é possível escolher os dados que serão representados por meio de gráficos. Os terminais dos geradores sofrem alterações em decorrência da falta, gerando então um decaimento da tensão como mostra a Figura 10. Os Geradores 1, 2 e 3, estão representados nas cores, preto, vermelho e azul respectivamente.



O gerador 3 com sua representação em cor azul sofre o maior impacto da falta devido o fornecimento de potência ser menor que dos outros geradores. Como o Gerador 1 está conectado a uma barra de referência do sistema, o afundamento de tensão é inferior à 10%, ou seja, o gerador conseguiu manter a qualidade da tensão de forma satisfatória. Enquanto o Gerador 1 manteve a qualidade de tensão, os outros geradores não trabalharam com a mesma eficiência, resultando então em afundamentos de tensão, superior a 30% no Gerador 2, e superior a 40% no Gerador 3. A potência ativa de fornecimento dos geradores também sofre alteração brusca com a influência da falta, como mostra a Figura 11.



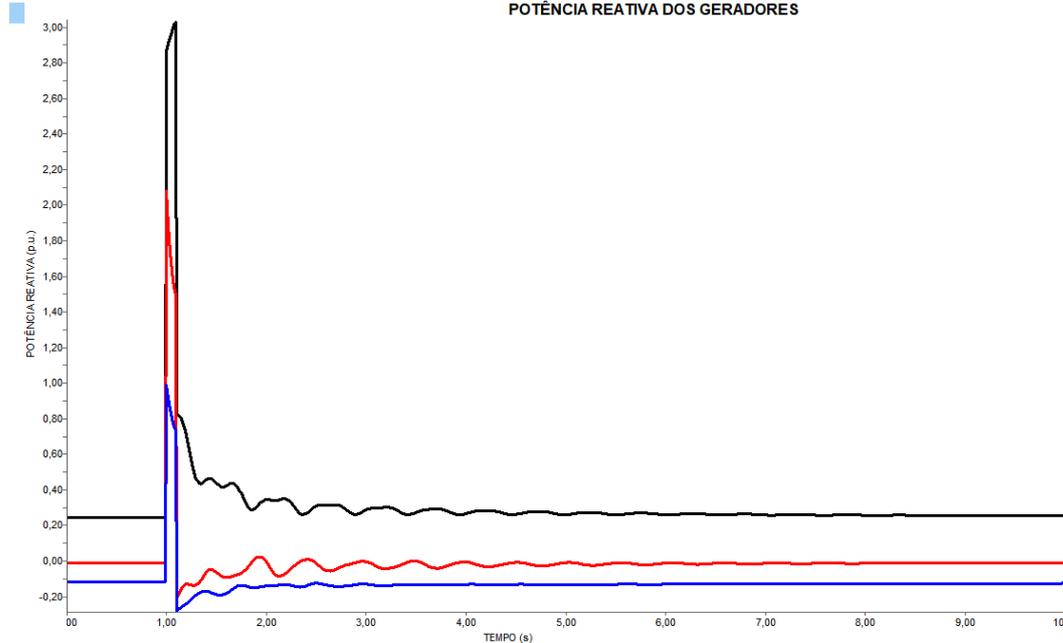
**Figura 11: Potência Ativa pós-falta dos Geradores.**  
POTÊNCIA ATIVA DOS GERADORES



Seguindo o mesmo padrão de cor da Figura 11, o Gerador 1 de representação na cor preta possui maior variação de pico, chegando próximo de 245%, devido este gerador estar conectado a uma barra de referência, ou pode se considerar como uma barra de segurança do sistema que garante que o sistema mantenha a potência necessária de demanda. A potência reativa do sistema também sofre uma extrema variação como mostra a Figura 18.

**Figura 12: Potência Reativa pós-falta dos Geradores.**

POTÊNCIA REATIVA DOS GERADORES



Com o padrão de representação de cores já mencionados, o Gerador que sofre maior perturbação é o Gerador 1, devido o mesmo ser responsável por controlar a tensão da barra de



referência do sistema, sendo assim, a grande parte das solicitações de potência reativa é demandada do Gerador 1.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho utiliza simulações computacionais para analisar sistemas elétricos, comparar diferentes softwares e determinar a importância dos fundamentos teóricos e da qualidade dos dados para obter resultados confiáveis. O trabalho também analisa diferentes softwares utilizados para simulação de sistemas elétricos, com foco em curtos-circuitos. Apesar dos desafios, o PSP-UFU mostrou-se mais completo em termos de análise transitória.

