



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SALVIANO AGRA NETO

Cálculo da capacidade remanescente de um sistema elétrico para escoamento de  
geração de energia

Cabo de Santo Agostinho – PE

2022

SALVIANO AGRA NETO

Cálculo da capacidade remanescente de um sistema elétrico para escoamento de  
geração de energia

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentada ao curso de Graduação em  
Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica  
do Cabo de Santo Agostinho da  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof. Dra. Ana Vitória de  
Almeida Macêdo.

Cabo de Santo Agostinho – PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- A277c      Agra Neto, Salviano  
              Cálculo da capacidade remanescente de um sistema elétrico para escoamento de geração de energia /  
              Salviano Agra Neto. - 2022.  
              46 f. : il.
- Orientadora: Ana Vitoria de Almeida Macedo.  
              Inclui referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco,  
              Bacharelado em Engenharia Elétrica, Cabo de Santo Agostinho, 2022.
1. Capacidade remanescente de escoamento de geração. 2. Margem de transmissão. 3. ANAREDE. 4.  
              escoamento de geração. I. Macedo, Ana Vitoria de Almeida, orient. II. Título

CDD 621.3

---

SALVIANO AGRA NETO

Cálculo da capacidade remanescente de um sistema elétrico para escoamento de  
geração de energia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia  
Elétrica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal  
Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 04/10/2022

Banca Examinadora

---

Prof. Dra. Ana Vitória de Almeida Macêdo  
UFRPE  
Orientadora

---

Prof. Dr. Fernando Gonçalves de Almeida Neto  
UFRPE  
Examinador Interno

---

Prof. Dr. Denis Keuton Alves  
UFRPE  
Examinador Interno

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais*

*Rosa Maria da Silva e Joverlande Soares Agra*

## AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

A minha família pela compreensão e apoio durante todo o percurso.

Aos amigos e colegas de universidade, todos que de alguma forma, diretamente e indiretamente me ajudaram durante o período da universidade.

Aos professores e servidores da UFRPE, em especial aos do Curso de Engenharia Elétrica, pelo empenho e valioso suporte durante a graduação.

Ao CEPTEL por conceder a licença acadêmica do *software* ANAREDE®.

E por fim, agradeço a minha orientadora, Prof. Dra. Ana Vitória de Almeida Macêdo, com quem muito aprendi, pela disponibilidade, pela orientação e pela paciência.

*Atentei para todas as obras que se fazem debaixo do sol, e eis que tudo era vaidade  
e aflição de espírito.*

*(Eclesiastes 1:14)*

## RESUMO

Este trabalho aborda o cálculo da capacidade remanescente de um sistema elétrico para escoamento de geração de energia (margem de transmissão), que consiste no valor máximo de injeção de potência ativa que o sistema é capaz de transmitir sem a ocorrência de violações de fluxo de potência ou tensão. Tema de alta relevância sobretudo no Brasil, onde há grande potencial energético e projetos de expansão e diversificação da matriz energética. Este assunto é de extrema importância no âmbito comercial de energia elétrica, visto que é um estudo que antecede alguns leilões de energia de responsabilidade do Ministério de Minas e Energia. Ao longo do trabalho, são apresentados os fundamentos para entender o problema e um método computacional para sua resolução. O *software* empregado para a realização do cálculo, o ANAREDE<sup>®</sup>, também será apresentado, com ênfase em sua ferramenta de cálculo automático da margem de transmissão. Por fim, são apresentados os resultados provenientes dos cálculos do programa, expostos por meio de tabelas contendo os valores das margens de transmissão e seus fatores limitantes.

Palavras-chave: ANAREDE<sup>®</sup>; capacidade remanescente; escoamento de geração; margem de transmissão.

## ABSTRACT

This paper addresses the calculation of the remaining capacity of an electrical system for power generation flow, which consists of the maximum value of active power injection that the system can transmit without the occurrence of power flow violations. or tension. This topic is very relevant, especially in Brazil, where there is great energy potential and projects to expand and diversify the energy matrix. This subject is extremely important in the commercial scope of electric energy, since it is a study that precedes some energy auctions under the responsibility of the Ministry of Mines and Energy. Throughout the paper, the fundamentals to understand the problem and a computational method for its resolution are presented. The software used to perform the calculation, ANAREDE<sup>®</sup>, will also be presented, with emphasis on its automatic transmission margin calculation tool. Finally, the results from the software calculations are presented, exposed through tables containing the values of the transmission margins and their limiting factors.

Key-words: ANAREDE<sup>®</sup>; generation power flow; remaining capacity; transmission margin.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de Transmissão. ....	18
Figura 2 - Sistema Exemplo.....	22
Figura 3 - Sistema elétrico no estado de Pernambuco. ....	23
Figura 4 - Esquema de divisões sucessivas do passo de incremento de geração. ....	28
Figura 5 - Fluxograma da Margem de Transmissão. ....	29
Figura 6 - Topologia do Sistema IEEE 118 Barras. ....	31
Figura 7 - Gráfico do barramento candidato 1. ....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de Barramentos Candidatos, Subáreas e Área do caso em análise. ....	32
Tabela 2 - Valores de Margens de Transmissão para os níveis de Barramento Candidato, Subárea e Área.....	33
Tabela 3 - Fatores limitantes para a etapa de Barramento Candidato.....	34
Tabela 4 - Fatores limitantes para as etapas de Subárea e Área. ....	35

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Capacidade remanescente e fatores limitantes de parte do estado de Pernambuco. ....	23
Quadro 2 - Lista dos casos salvos no arquivo histórico da etapa de barramento candidato. ....	36
Quadro 3 - Lista dos casos salvos no arquivo histórico da etapa de subárea. ....	36
Quadro 4 - Lista dos casos salvos no arquivo histórico da etapa de área. ....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CC – Corrente Contínua

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

MME – Ministério de Minas e Energia

NERC – *North American Electric Reliability Council*

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

SEP – Sistema Elétrico de Potência

## LISTA DE SÍMBOLOS

$PQ, PV, V\theta$  – Barras de carga, geração e referência

p.u. - Notação em valor por unidade

$N_b$  - Número de barras da rede

$\Omega_k$  - Conjunto de barras vizinhas à barra  $k$

$K$  - Conjunto de barras adjacentes à barra  $k$ , incluindo ela

$k, m$  - Barras do sistema

$B_{km}, G_{km}$  - Coeficientes da matriz de admitâncias

$\theta_k, \theta_m$  - Ângulos de fase de tensão das barras  $k$  e  $m$

$P_k, Q_k$  - Injeções de potência ativa e reativa da barra  $k$

$P_{km}, Q_{km}$  - Fluxos de potência ativa e reativa na linha  $k-m$

$Q_{km}^{sh}$  - Componente da injeção de potência reativa devido ao elemento *shunt* da barra  $k$

$J$  - Matriz Jacobiana das derivadas de  $g(x)$  em relação a  $x$

$H, N, M, L$  - Submatrizes da matriz Jacobiana dadas por  $\partial P/\partial\theta, \partial P/\partial V, \partial Q/\partial\theta, \partial Q/\partial V$

$B', B''$  - Matrizes constantes que substituem a matriz Jacobiana no método Desacoplado Rápido

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>12</b>
2.1 FLUXO DE POTÊNCIA.....	12
2.2 MÉTODOS DE SOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA .....	14
<b>2.2.1 Método de Newton-Raphson.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2 Método desacoplado .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.3 Método desacoplado rápido .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.4 Fluxo de Potência Linearizado .....</b>	<b>17</b>
2.3 SISTEMA DE TRANSMISSÃO .....	17
2.4 MARGEM DE TRANSMISSÃO.....	18
<b>3 CÁLCULO DA CAPACIDADE REMANESCENTE PARA ESCOAMENTO DE GERAÇÃO .....</b>	<b>24</b>
3.1 ANAREDE® .....	24
<b>3.1.1 Cálculo Automático Margem de Transmissão.....</b>	<b>25</b>
<b>4 SISTEMA EM ESTUDO.....</b>	<b>30</b>
<b>5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS.....</b>	<b>32</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>38</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos e o aumento populacional, cresce a demanda por energia elétrica. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (Capítulo II – Demanda de Energia), entre 2019 e 2029, estima-se que o consumo de eletricidade no Brasil crescerá 3,8% ao ano. Junto a isso, há também a preocupação com o meio ambiente, que incentiva a geração de energia de forma menos poluente, como a geração de energia fotovoltaica e eólica, o que estimula a construção de novos parques de geração e a produção independente de energia.

No entanto, aumentar a geração de energia resolve uma parte do problema, já que essa energia precisa ser transmitida, distribuída e ter suas grandezas mantidas dentro dos níveis aceitáveis. Nesse contexto, surge a questão do escoamento da geração, sendo necessário estudos sobre a capacidade que o sistema possui em escoar a energia gerada para as cargas; isso pode ser realizada por meio de técnicas de Fluxo de Potência (ou Fluxo de Carga). Esse conhecimento é fundamental para avaliar se o sistema suporta novos aportes de potência, se há necessidade de ampliação ou melhoria da infraestrutura de transmissão existente, bem como possibilita a realização de simulações inviáveis de serem feitas em situações práticas e ajuda a determinar as melhores condições de operação do sistema. Além disso, pode contribuir na decisão a respeito do local de implantação de novos empreendimentos de geração de energia elétrica e orientar leilões de energia.

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é um dos órgãos que tem competência pela divulgação de notas técnicas a respeito do quantitativo da capacidade remanescente do Sistema Integrado Nacional (SIN). O principal objetivo é guiar estudos a fim de verificar a disponibilidade física para conexão de novos empreendimentos, munindo os interessados em leilões de compra e venda de energia, bem como os responsáveis por projetos de geração, de informações concernentes a capacidade de escoamento de geração do sistema. Parte desse estudo se concentra em calcular a capacidade remanescente para escoamento de geração.

