



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS  
GERAIS

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA  
UTILIZANDO SOFTWARE POWERWORLD SIMULATOR

Wender Breno de Lima

ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA  
UTILIZANDO SOFTWARE POWERWORLD SIMULATOR

Trabalho apresentado como requisito  
parcial para a Conclusão do Curso de  
Bacharelado em Engenharia Elétrica do Centro  
Federal de Educação Tecnológica de Minas  
Gerais

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Me. Ítalo Arthur João Wilson Silva Meireles

---

Prof. Dr. Felipe de Souza Delgado

---

Prof. Me. Hérciner Vitor Ferreira

Nepomuceno, 11 de dezembro de 2023

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Luiz e Claudia,  
ao meu irmão, John,  
minha namorada Maria e  
à memória de Davi L. S. Oscar.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero expressar minha gratidão a Deus, por me guiar ao longo desses anos, proporcionando saúde, oportunidades e força para alcançar meus objetivos e superar todos os obstáculos encontrados durante o curso.

À minha família, deixo meu profundo agradecimento. Seu amor, encorajamento e apoio incondicional foram fundamentais em todos os momentos. Agradeço por estarem sempre ao meu lado, por acreditarem em mim, ter paciência nos momentos difíceis e por me incentivarem a perseguir meus sonhos.

A todo o corpo docente do CEFET-MG de Nepomuceno, por terem sabedoria e paciência para nos instruir, em especial ao professor Ítalo A. J. W. S. Meireles, por nos orientar com profissionalismo e dedicação, apoiando nas tomadas de decisão e dúvidas referentes ao trabalho de conclusão de curso, sendo não apenas um professor, mas também um amigo.

A professor Evandro J. Ribeiro também do CEFET-MG e sua falecida esposa Maria da Cruz que em um momento muito difícil me acolheram no colégio onde me proporcionaram o ensino médio digno que pude direcionar e alicerçar meus caminhos na engenharia elétrica.

Por fim, agradecemos a todas as outras pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Suas perspectivas, sugestões e apoio foram de grande valia.

"Em tudo, dai graças, porque esta é a vontade de  
Deus em Cristo Jesus para convosco."

(1 Tessalonicenses 5:18)

## RESUMO

O estudo em questão centra-se na análise de contingências, um tópico crucial para o planejamento e operação eficiente do Sistema Elétrico de Potência (SEP), focalizando-se no sistema IEEE-13 barras. O propósito primordial desta pesquisa reside na identificação e hierarquização das contingências críticas em linhas de transmissão, visando a determinação dos desligamentos que acarretam os impactos mais severos ao sistema, propiciando uma análise aprofundada de suas repercussões. Os índices de análise estão especificamente relacionados à tensão e potência, mediante a execução de simulações de fluxo de potência para contingências do tipo n-1. Os cenários analisados abrangem cargas sob impedância constante e potência constante. A concentração de nosso estudo se dá com o software PowerWorld Simulator em seu versão educacional. Através das interações de fluxo de potência, identificamos e avaliamos pontos críticos no sistema, destacando a importância da resiliência operacional. Inserimos um banco de capacitores automático para mitigar violações, evidenciando a eficácia da estratégia. Esta pesquisa desempenha um papel essencial na ampliação da compreensão das dinâmicas inerentes aos SEP, proporcionando a capacidade de identificar antecipadamente estratégias mitigatórias diante de desafios eminentes.

**Palavras chaves:** Contingências, Sistema Elétrico de Potência, IEEE-13 Barras, Fluxo de Potência, mitigação de falhas, Banco de Capacitores Automático.

## ABSTRACT

The study in question focuses on contingency analysis, a crucial element for the efficient planning and operation of the Power System (SEP), with a focus on the IEEE-13 bus system. The primary purpose of this research is to identify and prioritize critical contingencies in transmission lines, aiming to determine the outages that have the most significant impacts on the system, allowing for an in-depth analysis of their consequences. The analysis indices are directly related to voltage and power, through the execution of power flow simulations for n-1 contingencies. The analyzed scenarios involve loads with constant impedance and constant power. Our study focuses on the PowerWorld Simulator software in its educational version. Through power flow interactions, we identify and evaluate critical points in the system, emphasizing the importance of operational resilience. We introduce an automatic capacitor bank to mitigate violations, highlighting the effectiveness of the strategy. This research plays an essential role in expanding the understanding of the inherent dynamics of SEP, providing the ability to identify mitigating strategies in advance of imminent challenges.

**Keywords:** Contingencies, Power System, IEEE-13 Bus, Power Flow, Fault Mitigation, Automatic Capacitor Bank.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados iniciais do sistema para conexões i-k .....	41
Tabela 2 – Dados iniciais do sistema por barra .....	42
Tabela 3 – Tensões entre Fases Admissíveis a 60 Hz. ....	44
Tabela 4 – Percentual extra de carregamento FP de uma TL(i-k). ....	44
Tabela 5 – Dados do sistema com abertura da linha 7-8 .....	46
Tabela 6 – Dados de barras com abertura da linha 7-8.....	47
Tabela 7 – Dados do sistema com abertura da linha 8-9 .....	48
Tabela 8 – Dados de barras com abertura da linha 8-9.....	49
Tabela 9 – Dados do sistema com abertura da linha 9-6 .....	50
Tabela 10 – Dados de barras com abertura da linha 9-6.....	50
Tabela 11 – Dados do sistema com abertura da linha 6-4 .....	52
Tabela 12 – Dados de barras com abertura da linha 6-4.....	52
Tabela 13 – Dados do sistema com abertura da linha 6-4 e ajuste da barra 6 .....	54
Tabela 14 – Dados de barras com abertura da linha 6-4 e ajuste da barra 6.....	54
Tabela 15 – Dados do sistema com abertura da linha 5-4 .....	55
Tabela 16 – Dados de barras com abertura da linha 5-4.....	55
Tabela 17 – Dados do sistema com abertura da linha 5-4 e ajuste da barra 5 .....	57
Tabela 18 – Dados de barras com abertura da linha 5-4 e ajuste da barra 5.....	58
Tabela 19 – Dados do sistema com abertura da linha 7-5 .....	59
Tabela 20 – Dados de barras com abertura da linha 7-5.....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equivalente $\pi$ de uma linha de transmissão .....	20
Figura 2 – Tela inicial Powerworld Simulator .....	32
Figura 3 – Opções de Desenho PWS.....	33
Figura 4(a) e 4(b) – Inserção de barra no PWS .....	33
Figura 5(a) e 5(b) – Inserção de Gerador no PWS .....	34
Figura 6 – Opções de LT no PWS .....	34
Figura 7 – Inserção de Carga no PWS.....	35
Figura 8 – Inserção de Transformador no PWS .....	35
Figura 9 – Informações do Caso do Power World Simulator.....	36
Figura 10 – Simulação no PWS.....	36
Figura 11 – Sistema Teste IEEE-WSCC_9BUS .....	37
Figura 12 – Barra 1:Referência.....	39
Figura 13 – Malha destacada de estudo das contingências.....	40
Figura 14 – Localização dados de conexão i-k.....	40
Figura 15 – Coleta de dados da barra .....	42
Figura 16 – Case Information sistema inicial .....	43
Figura 17 – Case Information LT7-8.....	47
Figura 18 – Case Information LT8-9.....	49
Figura 19 – Case Information LT9-6.....	51
Figura 20 – Case Information LT6-4.....	53
Figura 21 – Instalação banco capacitores na barra 6 .....	53
Figura 22 – Case Information LT5-4.....	56
Figura 23 – Instalação banco capacitores na barra 5 .....	57
Figura 24 – Case Information LT7-5.....	60

## LISTA DE ABREVIATURAS

SEP	Sistemas Elétricos de Potência
PWS	Power World Simulator
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
LT	Linha de Transmissão
WSCC Coordinating Council)	Conselho de Coordenação do Sistema Oeste (Western Systems
ONS	Operador Nacional do Sistema
SIN	Sistema Interligado Nacional
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
FP	Fluxo de Potência
KW	Quilowatt
KVAR	Quilovolt-ampere reativo
Hz	Hertz

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
2.1 Sistema Elétrico de Potência .....	15
2.2 Fluxo de Potência .....	16
2.3 Matriz Y ou matriz admitância .....	18
2.4 Método de Newton-Raphson .....	19
2.5 Modelagem da linha de Transmissão .....	20
2.6 Métodos de resolução de fluxo de potência.....	21
2.7 Newton Raphson.....	22
2.8 Contingências no sistema elétrico de potência .....	25
2.9 Análise de contingências .....	26
2.9.1 Análise de contingências: Mitigação da violação.....	27
2.10 Modelagem do sistema elétrico de potência .....	28
2.10 PowerWorld e ANAREDE para Simulação de SEP.....	28
2.11 PowerWorld Simulator .....	31
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>37</b>
3.1 Visão Geral Da Proposta De Pesquisa.....	37
3.2 Seleção Da Contingência E Coleta De Dados .....	39
3.3 Critérios Para Contingências .....	43
3.4 Correção Para Caso Emergencial De Tensão .....	45
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>45</b>
4.1 Eliminação LT7-8 .....	46
4.2 Eliminação LT8-9 .....	48
4.3 Eliminação LT 9-6 .....	50
4.4 Eliminação LT 6-4 .....	51

4.4.1 Eliminação LT 6-4: Mitigação Da Falha .....	53
4.5 Eliminação LT 5-4 .....	55
4.5.1 Eliminação LT 5-4: Mitigação Da Falha .....	56
4.6 Eliminação LT 7-5 .....	58
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No início do século XIX, os sistemas de potência eram predominantemente isolados, operando de maneira individualizada à proporção do aumento de eletrificação começava a ganhar impulso durante a revolução industrial. Esses sistemas, muitas vezes limitados a áreas geográficas específicas, enfrentavam desafios na expansão para suprir o crescimento acelerado do meio energético, impulsionada pelo rápido crescimento urbano e industrial. (HENRIQUES, 2020).

A transição dos sistemas isolados para as interligações marcou uma evolução significativa nos sistemas de potência. As interligações não apenas possibilitaram a troca eficiente de energia entre diferentes companhias, mas também proporcionaram maior confiabilidade operacional. Em períodos de estiagem, por exemplo, sistemas que dependem predominantemente de usinas hidroelétricas podem continuar trabalhando continuamente, obtendo energia de outras fontes interconectadas e vice-versa.

Esse movimento para a interconexão trouxe consigo desafios técnicos substanciais, incluindo a necessidade de desenvolver tecnologias de transmissão de alta tensão para efetivamente conectar vastas áreas geográficas. No entanto, as interligações não só resolveram desafios operacionais imediatos, mas também abriram caminho para a diversificação da matriz energética e otimização da eficiência do sistema. (HENRIQUES, 2020).

O SEP é um conjunto complexo que conecta geradores, transmissores e distribuidores de energia elétrica. A análise dos eventos aleatórios do sistema de potência é muito importante para garantir a segurança e confiabilidade do sistema, pois pode ser utilizada para identificar e avaliar possíveis falhas e eventos indesejados que possam ameaçar a operação do sistema.

Papel central do suprimento de eletricidade à sociedade e é responsável pela transmissão e distribuição segura e confiável de eletricidade. No entanto, este sistema pode sofrer alguns eventos inesperados que podem causar interrupções e prejudicar o seu desempenho.

A análise de contingência desempenha uma função vital ao antecipar, identificar e avaliar eventos inesperados que podem comprometer a operação eficiente e segura do sistema. Entendemos por contingências eventos não planejados, que abrangem desde falhas em equipamentos cruciais até curtos-circuitos imprevistos e flutuações súbitas na demanda de carga.

Ao explorar exemplos práticos, podemos visualizar a importância da análise de contingência. Considere, por exemplo, o impacto de uma falha em um transformador crucial durante um período de pico de demanda. Através da análise de contingência, é possível antecipar e mitigar os riscos associados a essa falha, implementando medidas preventivas, como manutenção preventiva programada, e medidas corretivas, como a reconfiguração automática do sistema para redistribuir a carga.

As medidas preventivas e corretivas não apenas garantem a segurança e confiabilidade imediata do sistema, mas também desempenham um papel essencial na prevenção de eventos catastróficos. A implementação de tecnologias avançadas, como inteligência artificial na análise de dados em tempo real, permite uma resposta proativa a contingências, antecipando potenciais problemas e ajustando dinamicamente a operação do sistema.

Além disso, a análise de contingência moderna não se limita apenas a eventos físicos, mas também abrange preocupações relacionadas à cibersegurança. A integração de estratégias de proteção contra ataques cibernéticos é essencial para garantir a resiliência do sistema elétrico em um ambiente digitalmente conectado.

Nos complexos sistemas elétricos de potência, a análise do FP desempenha um papel central na compreensão do comportamento dinâmico das redes e na garantia de sua estabilidade operacional. A maneira como a potência flui através dos componentes da rede é crítica para identificar pontos de estrangulamento, otimizar a distribuição de carga e assegurar que o sistema atenda às demandas crescentes de maneira eficiente.

No centro desta investigação encontra-se o software PowerWorld Simulator (PWS), uma ferramenta poderosa e versátil amplamente reconhecida por sua capacidade de modelagem precisa e interface amigável. O PWS oferece uma plataforma robusta para simulações detalhadas de FP, permitindo que os pesquisadores e engenheiros explorem cenários diversos e avaliem o desempenho do sistema em condições variáveis.

Dentro desse contexto, a pesquisa visa não apenas a identificação de padrões de FP sob condições normais, mas também a exploração desses padrões diante de contingências. A aplicação do FP Simulado no PWS será investigada como uma ferramenta capaz de analisar o desempenho do SEP em face de eventos inesperados. A pesquisa almeja não só demonstrar a aplicabilidade dessa abordagem inovadora em situações convencionais, mas também sob

condições adversas, possibilitando uma compreensão mais completa do comportamento do sistema.

Avaliações de contingências ganham destaque, pois representa uma parte crucial desta pesquisa. Contingências, que englobam falhas de equipamentos, eventos adversos e variações abruptas na demanda, são inerentemente desafiadoras para os SEP. A capacidade do PWS em simular o FP em condições contingenciais será examinada, proporcionando insights valiosos sobre como o sistema se comporta e quais medidas preventivas e corretivas podem ser implementadas para manter a estabilidade.