O estudo encontrou dificuldades na coleta de dados, mas superou obstáculos com sucesso utilizando modelos de exemplo e identificou a necessidade de validação de dados para aplicações práticas. As dificuldades encontradas na simulação foram: falta de clareza no manual, falta de exemplos, cálculos complexos e problemas com conversão de arquivos.

Apesar das limitações iniciais devido à curva de aprendizado do software, os resultados das simulações utilizando ANAREDE e PSP-UFU mostraram-se satisfatórios e consistentes, permitindo análises detalhadas do sistema elétrico, bem como dos efeitos das alterações no gerador. A semelhança dos resultados obtidos em ambos os procedimentos aumenta a confiabilidade da análise realizada. Os cálculos de curto-circuito apresentam boa concordância, mas as fases apresentam diferenças maiores. Os métodos utilizados são válidos, mas análises adicionais poderiam enriquecer o estudo.

O estudo apresentado analisa sistemas elétricos de potência, avaliando o fluxo de carga e as influências de faltas trifásicas no comportamento do sistema. Para realizar o estudo, foi necessário um grande referencial teórico sobre os sistemas elétricos de potência e seus componentes, que incluem geradores, transformadores, barras, linhas e cargas.

O trabalho detalha o processo de análise utilizado para o fluxo de carga e o curto-circuito trifásico, além de expor a conceituação e as metodologias de análise. O estudo também apresenta o comportamento, as consequências e as perturbações que podem ocorrer em um sistema mediante o fluxo de carga e a ocorrência de faltas. Os softwares ANAREDE, ANAFAS e PSP-UFU foram utilizados para realizar as simulações e análises. Com a metodologia formulada, os dados do sistema foram obtidos através do arquivo base do sistema de barramento IEEE 9, localizado na pasta de exemplos do software ANAREDE.

Após a verificação e inserção dos dados nos softwares, o processo de simulação gerou uma série de resultados. As análises de fluxo de carga entre o ANAREDE e o PSP-UFU foram realizadas utilizando o método de Newton Raphson. O fluxo de potência apresentado demonstrou grande eficiência nos resultados, possibilitando a análise do comportamento dos componentes do sistema e a comparação dos resultados obtidos pelos softwares.



O ANAFAS, utilizado como referência do estudo de curto-circuito trifásico, não considera a existência de um fluxo de carga no sistema, apresentando somente as correntes do regime de falta. Com o uso do PSP-UFU para realizar a comparação dos resultados, notou-se uma diferença nos cálculos de ângulos das correntes em determinadas fases. Mesmo com as divergências dos ângulos, os valores de tensão e corrente se mostraram satisfatórios.

O PSP-UFU consegue realizar os estudos de falta com a realização do fluxo de carga, permitindo a obtenção e comparação de resultados para mostrar a influência da falta em um sistema em funcionamento. O estudo analisa sistemas elétricos de potência, avaliando o fluxo de carga e as influências de faltas trifásicas no comportamento do sistema.

Os softwares ANAFAS e PSP-UFU foram utilizados para simulação e análises, e divergências nos cálculos dos ângulos das tensões e correntes foram observadas. A consideração de ângulos iniciais das barras no ANAFAS é zero, enquanto no PSP-UFU, os ângulos das barras são considerados em sua parametrização inicial.

Os objetivos do trabalho foram alcançados, com a realização do estudo do fluxo de carga e a modelagem do sistema conforme a exigência de cada software. As simulações de fluxo de carga e as comparações entre o ANAREDE e o PSP-UFU permitiram avaliar o comportamento da rede e seus componentes. O estudo de curto-circuito trifásico no ANAFAS e no PSP-UFU destacou a importância do dimensionamento de uma rede mediante a ocorrência de uma falta trifásica.

O processo de comparação de resultados mostrou a importância da validação de diferentes resultados, para uma análise detalhada e um questionamento do processo de cálculos dos softwares do mercado. Para a realização de um novo estudo, é fundamental concluir a busca dos dados dos equipamentos para aprofundar a pesquisa proposta. No entanto, a realização de novas pesquisas sem uma base de comparação levará a novas descobertas que não podem ser verificadas; portanto, a realização de novas pesquisas exigirá uma base sólida de pesquisa teórica, bem como muita investigação matemática.

Como sugestão para novos trabalhos complementares, temas que não foram abordados nesse projeto incluem: estudo de componentes harmônicas do sistema, elaboração de modelo de reguladores de tensão e velocidade, estudo de múltiplas faltas no mesmo instante, estudo de faltas em pontos distantes e com intervalo sequenciado, e métodos de redimensionamento de sistema com o intuito de reduzir custos.