O presente trabalho visa determinar o máximo valor de injeção de potência ativa que o sistema é capaz de transportar sem manifestar violações de tensão ou fluxo de potência na região em análise e, assim, determinar a capacidade

remanescente de escoamento de geração. Para isso, será utilizado o Programa de Análise de Redes – ANAREDE®. O sistema elétrico de potência no qual será realizada a análise é um sistema exemplo presente no próprio *software*.

O próximo capítulo apresenta a fundamentação teórica do trabalho, trazendo informações a respeito do Fluxo de Potência, alguns métodos utilizados para sua resolução; além de informações a respeito do cálculo da capacidade remanescente para escoamento de geração, isto é, a margem de transmissão do sistema. No capítulo 3, é apresentada a ferramenta utilizada para realização do estudo, o Programa de Análise de Redes – ANAREDE®. O capítulo 4 traz informações a respeito do sistema sobre o qual recai o estudo. Em seguida, o capítulo 5 expõe os resultados obtidos na simulação e, por fim, o capítulo 6 explana as considerações finais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo é destinado a introduzir as bases do estudo da capacidade remanescente para escoamento de geração de energia de um sistema. Inicia-se tratando do fluxo de potência, ferramenta indispensável no tocante à análise de sistemas elétricos de potência, seguindo com algumas técnicas utilizadas para sua resolução. Posteriormente, é feita uma breve apresentação do que é um sistema elétrico de transmissão. Por fim, o último subcapítulo trata da margem de transmissão, ou seja, a capacidade remanescente que o sistema de transmissão possui para escoamento de geração. Ademais, a nota técnica na qual este trabalho se fundamenta é apresentada.

### 2.1 FLUXO DE POTÊNCIA

Estudar o fluxo de potência é essencial na elaboração de projetos de sistemas elétricos, haja vista ser possível prever tensões, correntes e potências em estado estacionário por meio desses estudos. Além disso, pode auxiliar na análise do comportamento dos componentes do sistema, da transmissão da energia e topologia da rede. Segundo Monticelli (1983), o cálculo do fluxo de potência de um sistema de energia elétrica é basicamente a determinação do estado da rede, da distribuição dos fluxos, além de outras grandezas pertinentes ao estudo. A modelagem dos sistemas é estática, na qual a rede é representada por equações e inequações algébricas; as variações no tempo são consideradas suficientemente pequenas, dessa forma, os efeitos transitórios são ignorados.

Os componentes do sistema elétrico são divididos em dois grupos: os ligados entre um nó qualquer e nó-terra (geradores, cargas, capacitores, reatores); e os ligados entre dois nós quaisquer do sistema (linhas de transmissão, transformadores, defasadores). Geradores e cargas são modelados por meio de injeções de potência nos nós da rede e são considerados como a parte externa da rede. Por outro lado, componentes como linhas de transmissão, transformadores, reatores são considerados parte interna da rede.

Considera-se que potência injetada é igual a soma das potências que fluem pelos componentes internos, ou seja, a potência é conservada e, desse modo, é possível obter as equações básicas do fluxo de carga por meio da Primeira Lei de

Kirchhoff.

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (1)$$

$$Q_k + Q_m^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2)$$

Em que:

$k$  – varia de 1 até Nb (número de barras da rede);

$\Omega_k$  – Conjunto de barras vizinhas à barra  $k$ ;

$V_k, V_m$  – Magnitudes das tensões das barras  $k$  e  $m$ ;

$\theta_k, \theta_m$  – Ângulos das tensões das barras  $k$  e  $m$ ;

$P_k, Q_k$  – Injeções de potência ativa e reativa da barra  $k$ , respectivamente;

$P_{km}, Q_{km}$  – fluxo de potência ativa e reativa na linha  $k-m$ , respectivamente;

$Q_{km}^{sh}$  – Componente da injeção de potência reativa devido ao elemento shunt da barra  $k$ .

As injeções de potências ativa e reativa são expressas da seguinte forma em cada barra:

$$P_{[k]} = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3)$$

$$Q_{[k]} = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4)$$

onde:

$K$  – Conjunto de barras adjacentes à barra  $k$ , incluindo ela;

$G_{km}, B_{km}$  – Coeficientes da matriz de admitâncias.

A Segunda Lei de Kirchhoff é útil para expressar os fluxos de potências nos componentes internos como funções das tensões de seus nós terminais. Sendo assim, o problema do fluxo de carga pode ser expresso por equações e inequações algébricas não-lineares correspondentes às leis de Kirchhoff e restrições operacionais do sistema e seus componentes.

Quatro variáveis são associadas a cada barra do sistema, duas delas são

dados e outras duas são incógnitas, são elas:

$V_k$  – magnitude da tensão nodal (barra  $k$ )

$\theta_k$  – ângulo da tensão nodal

$P_k$  – geração líquida (geração menos carga) de potência ativa

$Q_k$  – injeção líquida de potência reativa

As barras são definidas de acordo com quais variáveis entram como dados e incógnitas, denominadas da seguinte forma:

$PQ$  – são dados  $P_k$  e  $Q_k$ , e calculados  $V_k$  e  $\theta_k$

$PV$  – são dados  $P_k$  e  $V_k$ , e calculados  $Q_k$  e  $\theta_k$

Referência – são dados  $V_k$  e  $\theta_k$ , e calculados  $P_k$  e  $Q_k$

As barras de carga e as barras de geração são representadas pelas barras  $PQ$  e  $PV$ , respectivamente. A barra de referência ( $V\theta$ ) fornece a referência angular do sistema e é utilizada para fechar o balanço de potência do sistema. Esses são os três tipos de barras mais importantes na formulação básica do problema do fluxo de carga. É importante mencionar que existem outras situações nas quais aparecem outros tipos de barras ( $PQV$ ,  $P$ ,  $V$ ), porém não são empregadas na formulação básica do problema.

Por ser uma tarefa complexa, métodos computacionais foram desenvolvidos para resolver os sistemas de equações e inequações que representam o fluxo de potência no sistema elétrico.

## 2.2 MÉTODOS DE SOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Diversas técnicas foram desenvolvidas e aprimoradas para solucionar o problema do fluxo de potência; dentre elas, destacam-se os métodos iterativos Newton-Raphson e suas variações desacopladas. É importante salientar que esses métodos são aplicados de forma satisfatória em soluções do fluxo de carga de linhas de transmissão. Por outro lado, em redes de distribuição (não é objeto deste trabalho) é necessário alterá-los ou empregar outros métodos, pois são realizadas aproximações que não são efetivas em todos os sistemas de distribuição (PIZZALLI, 2003).

### 2.2.1 Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson é um dos mais empregados para encontrar

raízes de sistemas algébricos não-lineares, porquanto apresenta convergência em poucas iterações. Nele, se realiza a linearização de uma função em torno de um ponto especificado. É um método largamente utilizado na resolução de problemas de fluxo de potência, visto que, além das características supracitadas, a convergência da solução independe do tamanho do sistema e, segundo DURCE (2012), o método tem bom desempenho para sistemas mal-condicionados, o que não ocorre com outros métodos.

A solução do fluxo de potência por este método é realizada da seguinte forma:

- i. Inicialmente, soluciona-se as equações (3) e (4);
- ii. Em seguida, calcula-se os resíduos de potência:

$$\Delta P_k = P_k^{\text{especificado}} - P_k^{\text{calculado}}$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{\text{especificado}} - Q_k^{\text{calculado}}$$

- iii. Deve-se resolver o seguinte sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(i)} = -J^{(i)} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(i)};$$

$$J = - \begin{bmatrix} \frac{dP}{d\theta} & \frac{dP}{dV} \\ \frac{dQ}{d\theta} & \frac{dQ}{dV} \end{bmatrix}$$

neste caso,  $J$  é a matriz jacobiana, que é quadrada de dimensão  $n$  ( $n = 2n_{PQ} + n_{PV}$ ) e composta por derivadas. Ela pode ser dividida em quatro submatrizes denominadas  $H$ ,  $M$ ,  $N$  e  $L$ :

$$H_{(n-1).(n-1)} = \frac{dP}{d\theta}; \quad N_{(n-1).(l)} = \frac{dP}{dV};$$

$$M_{(l).(n-1)} = \frac{dQ}{d\theta}; \quad L_{(l).(l)} = \frac{dQ}{dV}.$$

$n$  é o número de barras e  $l$  o número de barras  $PQ$ .

Então:

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

- iv. Por fim, atualiza-se as variáveis

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{(i+1)} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{(i)} + \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(i)}$$

Na hipótese da iteração não convergir, o é reiniciado na iteração seguinte e a matriz jacobiana precisa ser atualizada.

### 2.2.2 Método desacoplado

O cientista e engenheiro J.L. Carpentier desenvolveu este método ao perceber que existia uma independência comparativa entre a potência ativa e o ângulo de tensão, e da potência reativa com o módulo da tensão; assim, ele sugeriu que as submatrizes  $N$  e  $M$  fossem igualadas a zero. Sendo assim, apenas as submatrizes  $H$  e  $L$  seriam utilizadas e, dessa forma, os resíduos das potências ativas e reativas são desacoplados. Anulando  $N$  e  $M$ , obtém-se:

$$J = - \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{dP}{d\theta} & 0 \\ 0 & \frac{dQ}{dV} \end{bmatrix}$$

Uma vantagem do método é que, como nesta abordagem há independência das potências ativa e reativas, quando houver convergência da potência ativa e dos ângulos, a iteração pode seguir até atingir a convergência da potência reativa e tensão (e vice-versa). Assim, é possível obter a solução de forma mais rápida.