Em resumo, esta pesquisa busca não apenas explorar as capacidades do PWS na análise do FP, mas também enfatizar sua utilidade em cenários desafiadores, como eventos de contingência. Através de simulações detalhadas e estudos de caso práticos, pretendemos oferecer uma contribuição significativa para o entendimento e aprimoramento dos SEP, tornando-os mais robustos e resilientes diante de adversidades imprevista.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Sistema Elétrico de Potência**

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) representa um conjunto de elementos cuja finalidade consiste na geração, transmissão e distribuição da energia elétrica, abrangendo desde as instalações geradoras até os pontos de consumo. É imperativo que o SEP mantenha níveis adequados de tensão e frequência dentro de margens aceitáveis. No entanto, a estabilidade desses parâmetros, embora essencial, apresenta-se como um fenômeno intrincado e desafiador. No contexto do século XXI, os SEP são compelidos a operar em proximidade de seus limites de estabilidade, ampliando a complexidade dessa avaliação. (KUNDUR, 1994).

Para garantir o correto funcionamento do sistema elétrico, faz necessário definir e aprimorar conceitos acerca da segurança, de maneira a garantir que os sistemas operem com uma probabilidade aceitável de operar satisfatoriamente ao longo do tempo. Avaliações mais rigorosas e novos requisitos são necessários em um novo ambiente competitivo. Seguindo esta

necessidade, definiu-se uma ferramenta conceitual que seria capaz de avaliar o grau de segurança de um sistema, dado um ponto de operação. Através dessa ferramenta conceitual, é possível avaliar as condições em que o sistema está operando, considerando as diferentes abordagens de estabilidade, bem como outros critérios de qualidade de operação. Para tanto no âmbito da operação, um sistema seguro é aquele no qual os critérios de operação são respeitados nas condições pré e pós-contingenciamento. (MORISON; WANG; KUNDUR, 2004).

Diante da crescente complexidade do panorama elétrico global, é imperativo destacar a necessidade contínua de inovação em métodos de avaliação de estabilidade. A ferramenta conceitual proposta desempenha um papel crucial nesse contexto, sendo capaz de considerar não apenas os tradicionais critérios de estabilidade, mas também adaptar-se dinamicamente às mudanças nas condições operacionais, como a crescente variabilidade associada às fontes renováveis intermitentes.

Além disso, ao examinar a definição de um sistema seguro, podemos explorar como os sistemas elétricos estão se adaptando para cumprir critérios operacionais não apenas antes de contingências, mas também após eventos inesperados. Essa evolução é essencial no cenário atual, onde a resiliência e a capacidade de recuperação rápida tornaram-se aspectos críticos da operação segura dos sistemas elétricos.

## **2.2 Fluxo de Potência**

Os estudos referentes ao fluxo de potência desempenham um papel crucial no planejamento estratégico para a expansão e operação dos sistemas elétricos de potência. A análise do fluxo fornece dados fundamentais que capacitam o sistema a operar em condições mais seguras e confiáveis, conforme destacado por Stevenson (1986).

A determinação do fluxo de potência no sistema requer a solução de uma série de equações algébricas não lineares que modelam o sistema em regime estático. Tipicamente, essa computação é conduzida por meio de métodos computacionais, especialmente em análises de fluxo de carga mais complexas, onde as equações associadas às injeções de potência ativa e reativa, assim como às tensões nas barras do sistema, adquirem dimensões consideráveis (MONTICELLI, 1983).

A explicação é clara e técnica, abordando a necessidade de métodos computacionais na análise de fluxo de carga mais complexa, justificando a escolha desses métodos diante da complexidade das equações envolvidas.

Destacamos aqui a necessidade de métodos computacionais para lidar com análises mais complexas. A referência a Stevenson (1986) fornece suporte à relevância desses estudos ao longo do tempo. No entanto, sugiro a inclusão de informações sobre as aplicações práticas desses estudos, proporcionando uma visão mais abrangente sobre sua importância operacional (MONTICELLI, 1983).

Na formulação básica do problema quatro variáveis são atribuídas a cada barra da rede, sendo duas delas conhecidas e as outras duas incógnitas (MONTICELLI, 1983).

De acordo com MONTICELLI, 1983; para uma barra (nó) genérica  $k$ , as variáveis são listadas a seguir:

- $V_k$ : tensão na barra  $k$
- $\theta_k$ : ângulo na barra  $k$
- $P_k$ : potência ativa barra  $k$
- $Q_k$ : potência reativa líquida na barra  $k$

Dependendo de quais são as duas variáveis conhecidas, a barra  $k$  pode ter três classificações distintas:

- A barra Swing: são conhecidos  $V_k$  e  $\theta_k$  e as variáveis  $P_k$  e  $Q_k$  são calculadas. Essa barra é utilizada para suprir as perdas do sistema que não são representadas nas equações de FP, além de fornecer a referência angular do sistema.

- Barra PQ: são conhecidos  $P_k$  e  $Q_k$  e as variáveis  $V_k$  e  $\theta_k$  são calculadas. Essa barra é utilizada para representar a barra de carga.

- Barra PV: são conhecidos  $P_k$  e  $V_k$  e as variáveis  $Q_k$  e  $\theta_k$  são calculadas. Representa a barra de geração (incluindo compensadores síncronos).

Esses são os tipos de barras utilizadas na formulação básica e são as mais frequentes e importantes no cálculo de fluxo de carga, entretanto existem algumas situações particulares em que outros tipos de barras podem ser utilizados (PQV, P e V).

Geralmente, para o estudo do FP o sistema é considerado equilibrado, logo só é utilizada a componente de sequência positiva. Além disso, esse estudo é baseado em um modelo nodal e utiliza a matriz de admitância de barra, pois ela é simétrica e esparsa o que demanda um menor esforço computacional se comparado à utilização da matriz de impedância de barra.

### 2.3 Matriz Y ou matriz admitância

A matriz  $Y_{BARRA}$  é de grande importância para o cálculo do FP, ela apresenta os termos presente nas equações que determinam o fluxo. A matriz admitância relaciona as tensões elétricas nodais com as correntes elétricas injetadas ao sistema através de geradores (BORGES, 2005).

$$I = Y.V \quad (1)$$

Onde:

$I$  - É o vetor de corrente na rede por fontes independentes ( $n \times 1$ );

$V$  - É o vetor de tensão nodal, desconsiderando a barra swing ( $n \times 1$ );

$Y$  - É a admitância de barras ( $n \times n$ );

$n$  - É o número de barras ou nós da rede.

É de grande importância levar em consideração algumas características dessa matriz como:

Simétrica;

Complexa;

Quadrada de dimensão  $n \times n$ , onde  $n$  representa o número de barras ou nós da rede;

Os componentes da diagonal principal são positivos;

Os componentes fora da diagonal principal são negativos;

Os elementos da diagonal  $Y_{kk}$  são o somatório das admitâncias ligadas à barra  $k$ ;

Os elementos fora da diagonal principal  $Y_{km}$  são o simétrico da soma das admitâncias entre as barras  $k$  e  $j$ .

## 2.4 Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson é amplamente reconhecido como um dos métodos numéricos mais eficazes com intuito de resolver sistemas de equações não-lineares em estudos de FP em sistemas elétricos de potência. Sua robustez é evidenciada pela convergência consistente em um número reduzido de iterações, tornando-o uma escolha popular na prática.

A vantagem marcante do método reside em sua independência em relação à dimensão do sistema e insensibilidade à escolha da barra de referência. Essa propriedade é especialmente relevante para sistemas elétricos complexos, onde a dimensionalidade dos sistemas pode variar consideravelmente.

No entanto, vale ressaltar que, para iniciar o processo iterativo, uma solução inicial precisa ser fornecida. A convergência do método está intrinsecamente ligada a essa escolha inicial. Se a solução inicial estiver significativamente distante da solução real do problema, existe o risco de divergência durante as iterações.

Uma prática comum é adotar a solução inicial conhecida como 'flat start' ou 'partida plana'. Nesse cenário, os ângulos das barras PQ e PV são fixados em zero, enquanto as tensões nas barras PQ são consideradas iguais a 1.0 p.u. Essa escolha é fundamentada na observação de que, em sistemas reais, os ângulos de barras PQ e PV geralmente são pequenos, e as tensões permanecem em torno de 1.0 p.u. O 'flat start', portanto, emerge como um ponto de partida eficiente para a solução iterativa, proporcionando uma boa aproximação para sistemas elétricos reais.

## 2.5 Modelagem da linha de Transmissão

A forma clássica utilizada para ilustrar uma linha de transmissão, é o modelo  $\pi$  ilustrado pela Figura 1.

Através da imagem é notório que uma LT comumente é constituída por três principais elementos: a resistência série ( $r$ ), a reatância série ( $x$ ) e susceptância em derivação shunt ( $b_{km\ sh}$ ). Assim tem-se a impedância e a admitância de uma linha nas Equações (2) e (3). (JUNIOR e CARVALHO, 2019).

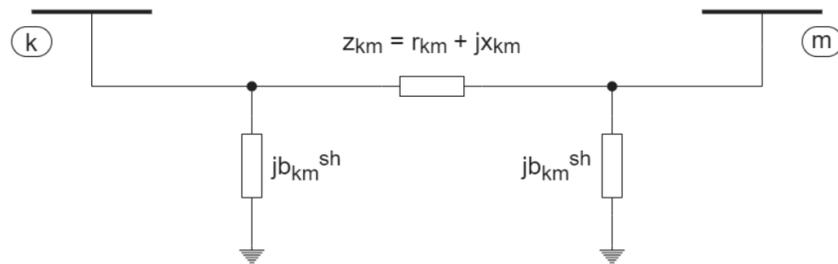


Figura 1 – Equivalente  $\pi$  de uma linha de transmissão

Fonte: Adaptado Grainger e Stevenson (1994)

$$z_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (2)$$

$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} \quad (3)$$

As Equações (4) e (5) dizem respeito as equações de potência líquida ativa e reativa em uma interligação  $ik$ . A ligação  $ik$  pode ser entendida de acordo com o somatório das potências entre um trecho de barras  $i$  e  $m$ .

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

$$Q_i = V_i \sum_{k=1}^n [V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})] \quad (5)$$

## 2.6 Métodos de resolução de fluxo de potência

Através das equações de potência apresentadas no item anterior, nota-se que para cada barra existente no sistema haverá duas equações não lineares, uma em função da potência ativa, Equação (4), e outra em relação a potência reativa, Equação (5).

Lembrando que  $P_i = P_{Gi} - P_{Di}$  e  $Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di}$  é considerado que as duas cargas  $P_{Di}$  e  $Q_{Di}$  são previamente conhecidas, então é possível concluir que existe quatro incógnitas ( $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$ ,  $V_i$  e  $\theta_i$ ) ou ( $P_i$ ,  $Q_i$ ,  $V_i$  e  $\theta_i$ ), e as duas equações, Equação (4) e Equação (5), para cada barra. Logo é necessário que duas destas variáveis tenham seus valores pré-estabelecidos. Em consequência disso é que surgem os três tipos de barra  $PQ$ ,  $PV$  e  $V\theta$ .

Com isso existem dois subsistemas de equações:

No primeiro subsistema pretende-se calcular  $V_i$  e  $\theta_i$  nas barras em que eles não foram especificados. Sabe-se que existem  $(n-1)$  barras onde  $\theta_i$  aparece como variável, e  $npq$  barras em que  $V_i$  é variável. Sabe-se também que em  $npq$   $Q_i$  é pré-estabelecido, enquanto que para  $P_i$  isso ocorre em  $(n-1)$ . Com isso conclui-se que o primeiro subsistema é composto de  $(n-1 + npq)$  conjunto não lineares, com mesmo número de incógnitas (MONTICELLI, 1983).

Que são representados por:

$$x = \begin{bmatrix} \theta \end{bmatrix}_{NPV} + \begin{bmatrix} V \end{bmatrix}_{NPQ} \quad (6)$$

Seja também, o vetor de funções não lineares:

$$g(x) = \begin{bmatrix} \Delta P \end{bmatrix}_{NPV} + \begin{bmatrix} \Delta Q \end{bmatrix}_{NPQ} \quad (7)$$

que é detalhado pelas equações abaixo:

$$\Delta P_i = P_i^{esp} - P_i = P_i^{esp} - V_i \sum_{k=1}^n [V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})] \quad (8)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{esp} - Q_i = Q_i^{esp} - V_i \sum_{k=1}^n [V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})] \quad (9)$$

No segundo subsistema, conhecidos  $V_i$  e  $\theta_i$  em todas as barras, é possível calcular  $Q_i$  e  $P_i$  nas barras  $V\theta$ , e  $Q_i$  nas barras  $PV$ , o que é feito tranquilamente (MONTICELLI, 1983).

## 2.7 Newton Raphson

Neste método o ponto central é determinar o vetor de correção  $\Delta x$ , o que exige a resolução do sistema linear abaixo, em que  $J$  representa a matriz jacobiana:

$$g(x^v) = -J(x^v)\Delta x^v \quad (10)$$

Neste caso, a ser determinado é o subsistema 1, tem -se:

$$g(x^v) = \begin{bmatrix} \Delta P^v \\ \Delta Q^v \end{bmatrix} \begin{matrix} \} NPV + NPQ \\ \} NPQ \end{matrix} \quad (11)$$

$$\Delta x^v = \begin{bmatrix} \Delta \theta^v \\ \Delta V^v \end{bmatrix} \begin{matrix} \} NPV + NPQ \\ \} NPQ \end{matrix} \quad (12)$$

$$J(x^v) = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta P)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta P)}{\partial V} \\ \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial \theta} & \frac{\partial(\Delta Q)}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Lembrando que  $P^{esp}$  e  $Q^{esp}$  são constantes e utilizando as equações (8) e (9). Nesse ponto torna-se possível reescrever a matriz jacobiana, vejamos a seguir:

$$J(x^v) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Contudo pode ser subdividida em submatrizes, H, N, M e L, como podemos ver a seguir:

$$\begin{aligned} H &= \frac{\partial P}{\partial \theta} & N &= \frac{\partial P}{\partial V} \\ M &= \frac{\partial Q}{\partial \theta} & L &= \frac{\partial Q}{\partial V} \end{aligned} \quad (15)$$

As Equações (15) e (14) em (10) a equação finalmente pode ser colocada como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^v \\ \Delta Q^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^v \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta^v \\ \Delta V^v \end{bmatrix} \quad (17)$$

As componentes da matriz jacobiana H, L, M e N, são calculadas utilizando as seguintes expressões:

$$H = \begin{cases} H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k \cdot V_m \cdot (G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km}) \\ H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (-G_{km} \cdot \text{sen} \theta_{km} + B_{km} \cdot \text{cos} \theta_{km}) \end{cases} \quad (18)$$

$$N = \begin{cases} N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k \cdot (G_{km} \cdot \cos\theta_{km} + B_{km} \cdot \sin\theta_{km}) \\ N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = 2 \cdot V_k \cdot G_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos\theta_{km} + B_{km} \cdot \sin\theta_{km}) \end{cases} \quad (19)$$

$$M = \begin{cases} M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k \cdot V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos\theta_{km} + B_{km} \cdot \sin\theta_{km}) \\ M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = V_k \cdot \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \cos\theta_{km} + B_{km} \cdot \sin\theta_{km}) \end{cases} \quad (20)$$

$$L = \begin{cases} L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k \cdot (G_{km} \cdot \sin\theta_{km} - B_{km} \cdot \cos\theta_{km}) \\ L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -2 \cdot V_k \cdot B_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_m \cdot (G_{km} \cdot \sin\theta_{km} - B_{km} \cdot \cos\theta_{km}) \end{cases} \quad (21)$$

Por fim com as Equações (18) a (20), pode-se concluir que se  $Y_{km} = B_{km} + G_{km}$  for nulo, então os elementos da matriz jacobiana  $H_{km}, M_{km}, N_{km}$  e  $L_{km}$  também serão elementos nulos, isso mostra que as matrizes  $H, M, N$  e  $L$  possuem as mesmas características de esparsidade que a matriz admitância.