O objeto de estudo do trabalho proposto é de extrema importância para a manutenção do sistema, bem como o dimensionamento correto do SEP para poder suportar as consequências de perturbações causadas por diversos fatores. Como uma evolução do tema abordado, uma proposta interessante seria a implementação de uma solução baseada em coordenação e seletividade de um modelo de proteção para a ocorrência de uma falta em alguma barra do sistema.



## REFERÊNCIAS

ANDRADE, W. E. A. Realização de Estudos de Fluxo de Carga, Curto- Circuito e Proteção de um Alimentador Real de Distribuição com o auxílio dos Softwares ANAFAS e ANAREDE. Thesis (Master's degree), Universidade Federal do Pará, Pará, 2014.

AREND, G.; NEY, R. C.; BERNARDON, D. P. Análise da Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos em Situações de Contingências. Final Project (Electrical Engineering Degree), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Rio Grande do Sul, 2017.

BOURGES, F. et al. Alocação de perdas via cálculo de curto-circuito trifásico. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2012, accepted.

EATON, System for Sizing Low Voltage Networks – xSpider. User's Manual. Version 3.2, Austria, 2019.

EPRI, Distribution Systems Simulation Software – OPENDSS. User's Manual. Version 4.1.0.7, California, United States, 1997.

ETAP, Energy Management and Monitoring Software, ETAP. User's Manual. Version 19.1.1. California, United States, 2019.

GALLI, Felipe Parizzi; STEFENON, Stéfano Frizzo; AMÉRICO, Jonatas Policarpo. Análise de curto-circuitos transitórios em Lines de transmissão utilizando o software UDW. ESPACIOS Análise, v. 38, n. 34, 2017.

GOMES, N.O. N. Análise de Falhas Simultâneas no Sistema Elétrico de Potência de 57 Buss Através do Software ANAFAS. Final Project (Electrical Engineering Degree), Centro Universitário de Brasília – UNICEUB, Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS, Brasília, 2018.

GUARINI, A. de P. et al. Estudos automatizados de recomposição do sistema interligado nacional utilizando novas facilidades computacionais no programa Anarede–XIX SNPTEE. Final Project (Electrical Engineering Degree), UPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT, São Paulo, 2007.

IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Recommended Practice for Conducting Load-Flow Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems. 2018 .Available online: <https://standards.ieee.org/ieee/3002.2/4773/> (accessed on 28 Jul 2024).

JASTALE, L. E. P. Estudo e Análise do Despacho Econômico de Unidades Generatoras associado ao Fluxo de Carga. Final Project (Electrical Engineering Degree), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2020.

MARIANO, Augusto César Santos et al. Aplicação do software ANAFAS para cálculo de curto-circuitos em sistemas elétricos de potência. Final Project (Electrical Engineering Degree), Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017.

MUNHOZ, N. F.; CASTILLO, D. T.; MONTERO, L. V. Análisis de la estabilidad transiente en sistemas de potencia aplicando las herramientas computacionales: ANAREDE Y ANATEM. Final Project (Electrical Engineering Degree), Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Guayaquil, 1998.



OLIVEIRA, T. L. Desenvolvimento de um programa computacional livre, gráfico, e multiplataforma para analisar sistemas elétricos de potência em regime permanente e dinâmico. Doctoral Thesis. D.Sc. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2019.

OLIVEIRA, W. C. Estudo e Avaliação das Proteções de Lines de Transmissão 500kV da Eletrobrás-Eletronorte localizadas na Subestação de Tucuruí. Final Project (Electrical Engineering Degree), Universidade Federal do Pará, Pará, 2010.

PASSOS FILHO, JOÃO ALBERTO. Modelagem e incorporação de dispositivos de controle no problema de fluxo de potência. Thesis (Master's degree), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFJF, Minas Gerais, 2000.

ROSENTINO JUNIOR, Arnaldo José Pereira et al. Estimativa dos esforços eletromecânicos em transformadores submetidos a um curto-circuito trifásico. Thesis (Master's degree), Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2010.

SATO, Fujito; FREITAS, Walmir. Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica. 1rd ed.; Elsevier: Rio de Janeiro, Brazil, 2015.

SOUZA, S. G. Apresentação e Aplicação do Software ANAFAS em estudo de Curto-Circuito. Final Project (Electrical Engineering Degree), Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2018.

VITTAL, Vijay et al. Power system control and stability. John Wiley & Sons, 2019.