### 2.2.3 Método desacoplado rápido

O método desacoplado rápido permite que a solução seja encontrada de forma mais veloz. Apesar de executar mais iterações, cada iteração é realizada de modo mais rápido em comparação aos outros métodos. Isso é possível porque a matriz jacobiana é submetida a simplificações. Este método se diferencia do anterior, pois, no lugar de utilizar as submatrizes  $H$  e  $L$ , são empregadas matrizes  $B'$  e  $B''$ . As seguintes considerações são feitas:

- $\theta_{[km]}$  pequeno  $\rightarrow \cos\theta_{km} \approx 1$  e  $\sin\theta_{km} \approx 0$ ;
- $|B_{km}| \gg |G_{km}\sin\theta_{km}|$ ;
- $|B_{kk}V_k^2| \gg |Q_k|$ ;
- $V_k$  e  $V_m \approx 1$  p. u..

Observação: estes parâmetros estão presentes nas equações (3) e (4).

As matrizes  $B'$  e  $B''$  dependem apenas de parâmetros da rede, logo, durante o processo iterativo, são constantes e exigem menor esforço computacional em relação às matrizes  $H$  e  $L$  (DURCE, 2012).

### 2.2.4 Fluxo de Potência Linearizado

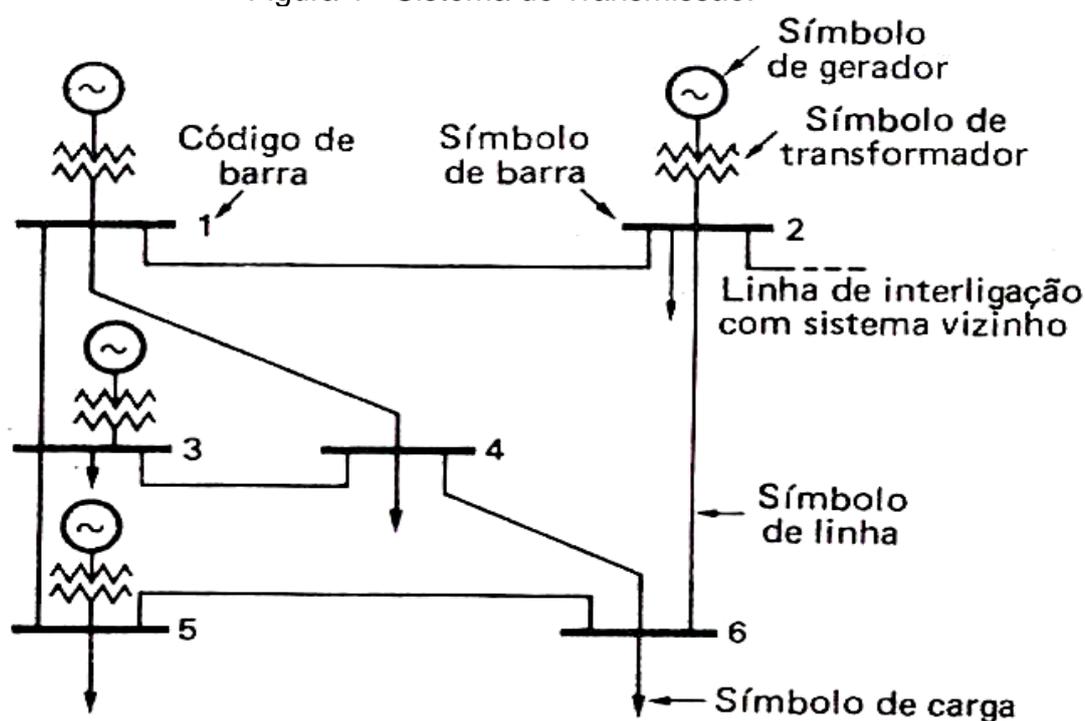
Este método aproximado de solução trabalha com o acoplamento  $P\theta$  e leva em conta apenas o fluxo de potência ativa, também conhecido como fluxo de carga CC. Em uma linha de transmissão, o fluxo de potência ativa “é aproximadamente proporcional à abertura angular na linha de transmissão e se desloca no sentido dos ângulos maiores para os ângulos menores. A relação entre os fluxos de potência ativa e as aberturas angulares é do mesmo tipo da que existe entre os fluxos de corrente e as quedas de tensão em circuito de corrente contínua, para o qual é válida a Lei de Ohm” (Monticelli, 1983). A aplicação desse método possibilita estimar a distribuição dos fluxos de potência ativa em uma rede de transmissão com baixo esforço computacional, tendo grande utilidade em estudos introdutórios. Para análises mais aprofundadas, recomenda-se o emprego dos métodos anteriormente expostos.

## 2.3 SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O sistema de transmissão, representado na Figura 1, é responsável pela interligação das fontes geradoras de energia às grandes cargas do sistema, alimentando-as com grandes blocos de potência. Seus principais componentes são transformadores de potência, dispositivos de manobra e linhas transmissão. O nível de tensão de transmissão pode variar de acordo com as distâncias envolvidas e quantidade de potência a ser transmitida; no Brasil a transmissão pode ser realizada nos seguintes níveis: 230, 345, 440, 500 e 750kV em corrente alternada.

Devido a sua grande importância, MEDEIROS (2017) compara o sistema de transmissão a “artérias”, pois, por meio dele a energia trafega e alimenta grandes centros consumidores. Para assegurar isso, rígidos critérios de projeto, operação, capacidade de transmissão ociosa e de interligações são necessários. Assim, é fundamental estudar a capacidade remanescente para escoamento de geração do sistema para determinar se ele opera dentro das margens de segurança e se suporta novos aportes de energia.

Figura 1 - Sistema de Transmissão.



Fonte: MEDEIROS (2017).

Em um cenário de crescente demanda de energia e aumento da entrada de fontes renováveis, faz-se necessário avaliar as condições de operação das redes de transmissão existentes, isto é, calcular a capacidade que um determinado sistema de transmissão possui em suportar novas injeções de potência; bem como realizar estudos a respeito da expansão da rede com novos empreendimentos (LIMA, 2019).

## 2.4 MARGEM DE TRANSMISSÃO

Em 1996 o Conselho Norte-Americano de Confiabilidade Elétrica (*North American Electric Reliability Council – NERC*) definiu a capacidade de transferência disponível do sistema como a medida da capacidade de transferência remanescente na rede transmissão para atividade comercial além de usos já comprometidos. Matematicamente pode ser expresso pela Capacidade Total de Transferência menos a Margem de Confiabilidade da Transmissão (quantidade da capacidade de transmissão necessária para assegurar o funcionamento seguro do sistema) menos a soma da quantidade da transmissão já comprometida (NERC, 1996).

De acordo com EJEBE *et al.* (1998), a Capacidade Total de Transferência é definida como a quantidade de energia elétrica que pode ser transferida pela rede de transmissão interconectada de maneira confiável, atendendo a todo um conjunto específico de condições do sistema pré e pós-contingência.

Segundo Lima (2019), “algumas modalidades de leilões de energia utilizam o conceito de margem de transmissão visando coordenar a geração contratada com a rede existente na data de início de entrega da energia”. Leilões de energia realizados pelo MME utilizam o conceito de margem de transmissão, que é o cálculo da máxima injeção de potência ativa que um ponto do sistema pode receber de forma segura, sem que violações dos critérios de segurança aconteçam (FERNANDES *et al.*, 2019). Nesses leilões, a contratação de energia na rede elétrica é limitada a margem de escoamento disponível. O ONS e a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) definem critérios e premissas para metodologia do cálculo da margem de transmissão, ao passo que os agentes interessados nos leilões de energia definem os pontos da rede em que desejam conectar seus empreendimentos de energia. De acordo com FERNANDES *et al.* (2018), essa modalidade de leilão viabiliza o aumento da oferta de energia, sem que sejam necessárias ampliações e reforços na transmissão, além daquelas já previstas, mitigando os riscos associados à restrição da geração a ser vendida.

O presente trabalho se baseia na Nota Técnica (NT) NT-ONS DPL 0007/2022/EPE-DEE-RE-002-R0/2022 do ONS e EPE, que apresenta a metodologia, as premissas e os critérios, bem como a topologia e a geração conectada da rede elétrica que serão consideradas para a definição da Capacidade Remanescente do SIN para Escoamento de Geração nos transformadores e nas linhas de transmissão da Rede Básica, Demais Instalações de Transmissão (DIT) e Instalação de Transmissão de Interesse Exclusivo de Centrais de Geração para Conexão Compartilhada (ICG), a ser considerada no Leilão de Energia Nova (LEN A-4/2022).

De acordo com as Portarias nº 444/GM/MME/2016 e nº 34/GM/MME/2021 do MME, o ONS deve realizar análises a respeito da capacidade remanescente para escoamento de geração na Rede Básica, DIT e ICG. As diretrizes para Leilão de Energia Nova (LEN A-4/2022) foram estabelecidas pela Portaria Normativa nº 34/GM/MME, na qual, dentre suas determinações, diz que a Capacidade Remanescente do Sistema Interligado Nacional (SIN) para Escoamento de Geração deve ser considerada para classificação dos lances do LEN A-4/2022. Os contratos

leiloados têm previsão de início de fornecimento de energia em janeiro de 2026, porém a capacidade remanescente para escoamento de geração deve ser conhecida antes mesmo dos leilões para que novos empreendimentos entrem no sistema de forma segura. Para fins do cálculo da margem de transmissão, a topologia do SIN é alterada com a inserção de empreendimentos autorizados ou contratados com data de operação seis meses antes e seis meses após a previsão de suprimento de energia por esses empreendimentos objeto do leilão (FERNANDES *et al.*, 2018).

O conhecimento sobre a capacidade para escoamento de geração, além de auxiliar o processo de tomada de decisões e orientar leilões de novos empreendimentos, permite determinar o máximo valor de injeção de potência ativa que o sistema é capaz de transportar sem manifestar violações de tensão ou fluxo de potência na região em análise. Isso é importante para prever o comportamento do sistema diante de situações de contingência, além de permitir definir melhores configurações e alocações dos componentes no sistema.