Os passos a seguir compõem a sequência para solução de um problema com método de Newton:

Ler os dados do sistema;

Montar a matriz  $Y$ ;

Definir os tipos de barra e especificar os valores das variáveis que serão mantidas constantes;

Fazer  $v = 0$  e definir o chute inicial ( $x_0$ );

Calcular  $g(x^v)$  utilizando as equações (8) e (9);

Testar convergência: se  $Max \{|\Delta P_i|\} \leq \varepsilon$  e  $Max \{|\Delta Q_i|\} \leq \varepsilon$ , em que  $\varepsilon$  representa a tolerância admitida, verificar se o sistema converge caso contrário prosseguir para o passo vii;

Calcular matriz jacobiana;

Atualizar vetor  $x$ ;

Atualizar  $v$ , fazendo  $v = v + 1$  e retornar ao passo  $v$ ;

A execução do algoritmo ocorre geralmente por meio de técnicas de otimização, com o intuito de minimizar a função objetivo associada ao FP. Essa estratégia eficaz, juntamente com a natureza convexa e as características específicas do problema, contribuem para uma rápida convergência do algoritmo. Na prática, embora o problema de FP teoricamente admita várias soluções devido à sua natureza não linear, a realidade operacional dos sistemas elétricos favorece uma solução específica. Essa solução preferida muitas vezes destaca-se por atender a critérios rigorosos de segurança, eficiência e operação dentro de limites aceitáveis. Essa distinção, por vezes sutil, é crucial para assegurar a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico em diferentes condições.

Logo, destacando a importância de uma solução específica alinhada aos critérios operacionais do sistema. A menção à natureza não linear do problema e a preferência por soluções que atendam a critérios rigorosos acrescentam robustez à análise, evidenciando a consideração prática e a relevância na operação de sistemas elétricos.

## **2.8 Contingências no sistema elétrico de potência**

Com um ou mais eventos ocorrendo simultaneamente ou em diferentes instantes de tempo, com cada evento resultando em uma mudança no estado de um ou mais elementos do sistema. Ela pode ser iniciada por uma pequena perturbação, uma falta, ou uma ação de chaveamento, como por exemplo, abertura ou fechamento de disjuntores, inserção ou remoção de capacitor/reator shunt, inserção de capacitores série, saída de gerador, corte de carga, mudança de taps de transformadores ou conexão e operação de dispositivos FACTS (IEEE-PSSC, 1999).

É fundamental para o planejamento e operação do SEP que sejam levadas em consideração possíveis falhas no sistema, para que ele continue operando dentro de níveis adequados. No caso da ocorrência de contingências no sistema, com simulação e análise dos

resultados prévios, os operadores do sistema estarão preparados para tomarem ações de controle, afim de garantir o fornecimento de energia elétrica com qualidade e sem interrupções (LENTZ et al., 2019).

Num Sistema Elétrico de Potência (SEP), uma contingência ocorre quando há o desligamento ou saída inesperada de componentes do sistema, podendo ser categorizada como simples ou múltipla.

- i. Contingência Simples: Envolve a retirada de apenas um componente do sistema de operação, conhecido como critério N-1.
- ii. Contingência Múltipla: Nesse caso, diversas combinações de saídas simultâneas de componentes são consideradas.

Contingências comuns incluem a saída de linhas de transmissão ou transformadores, desligamento de unidades geradoras, saída de componentes shunt e desativação de carga (PINTO; PEREIRA, 1995).

## **2.9 Análise de contingências**

O sistema elétrico de potência, ao operar em regime permanente, está sujeito a restrições de segurança, que englobam uma série de contingências previamente estabelecidas (MONTICELLI, 1983).

A ocorrência súbita do desligamento de um componente do SEP caracteriza uma contingência, resultante de falhas ou eventos no sistema que acionam os dispositivos de proteção. As contingências prováveis no SEP incluem retirada de linhas de transmissão, desligamento de transformadores, abertura de uma extremidade da linha, assim como perda de geração, carga ou de um elemento shunt (PATAÇA, 2012).

A abordagem técnica utilizada na descrição das contingências no sistema elétrico de potência é precisa e clara. A ênfase na importância das simulações computacionais e na identificação de diversos cenários contribui para uma análise abrangente da segurança do sistema. As referências a Monticelli (1983) e Pataca (2012) fortalecem a fundamentação teórica. Desse modo, a análise de segurança, que consiste na simulação de um conjunto de contingências, é de grande importância para prever as condições de operação de um sistema

após a retirada de linhas, transformadores, ou geradores, podendo ocorrer contingências múltiplas ou simples. O resultado da análise determina se, após as contingências, o sistema continua operando em estado seguro ou em estado crítico (MONTICELLI, 1983).

### **2.9.1 Análise de contingências: Mitigação da violação**

Aprofundar a análise de contingências em SEP é fundamental para identificar e corrigir possíveis violações críticas, fortalecendo, assim, a resiliência operacional em face de condições adversas. Esta prática essencial permite avaliar o desempenho do sistema diante de situações anormais, garantindo a contínua segurança e confiabilidade da infraestrutura elétrica. Ao examinar detalhadamente as contingências, podemos desenvolver estratégias proativas para antecipar e gerenciar potenciais falhas, contribuindo para aprimorar a operação e a segurança do sistema elétrico como um todo:

- i. **Identificação de Violações Críticas:** Realizar uma análise abrangente das contingências, identificando possíveis violações de parâmetros operacionais, tais como sobrecargas em linhas de transmissão, quedas excessivas de tensão e outros desvios significativos das condições normais de operação;
- ii. **Desenvolvimento de Estratégias de Mitigação:** Proporcionar uma abordagem proativa para a mitigação de violações identificadas, explorando estratégias avançadas de controle e proteção. Isso incluirá o estudo da implementação eficiente de dispositivos de mitigação, como bancos de capacitores, dispositivos de comutação e outros mecanismos de controle;
- iii. **Otimização da Coordenação entre Dispositivos:** Investigar e otimizar a coordenação entre diferentes dispositivos de mitigação, visando uma resposta coordenada e rápida em tempo real durante situações de contingência. Isso contribuirá para a minimização do impacto dessas situações sobre a integridade e estabilidade do sistema;
- iv. **Contribuição para a Inovação em Contingências:** Buscar oportunidades de inovação no campo de contingências, propondo soluções que vão além das práticas convencionais. Isso pode incluir a aplicação de tecnologias emergentes,

algoritmos avançados e automação para aprimorar a capacidade de resposta do sistema diante de eventos inesperados;

- v. Metodologia: O estudo emprega uma metodologia abrangente, envolvendo simulações detalhadas de contingências em ambientes controlados. A análise de dados históricos e o uso de ferramentas de modelagem avançada permitirão uma avaliação precisa das violações potenciais e a validação das estratégias de mitigação propostas;
- vi. Conclusões Esperadas: Espera-se que o estudo não apenas aprofunde a compreensão das contingências em SEP, mas também ofereça contribuições valiosas para aprimorar as práticas de mitigação, fornecendo uma base sólida para a inovação contínua e aprimoramento da infraestrutura elétrica em cenários contingenciais.

## **2.10 Modelagem do sistema elétrico de potência**

A etapa crucial da modelagem do SEP é essencial para a análise de contingências, pois possibilita uma representação precisa e adequada dos componentes e interconexões do sistema, abrangendo tanto os aspectos dinâmicos quanto os de controle.

Nesse contexto, a modelagem engloba a representação minuciosa de geradores, linhas de transmissão, transformadores, cargas e outros elementos, assim como a inclusão dos dispositivos de proteção, controle e supervisão do sistema.

A precisão dessa modelagem é vital para garantir que as simulações e análises reflitam de maneira fiel o comportamento real do sistema elétrico, proporcionando insights valiosos para aprimorar sua operação e segurança.

## **2.10 PowerWorld e ANAREDE para Simulação de SEP**

O PowerWorld Simulator (PWS) é uma plataforma interativa de simulação de sistemas de energia projetada para modelar a dinâmica em alta tensão em intervalos que variam de minutos a vários dias. Este software abriga um pacote de análise de fluxo de energia altamente

eficiente, capaz de resolver sistemas complexos com até 250.000 barramentos (POWERWORLD, 2019).

A criação da simulação computacional teve início na década de 1990, quando o professor Thomas Overbye, da Universidade de Illinois, identificou a necessidade de uma ferramenta que proporcionasse uma compreensão mais aprofundada do funcionamento de grandes sistemas elétricos aos alunos. Alguns anos depois, em 1996, o professor Overbye e colegas fundaram a PowerWorld Corporation.

No momento, a organização conta com uma base de mais de 1.000 clientes distribuídos em 70 nações, englobando empresas de energia elétrica, operadores de sistemas independentes, agências governamentais, desenvolvedores de geração e transmissão, comerciantes de energia, consultores jurídicos e políticos, além de instituições acadêmicas (POWERWORLD, 2019). Assim, é crucial ressaltar que a capacidade do software transcende a mera investigação do fluxo de carga, proporcionando também a capacidade de explorar:

- i. Capacidade de modelagem detalhada, incluindo barras, linhas, geradores, transformadores e cargas;
- ii. Análise de Contingências;
- iii. Análise de Falhas;
- iv. Curvas PV e QV;
- v. Análise de Estabilidade Transitória;
- vi. Análise de FP;
- vii. Análise de curto-circuito;
- viii. Entre outras.

A interface gráfica intuitiva que facilita a modelagem e a visualização dos resultados. Suporte para análise de contingências e avaliação de confiabilidade. Entre as suas principais vantagens podemos destacar:

- i. Ampla gama de funcionalidades para análise e simulação.
- ii. Interface gráfica amigável, adequada para usuários iniciantes e avançados.
- iii. Ferramentas robustas para análise de estabilidade e FP.
- iv. Suporte contínuo e atualizações frequentes.

Contudo entre as desvantagens trata-se do seu licenciamento pode ser mais caro em comparação com algumas alternativas. Porém a versão educacional fornece os mesmos

recursos, porém limitado a 13 barras por sistema. Outro ponto que vale destacar é que pode demandar mais recursos de hardware para simulações complexas.

Na atualidade, a expansão do SEP exige melhores práticas para a sua operação. Através do programa computacional de Análise de Redes Elétricas (ANAREDE), é possível realizar cálculos de FP para análises de todo o Sistema Elétrico, com toda segurança necessária para gerar estudos posteriores. (CARVALHO; QUEZADA, 2021)

O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), desenvolveu o Software Análise de Redes Elétricas (ANAREDE) com intuito de proporcionar para as empresas do setor, novas técnicas, algoritmos e métodos eficientes. Deste modo, as adequações proporcionadas resultaram diretamente em facilidades para a geração e realização dos estudos de cálculo FP, praticamente de todas as áreas de operação e planejamento do Sistema Elétricos de Potência. No Brasil, o Software Análise de Redes Elétricas (ANAREDE) vem ganhando cada vez mais espaço. (CARVALHO; QUEZADA 2021)

Por meio do software especializado, o FP é empregado como uma ferramenta central para o controle efetivo do Fluxo de Energia na rede elétrica. O foco principal reside no cálculo do estado operativo da rede elétrica, proporcionando insights cruciais para a definição das condições de carga. Essas condições podem englobar tanto cargas de geração quanto restrições operacionais específicas.

A utilização do FP por meio do software demonstra a importância da análise detalhada do estado operativo da rede elétrica, considerando diversos cenários de carga e restrições operacionais. Essa abordagem oferece uma visão abrangente que contribui significativamente para a tomada de decisões assertivas no controle do Fluxo de Energia:

- i. Software nacional desenvolvido para análise de redes elétricas.
- ii. Modelagem de sistemas elétricos de potência, incluindo elementos como barras, linhas, transformadores e cargas.
- iii. Análise de FP, curto-circuito, entre outras funcionalidades.
- iv. Interface gráfica para facilitar a modelagem e visualização dos resultados.

Entre suas vantagens podemos destacar: desenvolvimento nacional, adaptado à realidade brasileira. Interface acessível para usuários com diferentes níveis de experiência. Ferramentas específicas para análise do sistema elétrico brasileiro.

Por outro lado, as desvantagens se dão em: limitadas funcionalidades avançadas em comparação com soluções globais. Pode não ter suporte tão abrangente quanto software mais amplamente utilizado.

Por fim podemos dizer que ambos os softwares oferecem recursos valiosos para a análise de sistemas elétricos de potência, cada um com suas vantagens e desvantagens. A escolha entre PWS e ANAREDE dependerá das necessidades específicas do usuário, do contexto da aplicação e dos recursos disponíveis. Para usuários brasileiros, a integração com padrões locais pode tornar o ANAREDE uma escolha especialmente relevante. Em contrapartida, o PWS é amplamente utilizado internacionalmente, proporcionando uma ampla variedade de funcionalidades e suporte técnico.