A nota técnica traz premissas e dados a respeito do SIN, dentre eles: configuração da rede de transmissão, configuração de geração, disponibilidade física para as conexões, patamares de carga; ela também apresenta metodologia e procedimentos para análise de fluxo de potência e análise de curto-circuito; além de apresentar considerações sobre os empreendimentos de geração cadastrados na rede de distribuição, peculiaridades da geração solar fotovoltaica e considerações sobre o escoamento das novas gerações em relação à geração térmica. No entanto, para o propósito deste trabalho, será considerado apenas a Análise de Fluxo de Potência (item 6.4 da referida NT).

A estratégia proposta pela NT supracitada para se obter a margem de transmissão de um sistema é analisá-lo por partes, tendo início no cálculo da capacidade remanescente para escoamento no nível de barramento, em seguida no nível de subáreas e, finalmente, no nível de área. Da seguinte forma:

- **Análise no nível de barramento:**

Cada barramento candidato (possível ponto de conexão dos empreendimentos candidatos) é analisado separadamente e, para determinar o acréscimo de geração, serão consideradas as condições indicadas para seu funcionamento mais alocação adicional de geração até que se verifique a violação de algum dos requisitos ou critérios, em condição normal ou contingência simples

(critério N-1).

- **Análise no nível de subárea:**

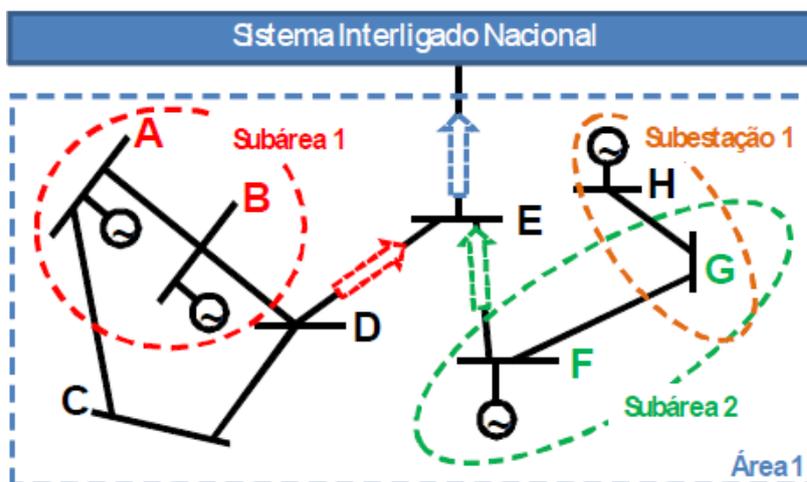
Na análise da subárea (que contém dois ou mais barramentos candidatos), considerando as potências existentes e previstas, será aplicado um incremento de geração nos barramentos candidatos da subárea com a finalidade de identificar limitantes na injeção de potência, respeitado o valor anteriormente obtido na análise dos barramentos no item anterior. Todas as combinações de incremento de geração são analisadas entre os barramentos candidatos que formam a subárea. A margem de transmissão da subárea é definida como a configuração de injeção de potência ativa simultânea mais limitante dentre as analisadas.

- **Análise no nível de área:**

A área é composta por subáreas; dessa forma, os valores de capacidade remanescentes encontrados nos itens anteriores devem ser considerados. De modo semelhante ao descrito no item anterior, as gerações já existentes e previstas devem ser despachadas e, em seguida, aplica-se incrementos de geração até que se verifique a violação de algum dos requisitos ou critérios, em condição normal ou contingência simples. Todas as combinações nas subáreas são analisadas e, finalmente, a margem de transmissão da área é definida como a configuração de injeção de potência ativa simultânea mais limitante.

A Figura 2, contribui para esclarecer os conceitos apresentados acima. Observa-se que os barramentos A e B concorrem pelo mesmo meio de transmissão, formando a Subárea 1. Enquanto a subárea 1 e subárea 2 concorrem pelo mesmo meio de escoamento de potência e formam a área 1 (CEPEL, 2021).

Figura 2 - Sistema Exemplo.

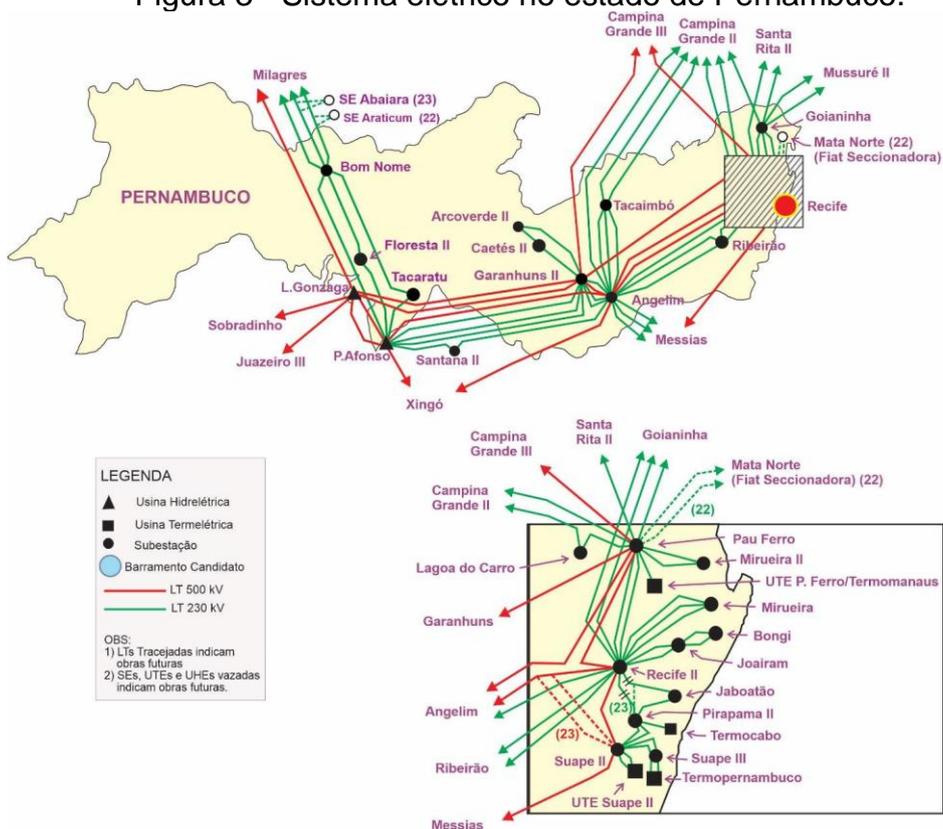


Fonte: CEPEL (2021).

Salienta-se que, para definição dos níveis apresentados acima (barramento candidato, subárea e área), o especialista responsável pelo estudo deve conhecer a região e apontar os possíveis barramentos candidatos, definir por quais deles a subárea será composta e quais subáreas formarão as áreas. As várias configurações possíveis representam cenários que serão avaliados para que seja definida a capacidade remanescente para escoamento de geração.

A nota técnica NT-ONS DPL 0035/2022 – LEN A-4/2022 traz os resultados dos estudos baseados na nota técnica anteriormente citada. A título de exemplo, na Figura 3 é exibida a topologia do estado de Pernambuco e logo abaixo é mostrado o Quadro 1 com parte dos resultados de sua capacidade remanescente e fatores limitantes.

Figura 3 - Sistema elétrico no estado de Pernambuco.



Fonte: ONS (2022).

Quadro 1 - Capacidade remanescente e fatores limitantes de parte do estado de Pernambuco.

BARRAMENTO CANDIDATO	TENSÃO (kV)	CAPACIDADE REMANESCENTE PARA O LEILÃO (MW)			FATORES LIMITANTES		
		BARRAMENTO	SUBÁREA	ÁREA	BARRAMENTO	SUBÁREA	ÁREA
Arcoverde II (AED)	230	≤ 130	AED 230 + AED_GRD_C1 230 ≤ 105	AED 230 + AED_GRD_C1 230 ≤ 105	Sobrecarga na LT 230 kV Garanhuns II - Caetés II C1, na contingência da LT 230 kV Garanhuns II - Arcoverde II C1 (Cenário 2).	Sobrecarga na LT 230 kV Garanhuns II - Caetés II C1, na contingência do trecho do seccionamento para Garanhuns II C1 (Cenário 1).	-
Arcoverde II - Garanhuns II - C1 (AED_GRD_C1)	230 <sup>(2)</sup>	≤ 105			Sobrecarga na LT 230 kV Garanhuns II - Caetés II C1, na contingência do trecho do seccionamento para Garanhuns II C1 (Cenário 1).		
Bom Nome (BNO)	230	0	0	0	Sobrecarga nas LTs 230 kV Paulo Afonso - Floresta II e Paulo Afonso - Tacaratu em condição normal de operação. Sobrecarga na LT 230 kV Araticum - Milagres na contingência da LT 230 kV Bom Nome - Paulo Afonso III ou da LT 230 kV Bom Nome - Abaiara (Cenário 2).	-	-
Bom Nome (BNO)	138	0	0	0	Sobrecarga nas LTs 230 kV Paulo Afonso - Floresta II e Paulo Afonso - Tacaratu em condição normal de operação. Sobrecarga na LT 230 kV Araticum - Milagres na contingência da LT 230 kV Bom Nome - Paulo Afonso III ou da LT 230 kV Bom Nome - Abaiara (Cenário 2).	-	-

Fonte: ONS (2022).

### 3 CÁLCULO DA CAPACIDADE REMANESCENTE PARA ESCOAMENTO DE GERAÇÃO

Neste capítulo, será apresentado o meio utilizado para o cálculo da capacidade remanescente para escoamento de geração, ou seja, cálculo da margem de transmissão do sistema proposto. Para esse fim, será empregado o programa ANAREDE<sup>®</sup>, que dispõe de ferramentas para análises de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), dentre elas encontra-se o Cálculo Automático Margem de Transmissão.

#### 3.1 ANAREDE<sup>®</sup>

Devido à complexidade, sobretudo do sistema elétrico brasileiro, é impraticável realizar análises de sistemas elétricos de potência sem o auxílio de ferramentas computacionais. Nesse cenário, surge a necessidade do desenvolvimento de *softwares* destinados a tal fim, como é o caso do ANAREDE<sup>®</sup>, criado pelo Centro de Pesquisas da Eletrobrás (CEPEL). Segundo o CEPEL, o programa é um dos mais utilizados no Brasil, tendo como principais usuários empresas que operam redes de transmissão, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Ministério de Minas e Energia (MME), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Empresa de Pesquisa Energética (EPE); além de ser amplamente aplicado em estudos acadêmicos.

Para chegar à solução do problema do Fluxo de Carga, o ANAREDE<sup>®</sup> aplica os métodos mencionados anteriormente (Newton e suas variações desacopladas). Normalmente o programa usa o método desacoplado rápido para solução das equações, mas o usuário pode optar pela utilização do método de Newton ativando a opção *NEWT*. Inclusive, é possível ativar a solução por mais de um método no mesmo processo de iteração, ou seja, parte do problema pode ser resolvida por um método e, em sequência, o outro método entra em ação. Ademais, cabe destacar que o ANAREDE<sup>®</sup> trabalha sob o pressuposto de que a rede está operando em regime permanentemente.

No que se refere a ferramentas de análise, o *software* é bastante completo e oferece várias opções de análises capazes de auxiliar no estudo do SEP. O programa é formado pelo seguinte conjunto de aplicações integradas:

- Fluxo de Potência;
- Equivalente de Redes;
- Análise de Contingências;
- Análise de Sensibilidade de Tensão;
- Análise de Sensibilidade de Fluxo;
- Fluxo de Potência Continuado;
- Recomposição de Sistemas Elétricos de Potência;
- Definição das Redes Complementar e Simulação;
- Cálculo Automático da Margem de Transmissão.

Dentro do programa, o usuário dispõe das opções de construir um sistema elétrico com as características desejadas, ou carregar um arquivo já existente; pode modificar o sistema acrescentando ou removendo componentes, além de simular situações de contingências. Cabe destacar que o usuário tem a possibilidade de gerar relatórios dos estudos realizados no programa, tudo isso com auxílio das ferramentas supracitadas.

### **3.1.1 Cálculo Automático Margem de Transmissão**

Esta ferramenta foi desenvolvida pelo CEPEL com o intuito de tornar o cálculo da margem de transmissão um processo automatizado e de fácil reprodução. Dessa forma, reduz esforços e tempo para a realização dos estudos, além de viabilizar a análise de uma quantidade maior de cenários.

A partir de dados de barramento candidatos, subestações, subáreas e áreas fornecidos, esta ferramenta calcula automaticamente a capacidade remanescente de transmissão da rede elétrica sob estudo, outrora executado manualmente pelo ONS. Ou seja, é possível determinar o valor máximo de injeção de potência ativa que o sistema é capaz de transmitir sem a ocorrência de violações de fluxo de potência ou tensão, em condições de operação normal ou sob contingência. Esta análise é realizada considerando os barramentos candidatos, subáreas e áreas. De acordo com o CEPEL, relatórios são gerados contendo as margens nos níveis de barramento candidato, subárea e área, além de expor fatores limitantes para cada margem calculada, com indicação da natureza do fator limitante (tensão, fluxo ou convergência do caso) e do equipamento limitante (barramento ou circuito). Para

calcular a margem de transmissão, incrementos sucessivos de geração são aplicados ao sistema e, paralelo a isso, avalia-se se ocorrem violações de tensão em barra, ou de fluxo em linhas e transformadores na região observada; considerando condições de operação normal, ou de emergência (FERNANDES *et al.*, 2019).

Após a construção do sistema elétrico no programa, ou o carregamento de um já existente, o *software* dispõe de códigos que permitem a entrada de dados para a execução do cálculo da margem de transmissão e avalia a melhor combinação de inserção de gerações possíveis. O usuário também pode inserir contingências e, dessa forma, aproximar a simulação a situações reais.

De acordo com o CEPEL, esta ferramenta é executada por meio dos seguintes códigos:

- **Código de Execução DEMA** (Dados de Estudo de Margem de Transmissão): este é obrigatório para a execução do cálculo da margem de transmissão. Ele controla a entrada de dados de Barramentos Candidatos, Subestação, Subárea, Área, Potência de Curto-Circuito e Potência de Elevação de Subestação;
- **Código de Execução DEMA** (Dados de Geração para Margem de Transmissão): é de execução opcional. Controla a entrada de dados de gerações complementares e que compõem subestação com os Barramentos Candidatos do DEMA e Potência de Elevação de Subestação;
- **Código de Execução DCTG** (Dados de ConTinGências): Também é de execução opcional e controla a entrada de dados de contingência;
- **Código de Execução DMTE** (Dados de Monitoração de TEnsão): controla a entrada de dados de região selecionada para monitoração de tensão e é de execução opcional;
- **Código de Execução DMFL** (Dados de Monitoração de FLuxo): controla a entrada de dados de região selecionada para monitoração de fluxo, é de execução opcional;
- **Código de Execução EXMT** (EXecuta cálculo da Margem de Transmissão): este código executa o cálculo da margem de transmissão, além de permitir a entrada de dados de contingências e definição do Passo de Geração.

No cálculo da margem de transmissão, o sistema é analisado na perspectiva de diversos cenários de geração e diferentes arranjos. Para evitar perda de tempo na análise e esforços computacionais, inicialmente, o caso em estudo é submetido a uma etapa de pré-processamento, que consiste em avaliar se ele está apto para o início da execução da margem de transmissão:

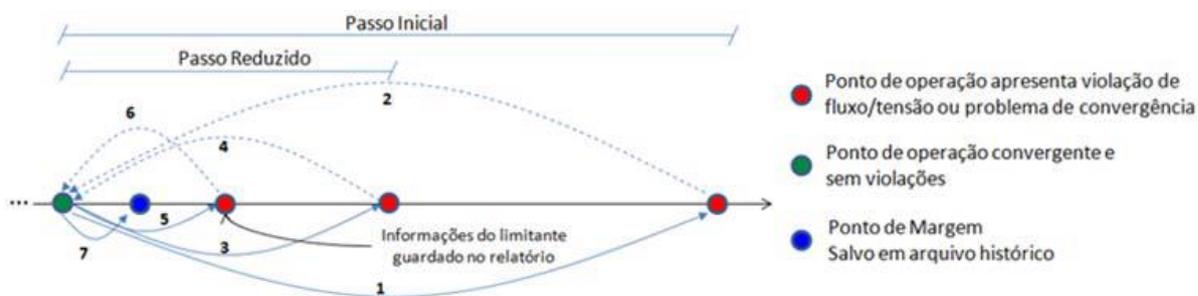
- i. De início, verifica-se se o caso apresenta alguma violação, seja de fluxo ou de tensão, se há ilhamento ou problemas de convergência. Na hipótese da ocorrência desses problemas, o programa suspende a execução e informa qual o obstáculo encontrado por meio de relatório.
- ii. Na sequência, as contingências selecionadas pelo usuário também são avaliadas para verificar se causam algum problema de violação, ilhamento ou convergência; caso ocorram algum desses problemas, o programa para a execução e emite relatório apontando as inconsistências encontradas nas contingências. É importante destacar que, a despeito da verificação de algum dos problemas citados no tocante às contingências, o usuário tem a opção de continuar com a execução do cálculo da margem de transmissão. Nessa situação, o programa retira as contingências inconsistentes e executa o cálculo (FERNANDES *et al.*, 2019).
- iii. Por fim, ainda na fase de pré-processamento, analisa-se se a elevação das subestações (novo ponto de operação, definido pelos códigos DEMA e DGMA) selecionadas pelo usuário que causam problema de convergência ou violação dos parâmetros monitorados. Novamente, caso seja encontrado algum problema em alguma subestação, o programa interrompe o processo e um relatório é emitido informando as subestações problemáticas e a natureza de seu problema.

Finalmente, se o caso base apresentado se mostrar apto na fase de pré-processamento, o cálculo da margem de transmissão é iniciado.

Durante o cálculo da margem de transmissão, a cada passo de Geração ( $P_{Gi} = P_{Gi} + passo$ ), o fluxo de potência é executado, as contingências são inseridas e o monitoramento de tensão e fluxo dos equipamentos são efetuados. Caso esse passo de incremento de geração não seja definido pelo usuário por meio do código DGMA, os valores padrão são 20 MW (valor máximo) e 5 MW (valor mínimo). O

passo de incremento de geração sofre divisões até que se atinja o passo mínimo definido, como exemplificado na Figura 4.