### **2.11 PowerWorld Simulator**

O PowerWorld Simulator (PWS) proporciona ferramentas avançadas voltadas para a análise de estabilidade transitória, contingências, otimização de sistemas, entre outras funcionalidades fundamentais. Estas ferramentas desempenham um papel crucial ao permitir análises mais detalhadas e específicas, contribuindo para a compreensão aprofundada do sistema.

Além disso, a utilização do PWS não apenas oferece benefícios técnicos, mas também abre portas para a integração e comunicação eficaz com outras instituições e pesquisadores que adotam a mesma ferramenta. Essa colaboração fortalece a troca de conhecimentos e experiências, ampliando as possibilidades de aprimoramento e inovação conjunta. Aprofundar-se nos recursos básicos do PWS se revela, assim, essencial para a criação e simulação eficiente de projetos complexos.

Destaca-se a importância do PWS como uma ferramenta abrangente, não apenas para análises técnicas, mas também para promover a colaboração e compartilhamento de conhecimentos na comunidade de pesquisa, evidenciando a sua relevância tanto no aspecto técnico quanto na integração com outros profissionais e instituições.

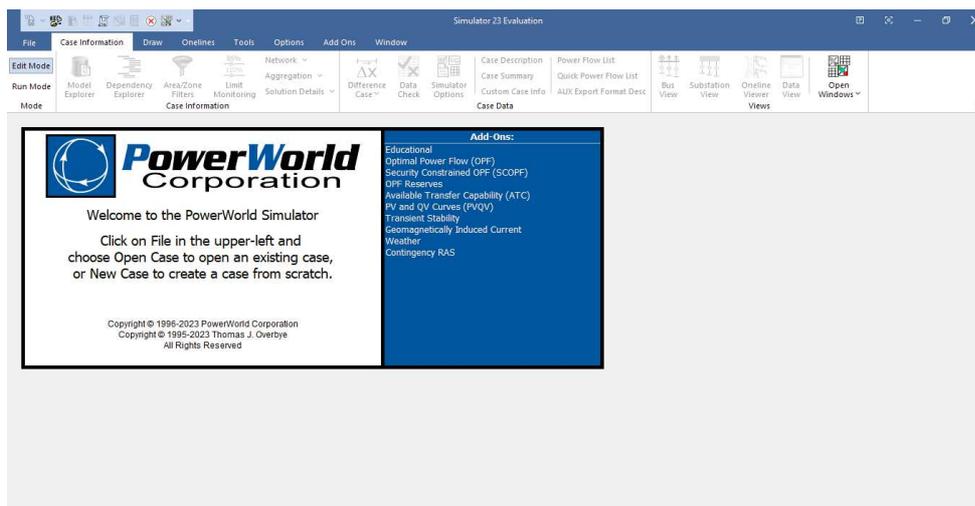


Figura 2 – Tela inicial Powerworld Simulator

Fonte: Do autor, 2023.

Ao utilizar o PowerWorld Simulator (PWS), é crucial compreender que ele opera em dois modos distintos, apresentando a opção de alternar entre eles diretamente na tela: *Edit Mode* e *Run Mode*.

- i. *Edit Mode*: Este modo permite a construção ou modificação de casos de simulação, oferecendo a capacidade de realizar alterações no sistema a ser simulado. No *Edit Mode*, é possível adicionar ou editar elementos no diagrama, definir a potência base, ajustar parâmetros de transformadores e linhas, e realizar outras edições essenciais.
- ii. *Run Mode*: Modo de execução utilizado para realizar a simulação real do sistema de potência. Este modo deve ser acionado quando o sistema em questão estiver pronto para ser simulado.

Para iniciar um novo projeto, é necessário acessar a barra *Draw* e selecionar a opção *Network*, onde estão disponíveis todos os elementos relacionados ao SEP. Conforme evidenciado na Figura 3.

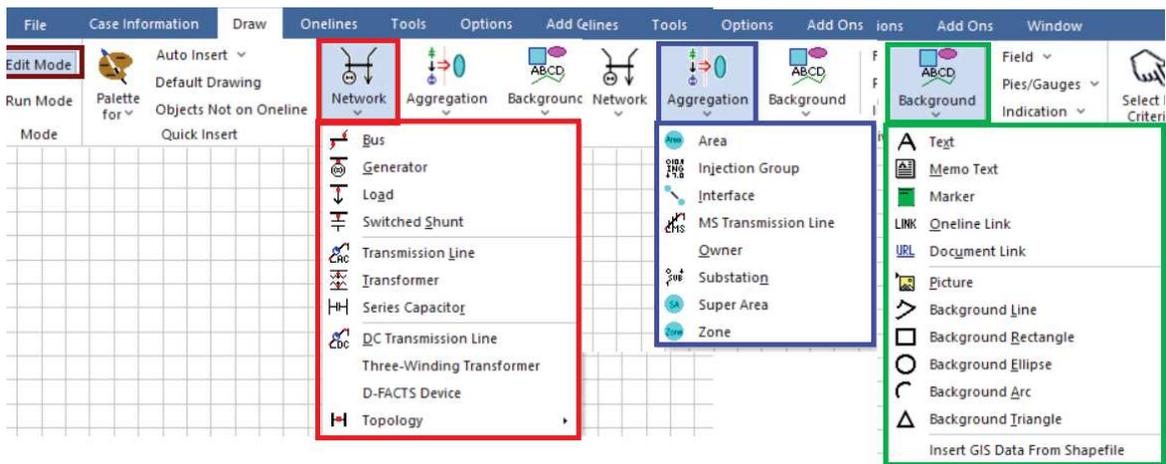


Figura 3 – Opções de Desenho PWS.

Fonte: Do autor, 2023

Cada elemento pode ser adicionado pelo *DRAW*, e logo abre a caixa de diálogo onde é possível para cada item detalhar suas características/parâmetros. Os principais componentes são fáceis de adicionar com uma interface muito interativa; como pode ser destacado pelas imagens a seguir:

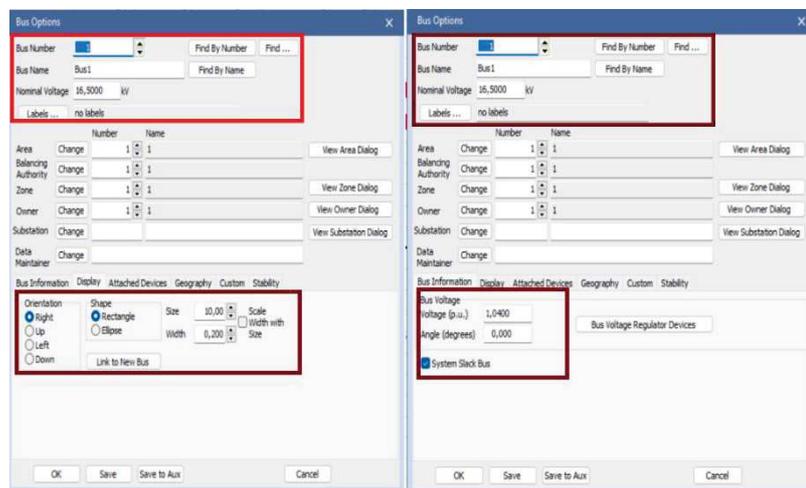


Figura 4(a) e 4(b) – Inserção de barra no PWS

Fonte: Do autor, 2023

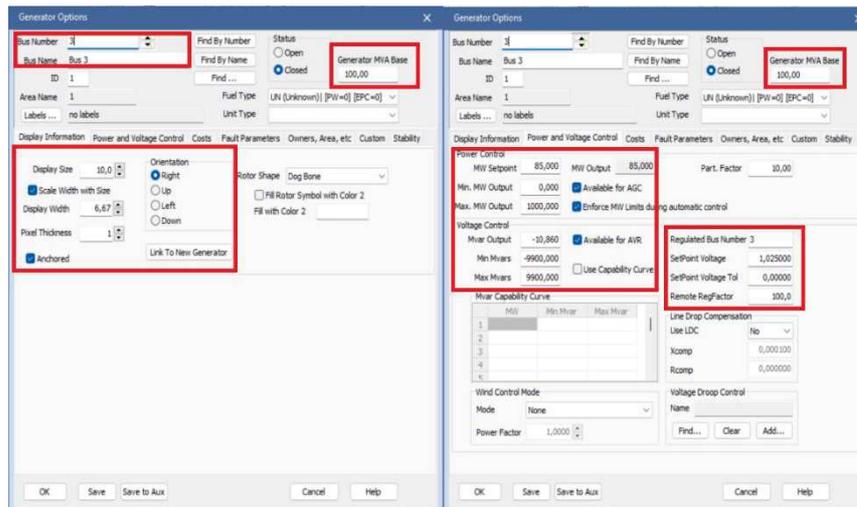


Figura 5(a) e 5(b) – Inserção de Gerador no PWS

Fonte: Do autor, 2023

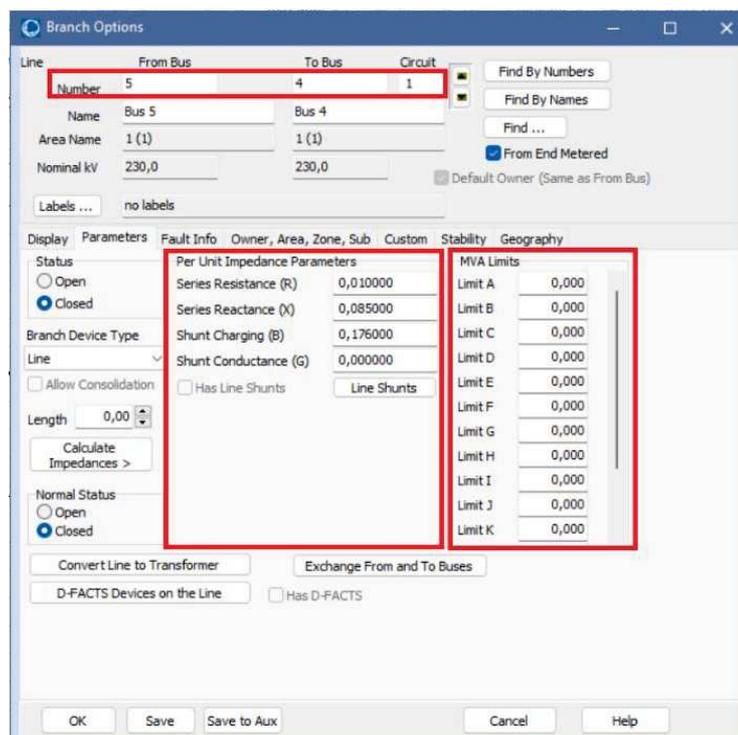


Figura 6 – Opções de LT no PWS

Fonte: Do autor, 2023

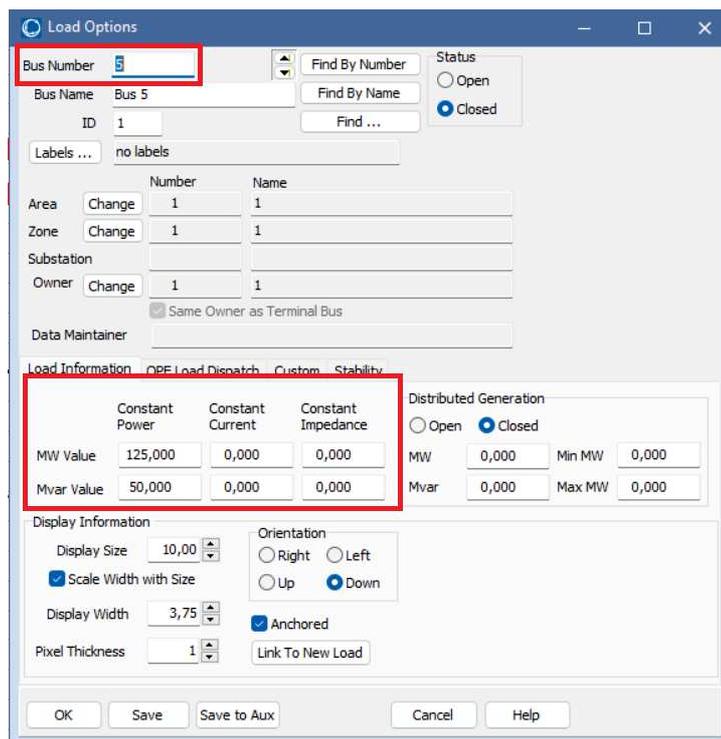


Figura 7 – Inserção de Carga no PWS

Fonte: Do autor, 2023

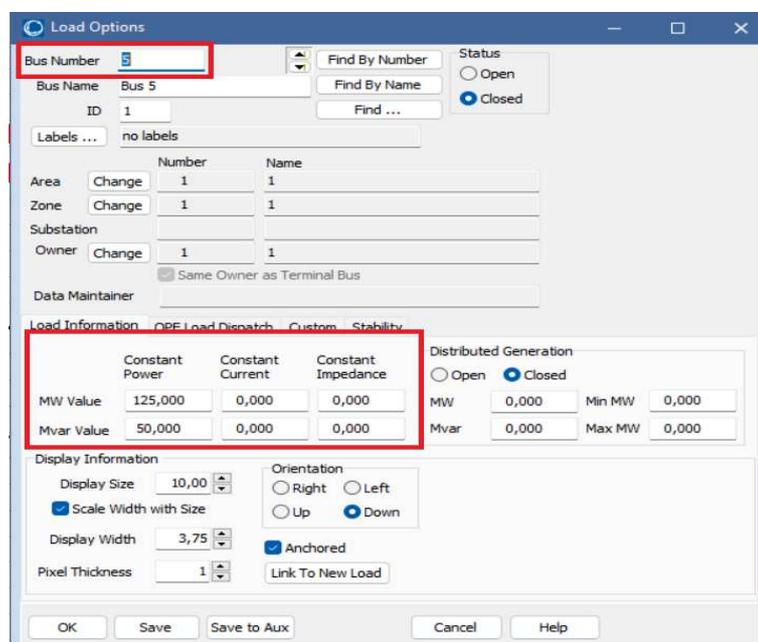


Figura 8 – Inserção de Transformador no PWS

Fonte: Do autor, 2023

Tanto na edição quando na simulação encontramos o *Case Information*, que separa dados e parâmetros do sistema em tempo “real”. Organizados em forma de tabela, os dados podem ser obtidos como exemplificado pela Figura 9.