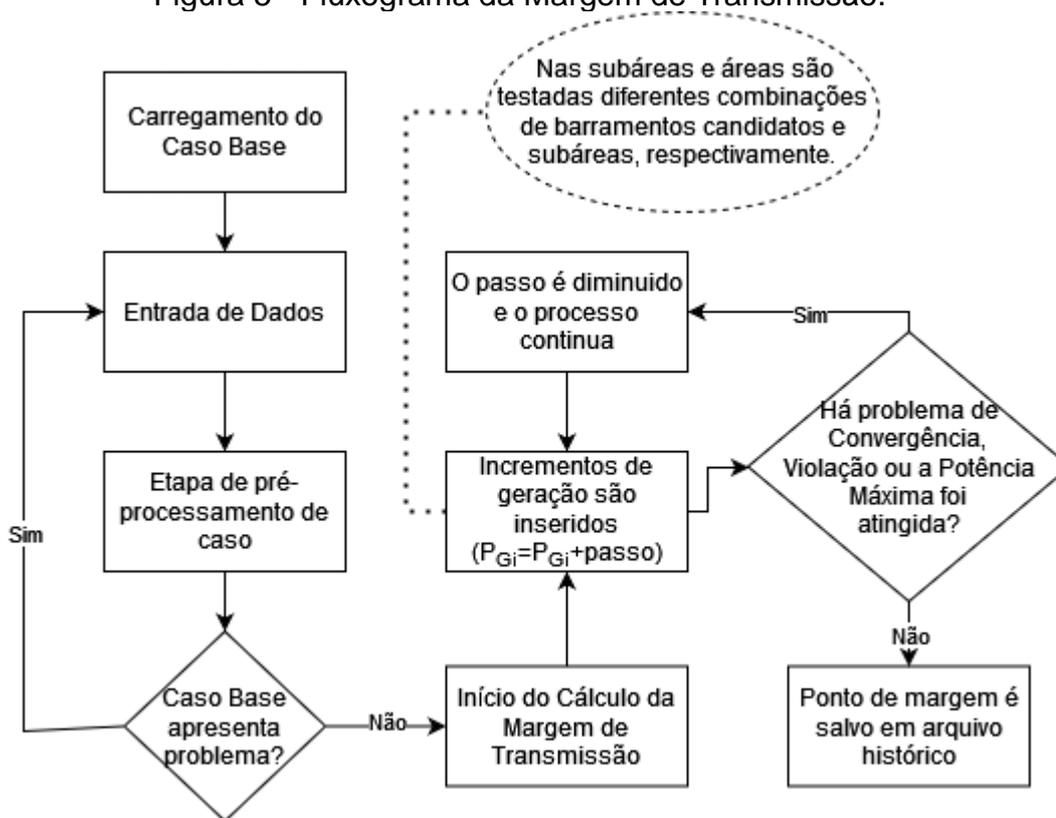
Figura 4 - Esquema de divisões sucessivas do passo de incremento de geração.



Fonte: CEPEL (2021).

Esta ação perdura até que a margem de transmissão atinja o valor de Potência Máxima, ocorra algum problema de convergência ou violações, tanto em operação normal ou emergência. Em consonância com FERNANDES *et al.* (2019), no nível de barramento candidato, a potência máxima é a potência de curto-circuito informada no código de execução DEMT. Para os níveis de subárea e área, a Potência Máxima é correspondente à margem de transmissão calculada no nível anterior. Vale enfatizar que nos níveis de subárea e área são testadas diferentes combinações de barramentos candidatos e subáreas, respectivamente, com o objetivo de encontrar a menor combinação de gerações que não cause violações, isto é, a elevação de geração mais restritiva. A Figura 5 esquematiza o processo de cálculo da margem de transmissão.

Figura 5 - Fluxograma da Margem de Transmissão.



Fonte: O autor (2022).

O produto da execução do cálculo margem de transmissão são dois arquivos CSV (*Comma-Separated Values*) com informações dos valores de margem de transmissão calculados e os fatores limitantes, equipamentos com violação e contingências limitantes das etapas de barramento candidato, subárea e área. Além de arquivos históricos contendo o ponto de operação que definiram as margens de cada barramento candidato, subárea e área (CEPEL, 2021).

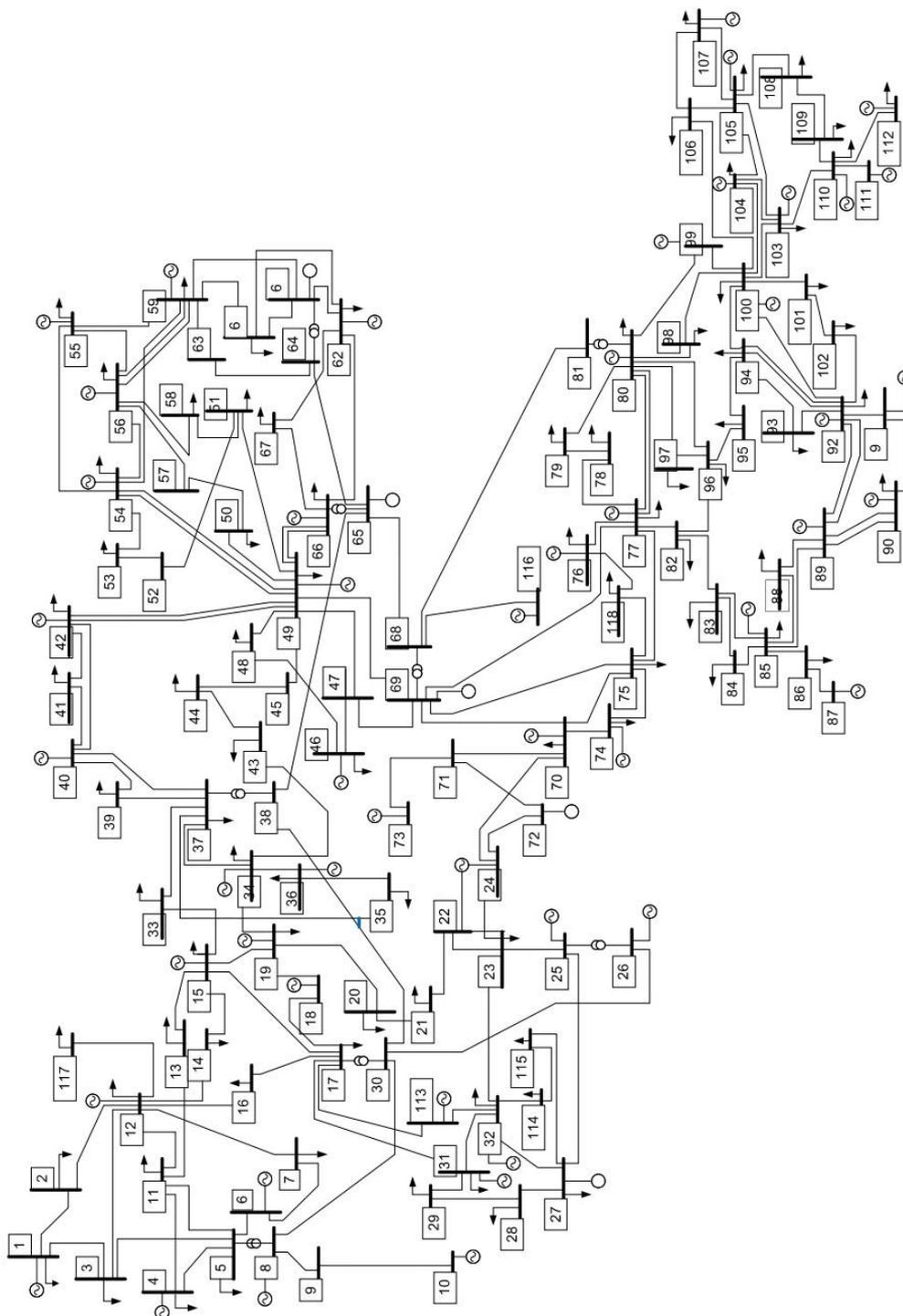
## 4 SISTEMA EM ESTUDO

Embora a NT utilizada como base para este trabalho seja referente ao SIN, o estudo da margem de transmissão será realizado em um SEP exemplo, o IEEE 118 barras representado na Figura 6. Ele representa uma porção do sistema elétrico do centro-oeste dos Estados Unidos em 1962 (PONTE, 2018) e está presente dentre os arquivos exemplos no programa ANAREDE<sup>®</sup>. Um dos motivos da escolha deste sistema foi a limitação do *software* quanto ao número de barramentos que podem ser simulados, já que a licença concedida pelo CEPEL para estudos acadêmicos se limita a simulação de até 120 barras.

Características do sistema IEEE 118 barras (CANOLA, 2006):

- 9 transformadores;
- 1 barra de referência;
- 1 barra de geração;
- 64 barras de carga;
- 52 barras com controle de reativo;
- 179 linhas de transmissão;
- $0,90 \leq V_n \leq 1,10$ ; em que  $n$  é o número da barra.

Figura 6 - Topologia do Sistema IEEE 118 Barras.



Fonte: PONTES (2018).

## 5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Após carregamento do sistema IEEE 118 barras é preciso inserir os dados pertinentes ao cálculo da margem de transmissão. Dentre eles, é necessário definir os barramentos candidatos, subáreas e áreas, que, para este caso, estava predefinido no arquivo exemplo do ANAREDE conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Lista de Barramentos Candidatos, Subáreas e Área do caso em análise.

<b>Barramento Candidato</b>			
<b>Número</b>	<b>Identificação do Barramento</b>	<b>Subárea</b>	<b>Área</b>
23	BARRA---023		
24	BARRA---024	1	
72	BARRA---072		
31	BARRA---031		
32	BARRA---032	2	
113	BARRA---113		1
1	BARRA---001		
4	BARRA---004		
8	BARRA---008	3	
12	BARRA---012		
53	BARRA---053		
54	BARRA---054	4	
49	BARRA---049		2
66	BARRA---066	5	
65	BARRA---065		

Fonte: O autor (2022).

Após a validação do caso base na etapa de pré-processamento e, em seguida, a execução do cálculo da margem de transmissão, conforme supramencionado, arquivos históricos e relatórios a respeito da margem de transmissão são disponibilizados para análise. Na Tabela 2, são mostrados os valores de Margens de Transmissão para os níveis de Barramento Candidato, Subárea e Área calculados. É importante atentar-se ao fato de que as colunas que trazem os resultados da margem de transmissão das subáreas e áreas expressam esses valores por meio de uma

inequação relacionada aos barramentos. Além disso, o valor da margem de transmissão mais restritivo da subárea e da área não necessariamente coincide com o menor valor encontrado como margem de algum barramento que as compõem. Isso se deve ao fato de, neste caso, a margem de transmissão ser obtida levando-se em consideração a combinação de todas as barras que constituem a subárea ou a área, podendo, dessa forma, apresentar valor de margem superior ao valor da menor margem de um barramento; como pode ser observado nas subáreas 2, 3, 4 e 5 e nas áreas 1 e 2.