Figura 9 – Informações do Caso do Power World Simulator

Fonte: Do autor, 2023

Para uma outra forma de detalhar o elemento durante a simulação, basta um duplo clique, logo a caixa de diálogo irá abrir, especifica para aquele item bem como mostrando suas conexões.

Para aplicar o método iterativo de Newton-Raphson no software, é preciso selecioná-lo na seção Tools -> Solve -> Solve Power Flow – Newton. Essa escolha permitirá a visualização dos dados de solução por meio do Model Explorer ou da interface gráfica, caso as informações relevantes do usuário sejam inseridas. Vamos analisar:

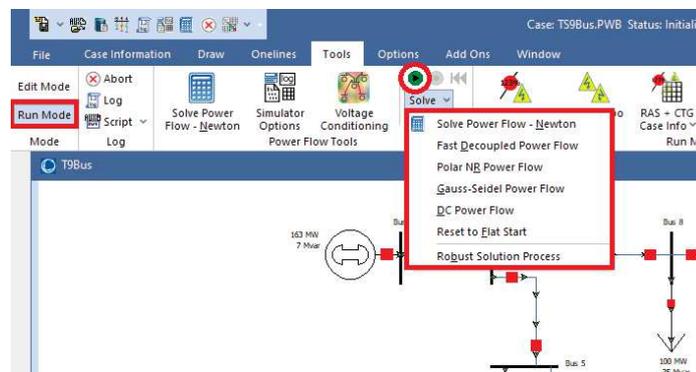


Figura 10 – Simulação no PWS

Fonte: Do autor, 2023.

Após esse passo sistema irá retornar o devido FP do sistema, com as setas se movimentando no sentido do mesmo.

As demais funções e detalhamento das mesmas aqui presentes podem ser verificados no manual do PWS ou também no pondo de ajuda presente no próprio software.

### 3 METODOLOGIA

A seguir, é delineada a estrutura dos procedimentos metodológicos desenvolvidos ao longo deste trabalho, os quais serão abordados na análise de contingências em Sistemas Elétricos de Potência (SEP).

#### 3.1 Visão Geral Da Proposta De Pesquisa

Municiados da versão educacional do PWS 23 para obtenção dos parâmetros essenciais à análise. A solução foi aplicada em um sistema elétrico IEEE de 9 barras, disponível na biblioteca do software. Este circuito compacto possibilita o controle e a rápida modificação de parâmetros que impactam a estabilidade de tensão do sistema. A representação do sistema IEEE de 9 barras no PowerWorld Simulator 23 pode ser observada na Figura 11.

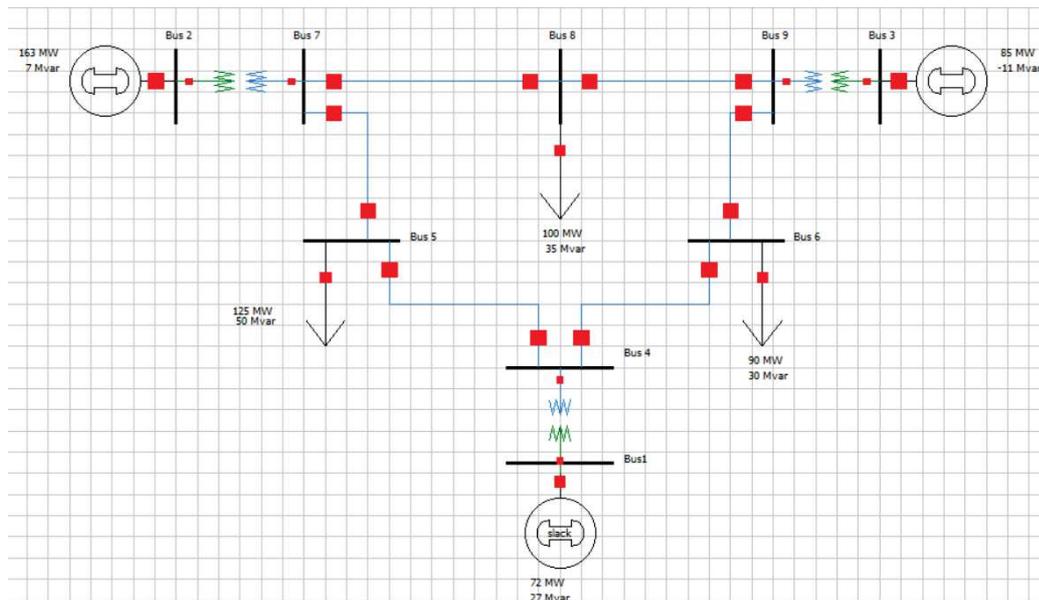


Figura 11 – Sistema Teste IEEE-WSCC\_9BUS

Fonte: Power World Sample Cases (2023)

Quadro 1 — Parâmetros do sistema IEEE 9 barras para o caso base

Barra	Tensão Base pu	Tensão (kV)	Ângulo (°)	Carga (MW)	Carga (MVar)	Geração (MW)	Geração (MVar)
1	1,040	17,160	0,000	0,000	0,000	71,640	27,040
2	1,025	18,450	9,280	0,000	0,000	163,000	6,650
3	1,025	14,145	4,660	0,000	0,000	85,000	-10,860
4	1,025	235,932	-2,217	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,995	228,997	-3,989	125,000	50,000	0,000	0,000
6	1,012	232,912	-3,688	90,000	30,000	0,000	0,000
7	1,025	235,928	3,720	0,000	0,000	0,000	0,000
8	1,015	233,654	0,727	100,000	35,000	0,000	0,000
9	1,032	237,442	1,967	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Do autor, 2023.

Quadro 2 — Impedâncias das linhas de transmissão do sistema

Linha	R( $\Omega$ )	X( $\Omega$ )
57	0,0320	0,1600
45	0,0100	0,0850
46	0,0170	0,0920
69	0,0390	0,1700
98	0,0119	0,1008
78	0,0085	0,0720

Fonte: Do autor, 2023.

Como pode ser visualizado nossa barra de referência é a barra 1,  $V=1,040pu$ , destacado na figura 12 indicado pela seta onde o campo *system slack bus* encontra-se marcado.

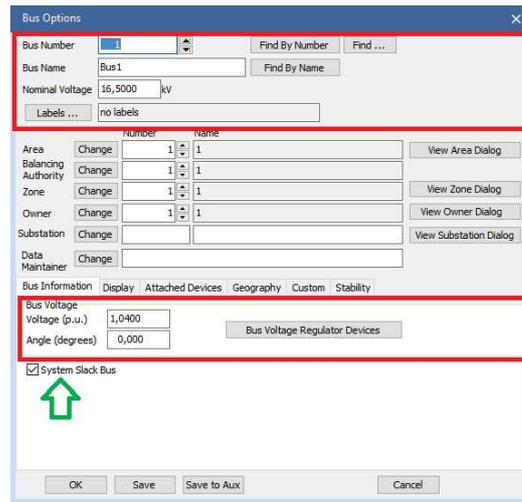


Figura 12 – Barra 1:Referência

Fonte: Do autor, 2023.

### 3.2 Seleção Da Contingência E Coleta De Dados

Conforme mencionado anteriormente, o caso de estudo encontra-se na biblioteca do PWS. Nesse sentido, o primeiro passo consiste em carregar o arquivo na barra de arquivos *files* e selecioná-lo, resultando na abertura da tela correspondente à Figura 11. Para iniciar a simulação, basta transitar do modo de edição para o modo de simulação (*Run Mode*), como mostrado na Figura 10.

Inicialmente, é imperativo definir as contingências simples a serem abordadas, visando identificar as características do circuito em face de diversos tipos de perdas em linhas de transmissão (LT). Com o objetivo de aprofundar nossa compreensão, optaremos por remover todas as intersecções da malha principal do sistema, observando rigorosamente o critério N-1. Essa abordagem permitirá uma análise mais minuciosa das consequências das perdas de LT no sistema elétrico, contribuindo para uma compreensão mais abrangente e informada das condições de operação.

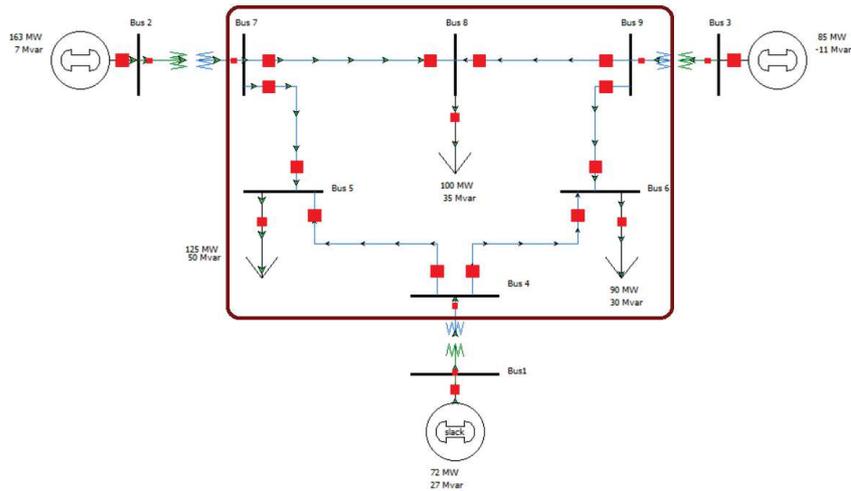


Figura 13 – Malha destacada de estudo das contingências

Fonte: Do autor, 2023.

A execução ocorre de maneira simples, conforme ilustrado na Figura 10. Neste ponto, é relevante ressaltar que o método de cálculo selecionado pelo PWS é o Método de Newton-Raphson. As setas que indicam o sentido do fluxo irão aparecer percorrendo as conexões.

Define-se para identificação dos fluxos a notação de i e k para referir-se as barras em questão, e composição da Tabela 1. São obtidos dado um duplo clique na conexão e assim obter as potencias ativas e reativas de cada barra i-k, como demonstrado pela Figura 14:

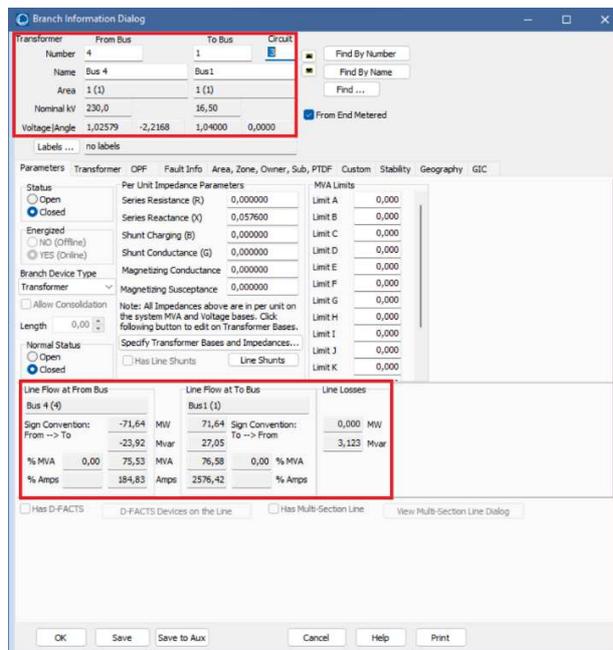


Figura 14 – Localização dados de conexão i-k

Fonte: Do autor, 2023.

Após a leitura de uma conexão é fechada a janela da conexão e se repete o processo para todas as conexões i-k da malha, efetuando assim o preenchimento completo da Tabela 1.

Tabela 1 - Dados iniciais do sistema para conexões i-k

Conexão i-k	FP Ativo barra i (MW)	FP Ativo barra k (MW)	Perdas Ativas (Mw)	FP Reativo i (MVar)	FP Reativo barra k (MVar)	Perdas Reativas (MVar)
1-4	71,640	-71,640	0,000	23,200	-27,050	3,123
2-7	163,000	-163,000	0,000	4,390	11,420	15,817
5-4	-40,620	40,880	0,266	-40,670	24,750	-15,921
6-4	-30,570	30,740	0,171	-18,430	2,760	-15,670
7-5	86,670	-84,380	2,287	-10,630	-9,320	-19,949
7-8	76,340	-74,860	0,473	-0,800	-10,760	-11,558
8-9	-24,140	24,230	0,088	-24,240	3,000	-21,235
9-3	-85,000	85,000	0,000	17,200	-13,080	4,125
9-6	60,780	-59,430	1,349	-20,200	-11,570	-31,774

Fonte: Do autor, 2023.

Onde:

- i e k: são número de barra do sistema;
- FP Ativo barra i (MW): Fluxo de potência ativa fornecida pela barra i;
- FP Ativo barra k (MW): Fluxo de potência ativa demandada pela barra k;
- Perdas Ativas (MW): Perdas de potência ativa consumida pela LT (i-k);
- FP Reativo barra i (MVar): Fluxo de potência reativa fornecida pela barra i;
- FP Ativo barra k (MVar): Fluxo de potência reativa demandada pela barra k;
- Perdas Reativas (MVar): Perdas de potência reativa consumida pela LT (i-k).

Vale destacar sobre a indicação dos sinais, onde o valor negativo de um fluxo indica que aquele ponto específico está absorvendo, no caso positivo ele está fornecendo.

Logo em seguida coletamos os dados de cada barra, seguindo o mesmo comando de duplo clique, como demonstrado na Figura 15, e obtendo o fluxo líquido da barra.

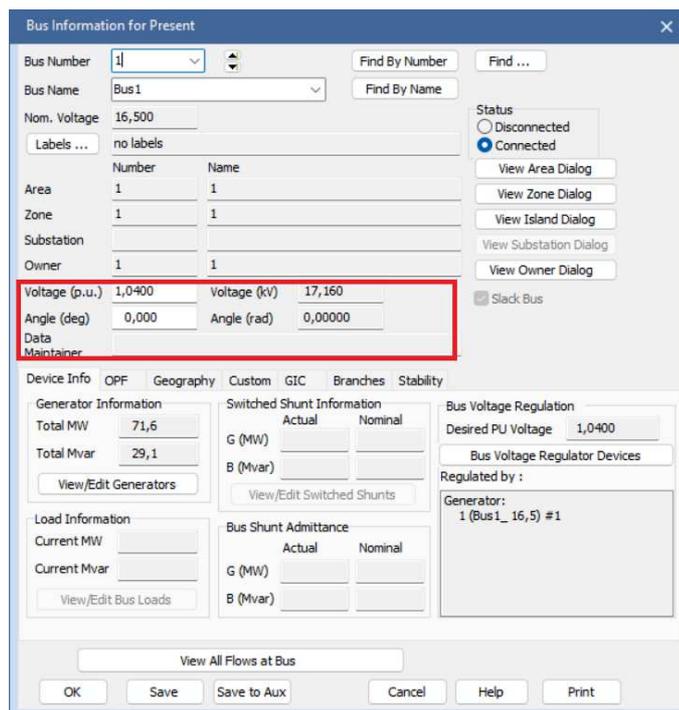


Figura 15 – Coleta de dados da barra

Fonte: Do autor, 2023.

A janela da barra permite alterar a barra e assim fazer a leitura de todas as 9 barras preenchendo assim toda a Tabela 2.

Tabela 2 – Dados iniciais do sistema por barra

Barra	Tensão pu	Tensão (kV)	Ângulo (°)	Queda Tensão (kV)
1	1,0400	17,160	0,00	0,660
2	1,0250	18,450	9,280	0,450
3	1,0250	14,145	4,660	0,345
4	1,0258	235,932	-2,217	5,932
5	0,9956	228,997	-3,989	-1,003
6	1,0127	232,912	-3,688	2,912
7	1,0258	235,928	3,720	5,928
8	1,0159	233,654	0,727	3,654
9	1,0324	237,442	1,967	7,442

Fonte: Do autor, 2023.

Ao realizar a simulação de contingências e coletar os dados resultantes, com foco na identificação de pontos críticos, limites operacionais e possíveis vulnerabilidades. As Tabelas 1 e 2 abordam a simulação do sistema em condições iniciais, enquanto os Quadros 1 e 2, representando os valores nominais, servirão como pontos de partida para as análises das contingências.

Uma visão geral pode ser observada no *Case Information* seguindo como orientado a Figura 9. Para o caso inicial temos a Figura 16.

Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
Bus1	1	16,50	1,04000	17,160	0,00			71,64	27,04
Bus 2	1	18,00	1,02500	18,450	9,28			163,00	6,65
Bus 3	1	13,80	1,02500	14,145	4,67			85,00	-10,86
Bus 4	1	230,00	1,02579	235,932	-2,22				
Bus 5	1	230,00	0,99564	228,997	-3,99	125,00	50,00		
Bus 6	1	230,00	1,01266	232,912	-3,69	90,00	30,00		
Bus 7	1	230,00	1,02577	235,928	3,72				
Bus 8	1	230,00	1,01589	233,654	0,73	100,00	35,00		
Bus 9	1	230,00	1,03236	237,442	1,97				

Figura 16 – Case Information sistema inicial

Fonte: Do autor, 2023.

### 3.3 Critérios Para Contingências

Recomenda-se a análise das contingências simples nas LTs com foco na observação do comportamento da tensão e de seus respectivos ângulos. Nesse contexto, é fundamental avaliar também o comportamento das potências, especialmente a potência reativa, a fim de compreender de maneira abrangente os efeitos dessas contingências no SEP.

De acordo com manual do PWS para garantir uma análise abrangente, propõe-se adotar uma margem de erro de 10% em relação aos valores nominais. Essa tolerância visa contemplar variações aceitáveis nos parâmetros do sistema durante a avaliação de contingências.

Contudo conforme critérios da ANEEL os valores de tensão a serem seguidos estão descritos pela Tabela 1:

Tabela 3 – Tensões entre Fases Admissíveis a 60 Hz.

Tensão nominal de operação	Condição operativa normal		Condição operativa de emergência	
	kV	pu	kV	pu
≤ 138	-	0,95 a 1,05	-	0,90 a 1,05
230	218 a 242	0,95 a 1,05	207 a 242	0,90 a 1,05
345	328 a 362	0,95 a 1,05	311 a 362	0,90 a 1,05
440	418 a 460	0,95 a 1,046	396 a 460	0,90 a 1,046
500	500 a 550	1,00 a 1,10	475 a 550	0,95 a 1,10
525	500 a 550	0,95 a 1,05	475 a 550	0,90 a 1,05
765	690 a 800	0,90 a 1,046	690	0,90 a 1,046

Fonte: ANEEL (2022)

Para os níveis de potência resistiva das LTs serão considerados os limites de geração e absorção de potência reativa e de tensão terminal definidos pelas curvas de capacidade das unidades geradoras e dos compensadores síncronos fornecidos pelos fabricantes dos mesmos, como o sistema estudo trata-se de um caso teste não temos tais dados, logo, vamos definir os critérios:

Tabela 4 – Percentual extra de carregamento FP de uma TL(i-k).

Percentual	Condição operativa
<100%	Normal
101% a 300%	Atenção
>301%	Emergencial

Elaborado: Do autor, 2023.

O critério será observado e referenciado pelo módulo dos valores de fluxo reativo da Tabela 1. Sendo que as barras 1, 2 e 3 não apresenta queda de tensão para o caso, logo não serão considerados nessa análise, restando avaliar as barras de 4 a 9.

Vale ressaltar que o software fornece a potência líquida nas barras, não sendo detalhado os valores de correção aplicada a mesma.

### 3.4 Correção Para Caso Emergencial De Tensão

De acordo com as Tabelas 3 e 4 havendo violação dos valores apresentados com auxílio do PWS será realizado a correção dos parâmetros. Especificamente com o próprio uso do PWS para que a barra que apresente violação tenha os parâmetros reestabelecidos para condição normal.

No PWS, no *edit mode* faz-se a inserção de um banco de capacitores. Após inserido adiciona as características do banco de acordo com as necessidades de compensação de potência reativa. Neste caso se adiciona um banco automático com potência nominal igual a da carga mais próxima. No PWS, é possível estabelecer critérios para acionamento automático com base em eventos como subtensão, utilizando funções condicionais ou relés virtuais.

Logo realiza um novo estudo da contingência em questão a fim de verificar a atuação com outros dispositivos de controle no sistema, evitando operações inadequadas ou conflitos. Observa-se como o banco de capacitores responde automaticamente, observando a melhoria na tensão na barra afetada com a inserção automática do banco de capacitores; verificando os ajustes para garantir uma resposta rápida e eficiente diante de diferentes condições operacionais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo dedica-se à análise de contingências em SEP, valendo-se do software PWS para simulação e avaliação. As contingências, representativas de eventos imprevistos em linhas de transmissão, possuem implicações substanciais na estabilidade operacional do sistema. Nesta pesquisa, direcionamos nossos esforços para identificar possíveis contingências e avaliar seus impactos críticos, analisando variáveis como tensão, ângulo e potência. Os dados obtidos foram organizados em tabelas que descrevem de maneira abrangente o comportamento do sistema em resposta às contingências, fornecendo insights valiosos para compreender, mitigar e aprimorar a resiliência desses sistemas fundamentais para o fornecimento de energia elétrica.

Tendo o diagrama da Figura 11, no *Run Mode* segue-se os passos para avaliar as contingências nas LTs. É executada abrindo o disjuncto da conexão i-k, conforme detalhado no item Seleção da contingência e coleta de dados. E comparando a resposta de cada contingência as tabelas 1 e 2.

#### 4.1 Eliminação LT7-8

A abertura da linha 7-8, redistribui o suprimento de potência aumentando o fluxo nas linhas 8-9 para manter a demanda da carga a ela ligada e demais linhas que interligam a barra 7 e barra 9. Onde temos como resultados os dados da Tabela 5 e Tabela 6, que representam respectivamente os dados da LT e os dados de barra.

Tabela 5 – Dados do sistema com abertura da linha 7-8

Conexão i-k	FP Ativo barra i (MW)	FP Ativo barra k (MW)	Perdas Ativas (Mw)	FP Reativo i (MVar)	FP Reativo barra k (MVar)	Perdas Reativas (MVar)
1-4	79,090	-79,090	0,000	40,190	-45,210	4,420
2-7	163,000	-163,000	0,000	17,530	-1,540	15,988
5-4	29,720	-29,350	0,372	-59,710	45,450	-14,266
6-4	-106,500	108,440	1,939	-0,890	-4,660	-5,550
7-5	163,000	-154,720	8,279	1,540	9,710	11,258
7-8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8-9	-100,000	101,350	1,348	-35,000	25,890	-9,112
9-3	-85,000	85,000	0,000	-19,440	23,780	4,345
9-6	-16,340	16,500	0,156	-6,440	-29,110	-35,553

Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 6 – Dados de barras com abertura da linha 7-8

Barra	Tensão pu	Tensão (kV)	Ângulo (°)	Queda Tensão (kV)
1	1,0400	17,160	0,000	0,660
2	1,0250	18,450	19,888	0,450
3	1,0250	14,145	-7,163	0,345
4	1,0159	233,659	-2,471	3,659
5	0,9736	223,935	-0,710	-6,065
6	0,9994	229,858	-8,077	-0,142
7	1,0192	234,409	14,292	4,292
8	0,9691	222,886	-15,633	-7,114
9	1,0126	232,893	-9,913	2,893

Fonte: Do autor, 2023.

Com os dados da imagem a seguir e com as tabelas apresentadas anteriormente, podemos verificar que ao abrir a linha 7-8.

Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
Bus1	1	16,50	1,04000	17,160	0,00			79,09	45,21
Bus 2	1	18,00	1,02500	18,450	19,89			163,00	17,53
Bus 3	1	13,80	1,02500	14,145	-7,16			85,00	23,79
Bus 4	1	230,00	1,01591	233,658	-2,47				
Bus 5	1	230,00	0,97363	223,935	-0,71	125,00	50,00		
Bus 6	1	230,00	0,99938	229,856	-8,08	90,00	30,00		
Bus 7	1	230,00	1,01917	234,409	14,29				
Bus 8	1	230,00	0,96904	222,880	-15,63	100,00	35,00		
Bus 9	1	230,00	1,01256	232,890	-9,91				

Figura 17 – Case Information LT7-8

Fonte: Do autor, 2023.

Ao verificara Tabela 6 podemos constatar que nenhuma das barras excedeu os limites estabelecidos pela Tabela 3, sendo que a barra 7 apresentou o aumento de tensão com 1,92% pu e a barra 8 apresentou a queda de 3,09% pu.

Já as conexões querer atenção com 7-2 pode-se verificar que a barra 2 apresentou uma violação de 399,31% de reativo e barra 7 de 741,55%, sendo amplas classificadas como emergencial. Para a conexão 9-3 apontamos potência ativa aumento superior a 400% e reativo

na barra 3 de 863%, também todas com caráter emergencial. Podem ser verificados pelos dados de geração apresentados na Figura 18.

O sentido de fluxo se inverteu nas conexões 5-4 e 9-6. Com os dados obtidos e validação pelo PWS a contingência é aceitável, pois mesmo com altos índices de reativo o sistema se manteve em operação.

#### 4.2 Eliminação LT8-9

A abertura da linha 8-9, redistribui o suprimento de potência aumentando o fluxo nas linhas 7-8 para manter a demanda da carga a elas ligadas e demais linhas que interligam a barra 7 e barra 9. Onde temos como resultados os dados da Tabela 7 e Tabela 8, que representam respectivamente os dados da LT e os dados de barra.

Tabela 7 – Dados do sistema com abertura da linha 8-9

Conexão i-k	FP Ativo barra i (MW)	FP Ativo barra k (MW)	Perdas Ativas (Mw)	FP Reativo i (MVar)	FP Reativo barra k (MVar)	Perdas Reativas (MVar)
1-4	71,640	-71,640	0,000	27,050	-23,920	3,123
2-7	163,010	-163,010	0,000	29,750	-13,420	16,334
5-4	-64,160	64,680	0,512	-40,090	26,390	-13,693
6-4	-7,620	7,670	0,051	-24,020	7,780	-16,240
7-5	62,040	-60,840	1,203	-14,860	-9,910	-24,777
7-8	100,700	-100,020	0,954	28,280	-34,990	-6,705
8-9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9-3	-85,000	85,550	0,000	20,160	-15,990	4,172
9-6	85,010	-82,380	2,630	-20,160	-5,980	-26,147

Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 8 – Dados de barras com abertura da linha 8-9

Barra	Tensão pu	Tensão (kV)	Ângulo (°)	Queda Tensão (kV)
1	1,0400	17,160	0,000	0,660
2	1,0250	18,450	7,327	0,450
3	1,0250	14,145	9,269	0,345
4	1,0303	236,958	-1,114	6,958
5	0,9957	229,021	-3,986	-0,979
6	1,0146	233,349	-1,351	3,349
7	1,0118	232,703	1,689	2,703
8	0,9801	225,431	-2,338	-4,569
9	1,0353	238,114	6,578	8,114

Fonte: Do autor, 2023.

Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
Bus1	1	16,50	1,04000	17,160	0,00			72,35	35,91
Bus 2	1	18,00	1,02500	18,450	7,33			163,00	29,75
Bus 3	1	13,80	1,02500	14,145	9,27			85,00	-15,99
Bus 4	1	230,00	1,03025	236,958	-1,11				
Bus 5	1	230,00	0,99574	229,021	-3,99	125,00	50,00		
Bus 6	1	230,00	1,01456	233,349	-1,35	90,00	30,00		
Bus 7	1	230,00	1,01175	232,703	1,69				
Bus 8	1	230,00	0,98014	225,431	-2,34	100,00	35,00		
Bus 9	1	230,00	1,03528	238,114	6,58				

Figura 18 – Case Information LT8-9

Fonte: Do autor, 2023.

Ao verificar a Tabela 8 podemos constatar que nenhuma das barras excedeu os limites estabelecidos pela Tabela 3, sendo que a barra 9 apresentou o aumento de tensão com 3,53% pu e a barra 8 apresentou a queda de 1,99% pu.

Já as conexões querer atenção com 7-2 pode-se verificar que a barra 2 apresentou uma violação de 677,67% de reativo sendo ampla classificada como emergencial. Para a conexão 7-8 a potência reativa teve aumento superior a 300 classificada emergencial. Podem ser verificados pelos dados de geração apresentados na Figura 19.

O sentido de fluxo não se inverteu em nenhuma conexão. Com os dados obtidos e validação pelo PWS a contingência é aceitável, pois mesmo com altos índices de reativo o sistema não entrou em colapso.