Tabela 2 - Valores de Margens de Transmissão para os níveis de Barramento Candidato, Subárea e Área.

Barramento Candidato		Margem de Transmissão (MW)			
		Margem do Barramento		Margem da Subárea	Margem da Área
Número do Barramento	Identificação do Barramento	Margem Operação Normal	Margem Operação Emergência		
23	BARRA---023	$\leq 343.50$	$\leq 192.50$	BARRA 23 + BARRA 24 + BARRA 72 $\leq 192.50$	BARRA 1 + BARRA 4 + BARRA 8 + BARRA 12 + BARRA 23 + BARRA 24 + BARRA 72 + BARRA 113 + BARRA 32 + BARRA 31 $\leq 458.75$
24	BARRA---024	$\leq 352.25$	$\leq 352.25$		
72	BARRA---072	$\leq 616.25$	$\leq 397.50$		
31	BARRA---031	$\leq 828.00$	$\leq 803.75$	BARRA 113 + BARRA 32 + BARRA 31 $\leq 479.75$	BARRA 113 + BARRA 32 + BARRA 31 $\leq 458.75$
32	BARRA---032	$\leq 750.00$	$\leq 702.25$		
113	BARRA---113	$\leq 500.00$	$\leq 469.75$		
1	BARRA---001	$\leq 400.00$	$\leq 388.75$	BARRA 1 + BARRA 4 + BARRA 8 + BARRA 12 $\leq 408.75$	BARRA 32 + BARRA 31 $\leq 458.75$
4	BARRA---004	$\leq 630.00$	$\leq 577.50$		
8	BARRA---008	$\leq 350.00$	$\leq 292.50$		
12	BARRA---012	$\leq 580.00$	$\leq 580.00$		
53	BARRA---053	$\leq 527.50$	$\leq 211.25$	BARRA 53 + BARRA 54 $\leq 601.25$	BARRA 49 + BARRA 66 + BARRA 065 + BARRA 53 + BARRA 54 $\leq 601.25$
54	BARRA---054	$\leq 736.25$	$\leq 736.25$		
49	BARRA---049	$\leq 390.00$	$\leq 390.00$	BARRA 49 + BARRA 66 + BARRA 65 $\leq 391.25$	BARRA 49 + BARRA 66 + BARRA 54 $\leq 601.25$
66	BARRA---066	$\leq 863.75$	$\leq 863.75$		
65	BARRA---065	$\leq 762.50$	$\leq 762.50$		

Fonte: O autor (2022).

Nas Tabelas 3 e 4, são apresentados os fatores limitantes para a etapa de barramento candidato, subárea e área; em operação normal e emergência. Nelas há informações sobre qual elemento foi violado e qual o motivo. Como é o caso da barra de número 53, que teve como fator limitante a tensão, tanto em operação normal quanto em contingência; já o trecho de linha entre as barras 65 e 68, teve o fluxo

como fator limitante em operação normal (vide Tabela 3). De posse dessas informações conjugadas com os valores das margens de transmissão, as limitações da região sob estudo do sistema são conhecidas e ações podem ser tomadas a esse respeito, como alteração de topologia, reforços nos equipamentos e decidir sobre a viabilidade da inserção de geração na região.

Tabela 3 - Fatores limitantes para a etapa de Barramento Candidato.

Barramento Candidato	Operação Normal				Operação Emergência			
	Equipamento Limitante				Equipamento Limitante			
Identificação do Barramento	Fator Limitante	Nº da Barra DE	Nº da Barra PARA	Circuito	Fator Limitante	Nº da Barra DE	Nº da Barra PARA	Circuito
BARRA---023	Tensão	21			Tensão	21		
BARRA---024	Tensão	21			Margem N foi limitante*			
BARRA---072	Tensão	21			Problema de Convergência			
BARRA---031	Potência Máxima				Tensão	21		
BARRA---032	Potência Máxima				Tensão	21		
BARRA---113	Potência Máxima				Tensão	32		
BARRA---001	Potência Máxima				Tensão	1		
BARRA---004	Potência Máxima				Tensão	1		
BARRA---008	Potência Máxima				Fluxo	8	30	1
BARRA---012	Potência Máxima				Margem N foi limitante			
BARRA---053	Tensão	53			Tensão	53		
BARRA---054	Tensão	53			Margem N foi limitante			
BARRA---049	Tensão	53			Margem N foi limitante			
BARRA---066	Fluxo	65	68	1	Margem N foi limitante			
BARRA---065	Fluxo	65	68	1	Margem N foi limitante			

Fonte: O autor (2022).

\*Fator limitante foi obtido em operação normal (Modo N), sem contingência (Modo N-1).

Tabela 4 - Fatores limitantes para as etapas de Subárea e Área.

Barramento Candidato	Subárea					Área				
	Equipamento Limitante		Contingencia Limitante			Equipamento Limitante		Contingencia Limitante		
Identificação do Barramento	Fator Limitante	Nº da Barra DE	Nº da Barra DE	Nº da Barra PARA	Circuito	Fator Limitante	Nº da Barra DE	Nº da Barra DE	Nº da Barra PARA	Circuito
BARRA---023										
BARRA---024	Tensão	21	26	0	1					
BARRA---072										
BARRA---031										
BARRA---032	Tensão	32	17	113	1	Tensão	1	1	3	1
BARRA---113										
BARRA---001										
BARRA---004										
BARRA---008	Tensão	1	1	3	1					
BARRA---012										
BARRA---053										
BARRA---054	Tensão	53	53	54	1					
BARRA---049						Tensão	53	53	54	1
BARRA---066	Tensão	53								
BARRA---065										

Fonte: O autor (2022).

Além das informações presentes nas tabelas, para esse caso, o programa também emitiu arquivos históricos com os casos que definiram as margens de transmissão. No Quadro 2 é apresentado parte do arquivo histórico da etapa de barramentos candidatos, na qual está indicado qual o passo utilizado para definir a margem. Ademais, observa-se que cada barramento candidato possui dois registros: em operação normal (Modo N) e em emergência (Modo N-1). Vale pôr em evidência os arquivos históricos das etapas de subárea (Quadro 3) e área (Quadro 4), que mostram, além do passo que definiu a margem, qual o arranjo de barramentos e subáreas, respectivamente, foram utilizados para a definição da margem calculada.

Quadro 2 - Lista dos casos salvos no arquivo histórico da etapa de barramento candidato.

Caso	Título	Data de modificação	Versão
1	Caso Base	08/09/2022 - 10:06:15	V11.05.01
2	Margem Barramento Candidato 23 - Passo: 2.500MW - Modo (N-1)	08/09/2022 - 10:06:48	V11.05.01
3	Margem Barramento Candidato 23 - Passo: 1.000MW - Modo (N)	08/09/2022 - 10:06:44	V11.05.01
4	Margem Barramento Candidato 24 - Passo: 1.000MW - Modo (N)	08/09/2022 - 10:08:03	V11.05.01
5	Margem Barramento Candidato 72 - Passo: 2.500MW - Modo (N-1)	08/09/2022 - 10:09:32	V11.05.01
6	Margem Barramento Candidato 72 - Passo: 1.250MW - Modo (N)	08/09/2022 - 10:09:27	V11.05.01
7	Margem Barramento Candidato 31 - Passo: 1.250MW - Modo (N-1)	08/09/2022 - 10:12:13	V11.05.01
8	Margem Barramento Candidato 31 - Passo: 10.000MW - Modo (N)	08/09/2022 - 10:12:07	V11.05.01
9	Margem Barramento Candidato 32 - Passo: 1.000MW - Modo (N-1)	08/09/2022 - 10:14:50	V11.05.01
10	Margem Barramento Candidato 32 - Passo: 10.000MW - Modo (N)	08/09/2022 - 10:14:44	V11.05.01
11	Margem Barramento Candidato 113 - Passo: 1.000MW - Modo (N-1)	08/09/2022 - 10:16:52	V11.05.01
12	Margem Barramento Candidato 113 - Passo: 10.000MW - Modo (N)	08/09/2022 - 10:16:39	V11.05.01
13	Margem Barramento Candidato 1 - Passo: 1.250MW - Modo (N-1)	08/09/2022 - 10:18:26	V11.05.01
14	Margem Barramento Candidato 1 - Passo: 10.000MW - Modo (N)	08/09/2022 - 10:18:19	V11.05.01

Fonte: O autor (2022).

Quadro 3 - Lista dos casos salvos no arquivo histórico da etapa de subárea.

Caso	Título	Data de modificação	Versão
1	Caso Base	08/09/2022 - 10:34:11	V11.05.05
2	Subarea 1 - Permutacao: 23 24 72	08/09/2022 - 10:34:13	V11.05.05
3	Subarea 2 - Permutacao: 113 32 31	08/09/2022 - 10:34:28	V11.05.05
4	Subarea 3 - Permutacao: 1 4 8 12	08/09/2022 - 10:39:17	V11.05.05
5	Subarea 4 - Permutacao: 53 54	08/09/2022 - 10:39:45	V11.05.05
6	Subarea 5 - Permutacao: 49 66 65	08/09/2022 - 10:39:47	V11.05.05

Fonte: O autor (2022).