### 4.3 Eliminação LT 9-6

A abertura da linha 9-6, redistribui FP mantendo a demanda da carga a ela ligada. Temos como resultados os dados da Tabela 9 e Tabela 10, que representam respectivamente os dados da LT e os dados de barra.

Tabela 9 – Dados do sistema com abertura da linha 9-6

Conexão i-k	FP Ativo barra i (MW)	FP Ativo barra k (MW)	Perdas Ativas (Mw)	FP Reativo i (MVAr)	FP Reativo barra k (MVAr)	Perdas Reativas (MVAr)
1-4	76,490	-76,490	0,000	65,320	-59,940	5,388
2-7	163,000	-163,000	0,000	18,180	-2,180	16,001
5-4	15,430	-15,160	0,272	-57,200	41,840	-15,344
6-4	-89,980	91,490	1,515	-29,980	22,320	-7,664
7-5	147,130	-140,410	6,717	-4,010	7,210	3,196
7-8	15,870	-15,830	0,036	6,190	-21,180	-14,988
8-9	-84,170	84,000	0,831	-13,820	-0,710	-14,531
9-3	-85,000	85,000	0,000	0,710	3,330	4,036
9-6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 10 – Dados de barras com abertura da linha 9-6

Barra	Tensão pu	Tensão (kV)	Ângulo (°)	Queda Tensão (kV)
1	1,0400	17,160	0,000	0,660
2	1,0250	18,450	19,929	0,450
3	1,0250	14,145	20,172	0,345
4	1,0217	234,988	-1,183	4,988
5	0,9809	225,599	-0,158	-4,401
6	0,9820	225,858	-5,701	-4,142
7	1,0188	234,319	13,330	4,319

8	1,0077	231,763	12,759	1,763
9	1,0243	235,579	17,452	5,579

Fonte: Do autor, 2023.

Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
Bus1	1	16,50	1,04000	17,160	0,00			76,37	66,95
Bus 2	1	18,00	1,02500	18,450	18,93			163,00	18,18
Bus 3	1	13,80	1,02500	14,145	20,17			85,00	3,33
Bus 4	1	230,00	1,02168	234,986	-1,19				
Bus 5	1	230,00	0,98085	225,595	-0,16	125,00	50,00		
Bus 6	1	230,00	0,98195	225,850	-5,70	90,00	30,00		
Bus 7	1	230,00	1,01877	234,318	13,33				
Bus 8	1	230,00	1,00766	231,762	12,76	100,00	35,00		
Bus 9	1	230,00	1,02425	235,578	17,45				

Figura 19 – Case Information LT9-6

Fonte: Do autor, 2023.

Ao verificar a Tabela 9 podemos constatar que nenhuma das barras excedeu os limites estabelecidos pela Tabela 3, sendo que a barra 9 apresentou o aumento de tensão com 2,43% pu e a barra 5 apresentou a queda de 1,91% pu.

Já as conexões 4-1, apresentou uma violação de abaixo de 300% de reativo sendo determinada atenção. Para a conexão 6-4 a potência reativa teve aumento superior a 800 classificada emergencial e potência ativa de 294% que determina atenção. A conexão 7-8 em FP reativo da barra 7 uma violação próxima a 700%, contudo para barra 8 inferiores a 200%, conclui-se que o valor próximo a 700% está associado a baixa contribuição da mesma para a contingência em questão. Na conexão 8-9 a variação de 348% de potência ativa, sendo classificada para ter atenção. Os altos índices de reativo e ativo podem ser verificados pelos dados de geração apresentados na Figura 20.

O sentido de FP reativo se inverteu na conexão 5-4. Com os dados obtidos e validação pelo PWS a contingência é aceitável, pois mesmo com as variações apresentadas o sistema segue atendendo as cargas.

#### 4.4 Eliminação LT 6-4

Com abertura da LT 6-4 os fluxos se reordenam e temos como dados a Tabela 11 e Tabela, com dados do FP do sistema e dados de barras respectivamente.

Tabela 11 – Dados do sistema com abertura da linha 6-4

Conexão i-k	FP Ativo barra i (MW)	FP Ativo barra k (MW)	Perdas Ativas (Mw)	FP Reativo i (MVar)	FP Reativo barra k (MVar)	Perdas Reativas (MVar)
1-4	73,140	-73,140	0,000	22,770	-19,640	3,125
2-7	163,000	163,000	0,000	10,730	5,140	15,874
5-4	-72,530	73,120	0,589	-34,620	21,360	-13,256
6-4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7-5	53,340	-52,470	0,875	-11,630	-15,380	-27,012
7-8	109,660	-108,670	0,993	6,490	-13,430	-6,947
8-9	8,670	-8,650	0,023	-21,570	0,350	-21,211
9-3	-85,000	85,000	0,000	-11,840	16,020	4,173
9-6	93,650	-90,000	3,650	11,490	-30,000	-18,510

Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 12 – Dados de barras com abertura da linha 6-4

Barra	Tensão pu	Tensão (kV)	Ângulo (°)	Queda Tensão (kV)
1	1,0400	17,160	0,000	0,660
2	1,0250	18,450	5,906	0,450
3	1,0250	14,145	-1,817	0,345
4	1,0339	237,786	-1,122	7,786
5	1,0031	230,716	-4,388	0,716
6	0,9422	216,699	-13,411	-13,301
7	1,0233	235,358	0,332	5,358
8	1,0070	230,611	-3,994	0,611
9	1,0170	233,912	-4,556	3,912

Fonte: Do autor, 2023.

Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
Bus1	1	16,50	1,04000	17,160	0,00			73,13	22,93
Bus 2	1	18,00	1,02500	18,450	5,91			163,00	10,73
Bus 3	1	13,80	1,02500	14,145	-1,82			85,00	16,02
Bus 4	1	230,00	1,03385	237,785	-1,12				
Bus 5	1	230,00	1,00311	230,715	-4,39	125,00	50,00		
Bus 6	1	230,00	0,94217	216,699	-13,41		90,00		
Bus 7	1	230,00	1,02329	235,358	0,33				
Bus 8	1	230,00	1,00700	231,610	-3,99	100,00	35,00		
Bus 9	1	230,00	1,01700	233,911	-4,56				

Figura 20 – Case Information LT6-4

Fonte: Do autor, 2023.

A Tabela 11 apresenta que há 1 violação da Tabela 3, a barra 6 apresenta queda de tensão de 5,78%, logo, requer um novo estudo. Aplicando os critérios a subtensão já é suficiente para que busque uma solução para o sistema. A aplicação de um banco de capacitores automático para ajuste de tensão será abordada a seguir.

#### 4.4.1 Eliminação LT 6-4: Mitigação Da Falha

Conforme abordado anteriormente, deve-se inserir com auxílio do software um banco de capacitores para a barra 6. A Figura 22 apresenta o diagrama. Com a contingência em questão é gerado um reativo de 18,6 MVar para ajuste da tensão para a barra 6. Com a inserção do banco de capacitores, podemos reanalisar o sistema e obtemos a Tabela 13 e Tabela 14.

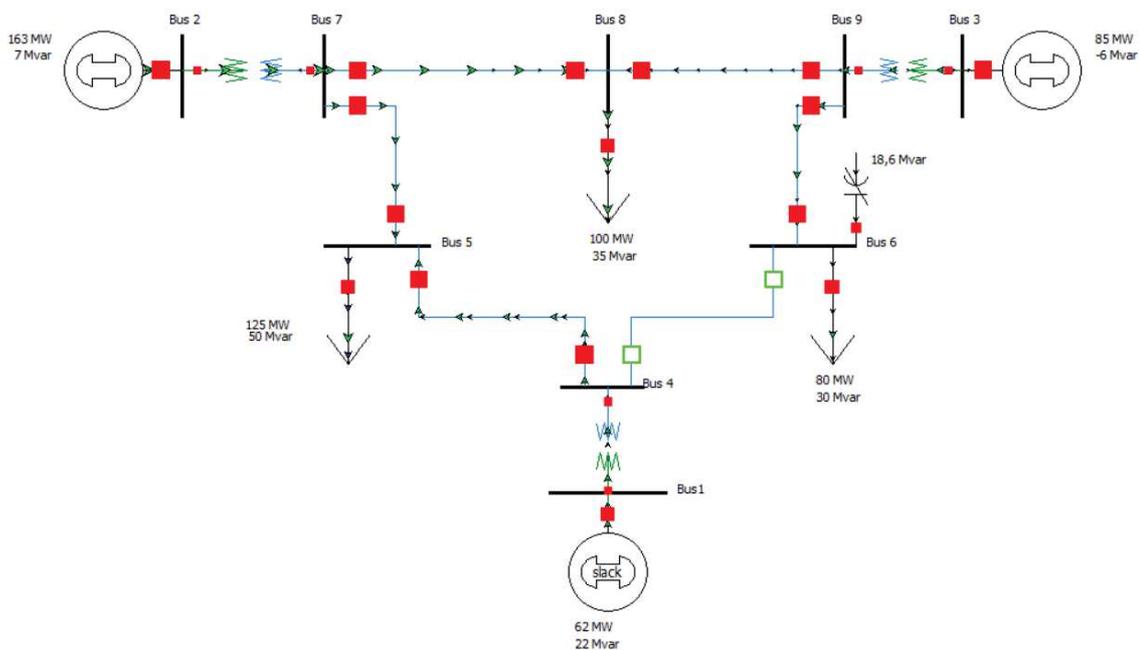


Figura 21 – Instalação banco capacitores na barra 6

Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 13 – Dados do sistema com abertura da linha 6-4 e ajuste da barra 6

Conexão i-k	FP Ativo barra i (MW)	FP Ativo barra k (MW)	Perdas Ativas (Mw)	FP Reativo i (MVar)	FP Reativo barra k (MVar)	Perdas Reativas (MVar)
1-4	62,060	-62,060	0,000	19,850	-22,170	2,3130
2-7	163,000	163,000	0,000	6,930	8,900	15,834
5-4	-61,610	62,060	0,445	-34,170	19,850	-14,314
6-4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7-5	64,670	-63,390	1,288	-9,060	-15,830	-24,895
7-8	98,330	-97,540	0,786	0,160	-9,000	-8,837
8-9	-2,460	2,490	0,028	-26,000	4,410	21,591
9-3	-85,000	85,000	0,000	10,070	-6,020	4,050
9-6	82,510	-80,000	2,512	-14,480	-11,840	-25,924

Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 14 – Dados de barras com abertura da linha 6-4 e ajuste da barra 6

Barra	Tensão pu	Tensão (kV)	Ângulo (°)	Queda Tensão (kV)
1	1,0400	17,160	0,000	0,660
2	1,0250	18,450	5,906	0,450
3	1,0250	14,145	-1,817	0,345
4	1,0283	236,508	-1,915	6,508
5	0,9993	229,847	-4,695	-0,153
6	1,000	229,999	-10,551	0,0001
7	1,0256	235,888	1,010	5,888
8	1,0141	233,252	-2,856	3,252
9	1,0296	236,805	-2,819	6,805

Fonte: Do autor, 2023.

Ao verificar a Tabela 14 podemos constatar que nenhuma das barras excedeu os limites estabelecidos pela Tabela 3, sendo que a barra 6 foi reestabelecida para 1 pu de tensão

mostrando a eficiência do banco de capacitores. A barra 9 apresentou o aumento de tensão de 2,96% pu e a barra 5 apresentou a queda de 0,07% pu.

Com a correção vale ressaltar também que nos fluxos das demais conexões não apresentaram variações acima dos limites de carregamento, logo podemos concluir que a correção fez mesmo com a contingência um funcionamento pleno. O sentido de FP se inverteu na conexão 8-9.

#### 4.5 Eliminação LT 5-4

Com abertura da LT 5-4 os fluxos se reordenam e temos como dados a Tabela 15 e Tabela 16, com dados do FP do sistema e dados de barras respectivamente.

Tabela 15 – Dados do sistema com abertura da linha 5-4

Conexão i-k	FP Ativo barra i (MW)	FP Ativo barra k (MW)	Perdas Ativas (Mw)	FP Reativo i (MVar)	FP Reativo barra k (MVar)	Perdas Reativas (MVar)
1-4	76,560	-76,560	0,000	-0,660	3,790	3,129
2-7	163,000	-163,000	0,000	69,300	-50,64	18,662
5-4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6-4	-75,630	76,570	0,936	-12,590	0,890	-11,703
7-5	132,810	-125,00	7,806	63,580	-50,000	13,583
7-8	30,190	-30,110	0,082	-12,950	-0,920	-13,867
8-9	-69,890	70,550	0,665	-34,080	18,490	-15,588
9-3	-85,000	85,000	0,000	1,200	2,830	4,034
9-6	14,450	-14,370	0,078	-19,690	-17,41	-37,103

Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 16 – Dados de barras com abertura da linha 5-4

Barra	Tensão pu	Tensão (kV)	Ângulo (°)	Queda Tensão (kV)
1	1,0400	17,160	0,000	0,660
2	1,0250	18,450	-0,269	0,450

3	1,0250	14,145	-0,804	0,345
4	1,0395	239,094	-1,169	9,094
5	0,8388	192,926	-19,208	-37,074
6	1,0208	234,790	-4,888	4,790
7	0,9878	227,184	-6,044	-2,816
8	0,9896	227,598	-7,347	-2,402
9	1,0245	235,643	-3,523	5,643

Fonte: Do autor, 2023.

Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
Bus 2	1	18,00	1,02500	18,450	-0,27			163,00	69,30
Bus 3	1	13,80	1,02500	14,145	-0,80			85,00	2,83
Bus1	1	16,50	1,04000	17,160	0,00			76,56	2,45
Bus 6	1	230,00	1,02083	234,790	-4,89	90,00	30,00		
Bus 5	1	230,00	0,83881	192,926	-19,21	125,00	50,00		
Bus 7	1	230,00	0,98776	227,184	-6,04				
Bus 9	1	230,00	1,02453	235,643	-3,52				
Bus 8	1	230,00	0,98956	227,598	-7,35	100,00	35,00		
Bus 4	1	230,00	1,03954	239,094	-1,17				

Figura 22 – Case Information LT5-4

Fonte: Do autor, 2023.

A Tabela 16 consta 1 violação da Tabela 3, a barra 5 apresenta queda de tensão de 16,12%, logo, requer um novo estudo. Aplicando os critérios a subtensão já é suficiente para que busque uma solução para o sistema. A aplicação de um banco de capacitores automático para ajuste de tensão será abordada a seguir.

#### 4.5.1 Eliminação LT 5-4: Mitigação Da Falha

Conforme abordado anteriormente, deve-se inserir com auxílio do software um banco de capacitores para a barra 5. A Figura 24 apresenta o diagrama. Com a contingência em questão é gerado um reativo de 48,0 MVar para ajuste da tensão para a barra 5. Com a inserção do banco de capacitores, podemos reanalisar o sistema e obtemos a Tabela 17 e Tabela 18.

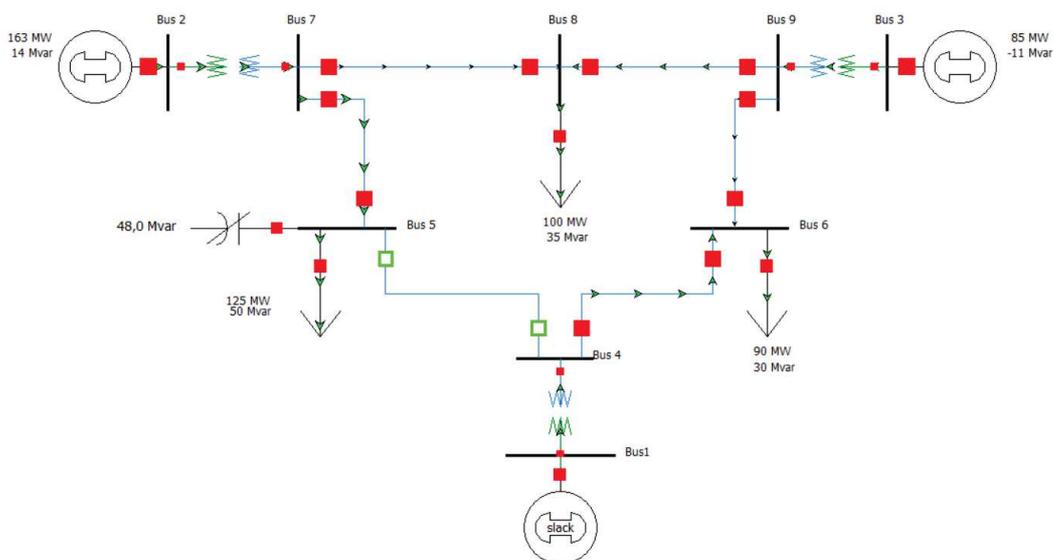


Figura 23 – Instalação banco capacitores na barra 5

Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 17 – Dados do sistema com abertura da linha 5-4 e ajuste da barra 5

Conexão i-k	FP Ativo barra i (MW)	FP Ativo barra k (MW)	Perdas Ativas (Mw)	FP Reativo i (MVar)	FP Reativo barra k (MVar)	Perdas Reativas (MVar)
1-4	73,870	-73,870	0,000	1,780	-1,130	2,906
2-7	163,000	163,000	0,000	14,120	1,810	15,924
5-4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6-4	-73,000	73,870	0,864	-10,380	-1,780	-12,155
7-5	130,700	-125,000	5,265	-2,110	-2,030	-4,142
7-8	32,730	-32,640	0,093	0,300	-14,930	-14,631
8-9	-67,360	67,890	0,536	-20,070	2,750	-17,321
9-3	-85,000	85,000	0,000	15,020	-10,920	4,096
9-6	17,110	-17,000	0,108	-17,760	-19,620	-37,383

Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 18 – Dados de barras com abertura da linha 5-4 e ajuste da barra 5

Barra	Tensão pu	Tensão (kV)	Ângulo (°)	Queda Tensão (kV)
1	1,0400	17,160	0,000	0,680
2	1,0250	18,500	-1,115	0,500
3	1,0250	14,145	-1,607	0,345
4	1,0402	239,242	-2,255	9,242
5	0,9795	225,275	-18,545	-4,725
6	1,0241	235,552	-5,851	5,552
7	1,0213	234,889	-6,700	4,889
8	1,0131	233,010	-7,967	3,010
9	1,0324	237,451	-4,305	7,451

Fonte: Do autor, 2023.

Ao verificar a Tabela 18 podemos constatar que nenhuma das barras excedeu os limites estabelecidos pela Tabela 3, sendo que a barra 5 foi reestabelecida para 0,9795pu de tensão mostrando a eficiência do banco de capacitores. A barra 4 apresentou o aumento de tensão de 4,02%pu e a barra 5 segue apresentando o menor índice, com queda e tensão de 2,05%pu.

As conexões 6-4 e 8-9 apresentaram um carregamento inferior a 300%, porém superior a 100% então podemos definir como índice de atenção. Já a reativa na barra 2 consta um aumento de 321,64% que classificamos como emergencial. Os índices apontados e o relatório do PWS concluímos que com a entrada do banco de capacitores essa contingência não irá mais parar o sistema. Não há inversão de fluxo para essa contingência.

#### 4.6 Eliminação LT 7-5

A abertura da linha 5-7, redistribui FP mantendo a demanda da carga a ela ligada. Temos como resultados os dados da Tabela 19 e Tabela 20, que representam respectivamente os dados da LT e os dados de barra.

Tabela 19 – Dados do sistema com abertura da linha 7-5

Conexão i-k	FP Ativo barra i (MW)	FP Ativo barra k (MW)	Perdas Ativas (Mw)	FP Reativo i (MVar)	FP Reativo barra k (MVar)	Perdas Reativas (MVar)
1-4	80,210	-80,210	0,000	81,970	-74,970	-7,005
2-7	163,000	-163,000	0,000	19,410	-3,380	16,029
5-4	-124,950	126,820	1,877	-49,940	48,640	-1,296
6-4	47,430	-46,820	0,610	-43,420	30,780	-12,636
7-5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7-8	163,000	-160,810	2,189	3,380	-0,050	3,326
8-9	60,810	-60,300	0,508	-34,950	17,810	-17,138
9-3	-84,990	84,990	0,000	-2,430	6,480	4,052
9-6	145,290	-137,410	7,879	-15,380	13,430	-1,949

Fonte: Do autor, 2023.

Tabela 20 – Dados de barras com abertura da linha 7-5

Barra	Tensão pu	Tensão (kV)	Ângulo (°)	Queda Tensão (kV)
1	1,0400	17,160	0,000	0,660
2	1,0250	18,450	31,346	0,450
3	1,0250	14,145	18,330	0,345
4	1,0173	233,971	-1,249	3,971
5	0,9618	221,212	-7,234	-8,788
6	0,9911	227,945	1,577	-2,055
7	1,0180	234,148	25,744	4,148
8	1,0031	230,716	19,198	0,719
9	1,0225	235,165	15,609	5,165

Fonte: Do autor, 2023.

Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar ▼
Bus1	1	16,50	1,04000	17,160	0,00			80,06	83,06
Bus 2	1	18,00	1,02500	18,450	31,35			163,00	19,40
Bus 3	1	13,80	1,02500	14,145	18,33			85,00	6,49
Bus 4	1	230,00	1,01724	233,966	-1,25				
Bus 5	1	230,00	0,96169	221,189	-7,24	125,00	50,00		
Bus 6	1	230,00	0,99103	227,937	1,58		90,00		
Bus 7	1	230,00	1,01804	234,148	25,74				
Bus 8	1	230,00	1,00311	230,716	19,20	100,00	35,00		
Bus 9	1	230,00	1,02245	235,163	15,61				

Figura 24 – Case Information LT7-5

Fonte: Do autor, 2023.

Ao verificar a Tabela 20 podemos constatar que nenhuma das barras excedeu os limites estabelecidos pela Tabela 3, sendo que a barra 9 apresentou o aumento de tensão com 2,25% pu e a barra 5 apresentou a queda de 3,82% pu.

Já as conexões 4-1, apresentou uma violação de abaixo de 300% de reativo sendo determinada atenção. Para a conexão 5-4 a potência ativa teve aumento superior a 300% classificada emergencial. A conexão 7-8, 8-9 e 9-6 aumento de potência ativa, porem inferior a 300%, logo querer atenção. Nas conexões 7-8 e 8-9 a variação superior a 300% de potência reativa, sendo classificada para emergencial. Os altos índices de reativo e ativo podem ser verificados pelos dados de geração apresentados na Figura 25.

O sentido de FP reativo se inverteu na conexão 8-9, 6-4, demais sem variação de sentido. Com os dados obtidos e validação pelo PWS a contingência é aceitável, pois mesmo com as variações apresentadas o sistema segue atendendo as cargas.

## 5 CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, aprofundamos no estudo das contingências em Sistemas Elétricos de Potência, utilizando o software PowerWorld Simulator como nossa ferramenta principal. Nosso objetivo era não apenas compreender as dinâmicas complexas do sistema, mas também desenvolver estratégias proativas para mitigar violações e fortalecer a resiliência operacional.

Através da análise de contingências e simulações de FP no PowerWorld, identificamos pontos críticos no sistema onde violações de parâmetros operacionais poderiam ocorrer. Ao

inserir um banco de capacitores automático, fomos capazes de observar uma melhoria significativa na qualidade da tensão e uma resposta ágil diante das condições adversas.

Os resultados obtidos destacam a eficácia do uso do PowerWorld como uma ferramenta robusta para análise e simulação de contingências. A capacidade de modelagem avançada e a interface amigável proporcionaram uma visão aprofundada das interações complexas no sistema elétrico, permitindo-nos tomar medidas preventivas para preservar a estabilidade operacional.

Ao explorar as funcionalidades do PowerWorld, não apenas analisamos as contingências existentes, mas também propusemos soluções inovadoras para garantir a continuidade operacional. A inserção automática do banco de capacitores demonstrou ser uma estratégia eficaz, proporcionando respostas rápidas e automáticas a situações desafiadoras.

Em última análise, esta experiência reforça a necessidade contínua de inovação e adaptação no campo dos Sistemas Elétricos de Potência. Com o conhecimento adquirido e as lições aprendidas, estou confiante de que contribuímos para a evolução da prática no setor, preparando-nos para os desafios futuros e inspirando a busca contínua pela excelência no gerenciamento de contingências em sistemas elétricos.

## REFERÊNCIAS

HENRIQUES, T.; DE SOUZA, V. [s.l: s.n.]. Disponível em:<[http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/19136/1/THIAGO%20HENRIQUES%20VIEIRA%20DE%20SOUZA%20--20TCC%20ENG.%20EL%  
c3%89TRICA%202020.pdf](http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/19136/1/THIAGO%20HENRIQUES%20VIEIRA%20DE%20SOUZA%20--20TCC%20ENG.%20EL%c3%89TRICA%202020.pdf)>.

KUNDUR, P. Power System Stability and Control. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 1994. (EPRI power system engineering series). ISBN 9780070359581.

MORISON k.; WANG, L.; KUNDUR, P. Power system security assessment. v. 2, p. 30–39, 2004.

STEVENSON, William D. Elementos de análise de sistemas de potência. McGraw-Hill do Brasil, 1974.

MONTICELLI, Alcir José. Fluxo de potência em Redes de Energia Elétrica. Ed. Edgard Blücher LTDA. São Paulo, 1983.

BORGES, C. L. T.; Hazan, S. S.; Guerra, L.N. de A. – Análise de Sistemas de Potência. Apostila – URRJ.

STEVENSON, William D. Power system analysis. Ed. McGraw-Hill do Brasil, LTDA, 1986.

AZEVEDO, Pedro Elias Brito de. Fundamentos teórico metodológicos sobre fluxo de potência ótimo e aplicações com o Power World Simulator / Pedro Elias Brito de Azevedo; orientador Wilker Victor da Silva Azevêdo, 2023. 98 f. : il.

IEEE-PSSC. Power System Stability Committee (IEEE-PSSC). Final draft: voltage stability assessment, procedures and guides. Waterloo: University of Waterloo, 1999. (Special publication). Disponível em: <<http://www.power.uwaterloo.ca>>. Acesso em: 25 out. 2023.

LENTZ, GEOVANE MICHAEL; MARUJO, DIOGO; ZEFERINO, CRISTIANE LIONCO; OLIVEIRA, DENISSON QUEIROZ; NASCIMENTO, BRUNO DE NADAI; PORTE-LINHA, FRANCISCO. Um estudo comparativo de metodologias para análise de contingências em sistemas elétricos de potência. Anais da Sociedade Brasileira de Automática, v. 1, n. 1, 2019.

PINTO, D. P.; PEREIRA, J. L. R. Um método localizado para análise de contingências estáticas em sistemas de energia elétrica. sixth. Juiz de Fora: SBA Controle Automação, 1995.

PATACA, Liciane Cândida. Análise de Contingência com Critério em Sistemas Elétrico de Potência Utilizando Computação Paralela em MATLAB.2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) –63Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

POWERWORLD. **Linear Programming [online]**. Disponível em: <<https://www.powerworld.com/training/online-training/market-odeling/linearprogramming>>. Acesso em: 24 nov. 2023.

CARVALHO MARTINS, Vinicius. Análise da influência de sistemas embarcados no setor elétrico: tecnologia na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil e no Mundo. 2016. 31 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: <https://www.ons.org.br/>. Acesso em: 25 set. 2023.

BARBOSA, Ailson de Souza et al. Fluxo de potência em sistemas de distribuição: aplicações práticas. 1995.

ZANETTA JR, Luiz Cera. Fundamentos de sistemas elétricos de potência. Editora Livraria da Física, 2006.

POWERWORLD. **PowerWorld Simulator User Guide**. Denver, Colorado: PowerWorld Corporation, 2016. Disponível em: <<https://www.powerworld.com/files/pw110UserGuide.pdf>> Acesso em: 10 out. 2023.

SALGADO, R. S. Fluxo de Potência – Método de Newton. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/~katia/FPNR-Slg.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2023.



**RELATÓRIO FINAL DE CURSO Nº 9/2025 - DENP (11.62.04)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

**(Assinado digitalmente em 06/03/2025 15:57)**  
**ITALO ARTHUR JOAO WILSON SILVA MEIRELES**  
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO  
DENP (11.62.04)  
Matricula: ###624#3

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: **9**, ano: **2025**, tipo:  
**RELATÓRIO FINAL DE CURSO**, data de emissão: **06/03/2025** e o código de verificação: **256c84aa4f**