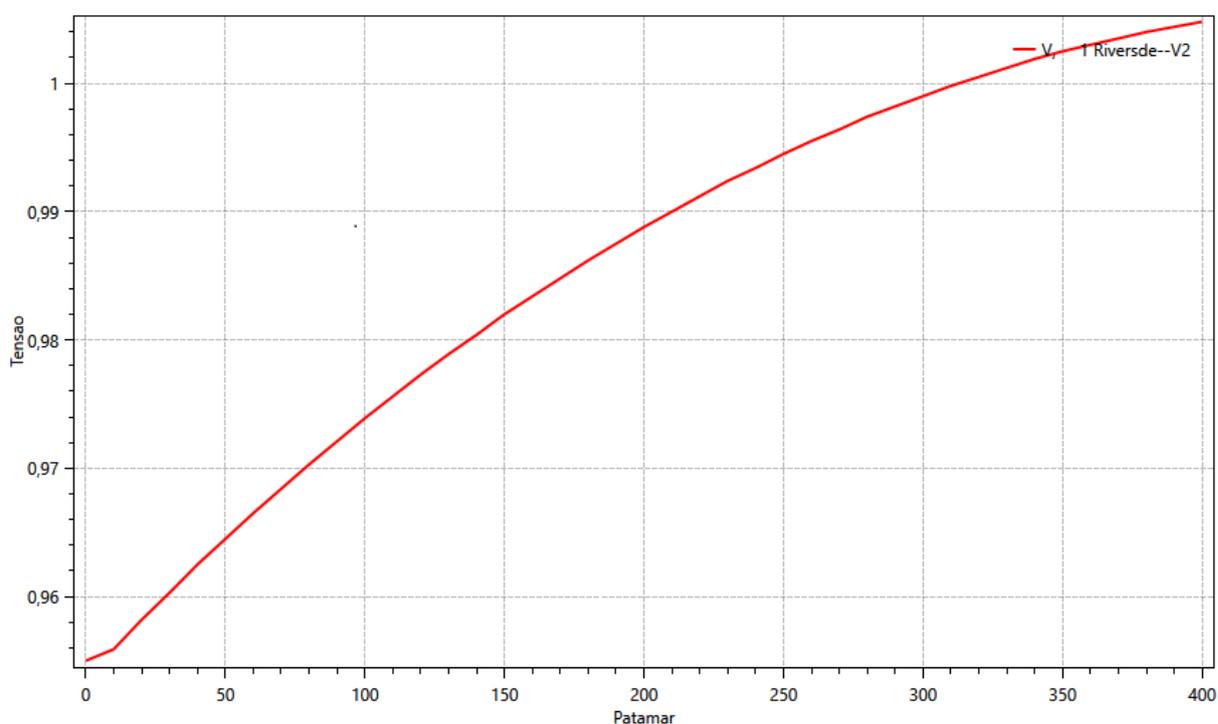
Quadro 4 - Lista dos casos salvos no arquivo histórico da etapa de área.

Caso	Título	Data de modificação	Versão
1	Caso Base	08/09/2022 - 10:39:47	V11.05.05
2	Margem Area 1 - Passo: 10.000MW - Permutacao: 3 1 2	08/09/2022 - 10:40:39	V11.05.05
3	Margem Area 2 - Passo: 10.000MW - Permutacao: 5 4	08/09/2022 - 10:40:51	V11.05.05

Fonte: O autor (2022).

Também são gerados arquivos gráficos dos barramentos candidatos em operação normal do tipo Tensão (p.u.) x Patamar (MW), apresentado na Figura 7, que representa o gráfico do Barramento Candidato 1. Ao analisar o gráfico, nota-se que ele está condizente com a margem de transmissão encontrada para a Barra 1 em operação normal na Tabela 2; bem como com o fator limitante apontado na Tabela 3, já que sua tensão varia em torno de 1 p.u. e sua potência cresce atingindo a potência máxima.

Figura 7 - Gráfico do barramento candidato 1.



Fonte: O autor (2022).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho abordou o cálculo da capacidade remanescente de um sistema elétrico para escoamento de geração de energia, ou seja, a margem de transmissão do sistema. Tema de suma importância para o comércio de energia elétrica; visto que, conforme abordado, este é um dos estudos que precede a realização de leilões de energia e é usado como um dos critérios de classificação nesses leilões pelo Ministério de Minas e Energia.

A base do estudo é o fluxo de potência, que evidencia informações a respeito do sistema em estudo, tais como: estado da rede (tensão e ângulo nas barras), distribuição dos fluxos nas linhas de transmissão e transformadores, além de outras grandezas. O cálculo da margem de transmissão mostra quanto de potência ativa pode ser injetada a mais no sistema, de modo a viabilizar o crescimento da oferta de energia sem a necessidade de novos investimentos de ampliação na infraestrutura de transmissão.

O estudo foi realizado no sistema IEEE 118 barras como o auxílio do programa ANAREDE<sup>®</sup> por meio da ferramenta do Cálculo Automático da Margem de Transmissão. Este poderoso *software* executa o cálculo considerando o sistema operando em condições normais e em emergência, conforme entrada de dados do usuário, tendo como resultado relatórios com informações da margem de transmissão do sistema e limitações encontradas nos elementos que o compõe.

Em que pese o ANAREDE<sup>®</sup> não indique diretamente de forma automática os barramentos candidatos, subáreas e áreas; o *software* auxilia o usuário nesta definição na etapa de pré-processamento. Haja vista que nesta fase é avaliada a aptidão dos barramentos indicados a serem submetidos a execução do cálculo da margem de transmissão.

Apesar do sistema sobre o qual recaiu o estudo não ter grandes dimensões quando comparado ao SIN, para o intuito do trabalho foi bastante útil. Uma vez que foi possível visualizar e analisar o resultado da simulação para o cálculo da capacidade remanescente para escoamento de geração de energia do sistema, seus fatores limitantes e as inequações que estabelecem a interdependência entre a capacidade de escoamento dos barramentos candidatos e das subáreas e áreas.

Como sugestão de trabalhos futuros:

- Analisar os impactos da introdução de fontes renováveis realizando as

considerações pertinentes;

- Aplicar o estudo a uma parte do SIN considerando a nota técnica mais atualizada.

## REFERÊNCIAS

- CANOLA, Saulo Ricardo. **Alocação de unidades de geração termelétricas em sistemas elétricos de potência**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <https://ute.gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2019/04/Canola.pdf>. Acesso: 20 de set. 2022.
- CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa de análise de redes**: manual do usuário. Rio de Janeiro: CEPEL, 2021. Disponível em: <http://www.cepel.br/produtos/anared-2/>. Acesso em: 15 de set. 2022.
- DURCE, Carolina Corrêa. **Normalização complexa e cálculo de fluxo de potência para sistemas elétricos emergentes**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/29271/R%20-%20D%20-%20CAROLINA%20CORREA%20DURCE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso: 26 de jul. 2022.
- EJEBE G. C. *et al.* Available transfer capability calculations. **IEEE Transactions on Power Systems**, Manchester, nov. 1998. Disponível em: <https://scihub.se/10.1109/59.736300>. Acesso em: 19 de set. 2022.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão de energia 2029**. Brasília: EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>. Acesso em: 15 de mar. 2022.
- FERNANDES, Renan Pinto *et al.* Utilização de ferramenta para cálculo automático de margem de transmissão em estudos para leilões de energia. *In*: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 25., 2019, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT, 2019. p. 1-9. Disponível em: <https://www.bvr.com.br/snptee/xxvsnptee/public/GAT/4359.pdf>. Acesso em: 13 de set. 2022.
- LIMA, Sérgio Felipe Falcão. **Metodologia de cálculo da margem de transmissão visando subsidiar leilões de energia**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2019-1/2016033332--153/file>. Acesso em: 13 de ago. 2022.
- MACÊDO, Ana Vitória de Almeida. **Solução de fluxo de potência, cálculo da estabilidade de tensão e equivalente de redes com aplicações utilizando o ANAREDE®**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009. Disponível em:

<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/17281/1/ANA%20VIT%c3%93RIA%20DE%20ALMEIDA%20MAC%c3%8aDO%202009.pdf>. Acesso em: 02 de ago. 2022.

MEDEIROS, Carlos. **Introdução ao estudo de sistemas elétricos de potência**. Goiânia: PUC Goiás, 2017. Disponível em: [https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/18795/material/01\)SistEletricosCap01\\_Fundamentos.pdf](https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/18795/material/01)SistEletricosCap01_Fundamentos.pdf). Acesso em: 11 de ago. 2022.

MOHN, Fritz Walter. **Uso de modelos desacoplados em estudos de estabilidade de tensão**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal De Itajubá, Itajubá, 2005. Disponível em: [https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/2561/Tese\\_200529640.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/2561/Tese_200529640.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 15 de ago. 2022.

MONTICELLI, A. J., **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/ufpr2/professor/8/Liv-Monticelli%20Fluxo%20De%20Carga-1983.pdf>. Acesso em: 17 de mar. 2022.

NORTH AMERICAN ELECTRIC RELIABILITY COUNCIL. **Available transfer capability definitions and determination: a framework for determining available transfer capabilities of the interconnected transmission networks for a commercially viable electricity market**. Atlanta: NERC, 1996. Disponível em: <http://www.ece.iit.edu/~flueck/ece562/atcfinal.pdf>. Acesso em: 19 de set. 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Metodologia, premissas e critérios para a definição da capacidade remanescente do SIN para escoamento de geração pela rede básica, DIT e ICG**. Rio de Janeiro: ONS, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-644/NT-ONS%20DPL%200007-2022%20-%20EPE-DEE-RE-002-2022-r0%20LEN-A-4-2022.pdf>. Acesso em: 11 de maio 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Quantitativos da capacidade remanescente do sin para escoamento de geração pela rede básica, DIT e ICG**. Rio de Janeiro: ONS, 2022. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-644/2022-03-28\\_NT%200035-ONS-2022%20LEN-A-4%202022-r0.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-644/2022-03-28_NT%200035-ONS-2022%20LEN-A-4%202022-r0.pdf). Acesso em: 10 de set. 2022.

PONTES, Rafael de Paiva. **Nova metodologia full newton para consideração dos limites de geração de potência reativa no problema de fluxo de potência**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/6933/1/rafaeldepaivapontes.pdf>. Acesso em: 12 de ago. 2022.