



MÉTODOS TRADICIONAIS DE ANÁLISE DE FLUXO DE CARGA APLICADOS A SISTEMAS DESBALANCEADOS

Sérgio Ferreira de Paula Silva¹, Fabiana Alves Pereira²

¹Universidade Federal de Uberlândia – UFU

²Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

Resumo - A presença cada vez mais frequente de dispositivos não lineares nos sistemas elétricos de potência (SEP) dificulta a aplicação de técnicas tradicionais de análise, consolidadas na literatura, como por exemplo o fluxo de carga de interesse a este trabalho. A análise do fluxo de carga é crucial para o planejamento, operação e controle eficiente dos SEP, mas devido à natureza desses sistemas possuem desafios que requerem o uso de algoritmos adequados e técnicas avançadas para obter resultados precisos e confiáveis. Assim sendo, este trabalho tem como objetivo contribuir para a adaptação de métodos tradicionais de solução do fluxo de carga, tornando-os aplicáveis a sistemas elétricos de potência desequilibrados. Para avaliar a eficácia do método adaptado, foi realizado um estudo computacional utilizando o sistema desequilibrado de 13 barras fornecido pelo IEEE. Espera-se por meio dos resultados obtidos nesse artigo contribuir significativamente para viabilização do estudo do fluxo de carga dos SEP em cenários reais.

Palavras-Chave – Fluxo de carga, desequilíbrio, Newton-Raphson, Gauss-Seidel

CONVENTIONAL LOAD FLOW ANALYSIS METHODS APPLIED TO UNBALANCED SYSTEMS

Abstract - The increasingly frequent presence of non-linear devices in power systems (PS) hinders the application of traditional analysis techniques, well-established in the literature, such as the load flow, which is of interest to this study. Load flow analysis is crucial for the planning, operation, and efficient control of power systems, but due to the nature of these systems, they pose challenges that require the use of appropriate algorithms and advanced techniques to achieve accurate and reliable results. Therefore, this work aims to contribute to the adaptation of traditional load flow solution methods, making them applicable to unbalanced power systems. To evaluate the effectiveness of the adapted method, a computational study was performed using the unbalanced 13-bus system provided by the IEEE. The results obtained in this paper are expected to significantly contribute to enabling the load flow analysis of power systems in real-world scenarios.

Keywords - Load flow, unbalance, Newton-Raphson, Gauss-Seidel.

I. INTRODUÇÃO

A demanda global por eletricidade continua a crescer exponencialmente, impulsionada por avanços tecnológicos, expansão urbana e necessidades industriais. Em um mundo cada vez mais interconectado, onde a eletricidade é a espinha dorsal da infraestrutura moderna, garantir a confiabilidade e a estabilidade dos sistemas elétricos de potência é uma tarefa de vital importância.

Os sistemas elétricos de potência (SEP) são responsáveis por gerar, transmitir e distribuir eletricidade em grande escala. Eles conectam usinas de geração a consumidores finais, fornecendo energia para residências, comércios, indústrias e setores críticos, como hospitais e centros de dados. O estudo desses sistemas, portanto, desempenha um papel crucial na garantia da disponibilidade contínua de energia elétrica.

A avaliação dos sistemas elétricos de potência envolve a análise minuciosa de diversos estudos, como fluxo de potência, estabilidade, curtos-circuitos, fluxo harmônico, transitórios eletromagnéticos, proteção e controle. Por meio de ferramentas e técnicas especializadas, o engenheiro modela, simula e otimiza o comportamento desses complexos, identificando pontos fracos, prevenindo falhas e desenvolvendo estratégias para aprimorar a eficiência e a segurança operacional.

O fluxo de carga, também conhecido como fluxo de potência, é, provavelmente, o estudo mais amplamente utilizado na análise de sistemas elétricos de potência. Ele desempenha um papel fundamental na compreensão do comportamento de suas variáveis e na garantia de uma operação confiável. O fluxo de carga permite determinar as magnitudes e as direções dos vetores das correntes e tensões em cada elemento do sistema, levando em consideração as características dos geradores, transformadores, linhas de transmissão, cargas e dispositivos de controle. Essa análise é essencial para o planejamento adequado da operação e expansão do SEP, além de auxiliar na detecção de problemas potenciais, como sobrecargas, instabilidades e perdas de energia. Os resultados do fluxo de carga são capitais no dimensionamento de equipamentos, na implementação de estratégias de controle e proteção, bem como a otimização da eficiência operacional. Portanto, o estudo do fluxo de carga é uma ferramenta valiosa para a avaliação e o aperfeiçoamento

dos sistemas elétricos de potência, fornecendo uma base sólida para a confiabilidade e o desempenho energético do sistema

Embora o fluxo de carga seja tradicionalmente aplicado a SEP balanceados, é importante reconhecer que os sistemas reais muitas vezes apresentam desequilíbrios significativos, especialmente nas redes de distribuição. A crescente adoção de fontes de geração distribuída, como painéis solares e turbinas eólicas, introduz, ainda mais, variações na demanda horária/diária. Essas fontes de energia renovável geralmente são interconectadas de maneira assimétrica, resultando em desequilíbrios entre as fases do sistema. Além disso, a distribuição desigual de cargas entre as fases pode ocorrer devido a diferentes padrões de uso de energia pelos consumidores. Diante desse cenário, a análise do fluxo de carga em sistemas desbalanceados torna-se essencial para avaliar o comportamento do sistema, identificar possíveis problemas de estabilidade, limitações de capacidade e desgaste desigual dos equipamentos.

Este artigo tem como objetivo contribuir para a utilização de métodos tradicionais de solução de fluxo de carga aplicados a sistemas elétricos de potência desequilibrados. Por meio da exploração desses métodos e da análise de casos práticos, busca-se oferecer orientações para os profissionais e pesquisadores interessados em lidar com os desafios apresentados pela natureza desbalanceada dos sistemas elétricos.

II. MÉTODOS TRADICIONAIS DE SOLUÇÃO DO FLUXO DE CARGA EQUILIBRADO

Os sistemas elétricos de potência são caracterizados por serem não lineares, ou seja, as relações entre tensão, corrente e potência não seguem uma relação linear simples. Essa não linearidade decorre de vários fatores, como a presença de elementos não lineares, como retificadores e inversores, além de fenômenos como saturação de transformadores e características dos sistemas motrizes.

Devido a essa natureza, a solução do fluxo de carga é um desafio que requer o uso de algoritmos de solução adequados e a aplicação de técnicas avançadas para obter resultados precisos e confiáveis.

Ao explorar a ampla bibliografia disponível sobre análise de fluxo de carga, é comum encontrar referências aos métodos de Gauss-Seidel e Newton-Raphson [1-7]. Esses dois métodos são amplamente estudados e aplicados devido à sua eficácia e versatilidade, e, portanto, serão os métodos considerados neste trabalho.

O método de Gauss-Seidel (GS) é frequentemente utilizado em casos em que o sistema é menor e menos complexo. Ele é relativamente mais simples de ser implementado, mas pode ser mais sensível a casos de sistemas mal condicionados e apresentar uma convergência mais lenta em comparação ao método de Newton-Raphson (NR). Por outro lado, NR é mais complexo de ser implementado devido ao cálculo das derivadas parciais e matrizes jacobianas, mas demanda um menor tempo para a convergência.

O mal condicionamento em sistemas elétricos de potência pode ser frequentemente atribuído à falta de informações precisas sobre os componentes do sistema ou a erros de digitação nos dados de entrada. Esses problemas podem

resultar em valores numéricos que afetam negativamente o desempenho dos algoritmos de solução, levando a dificuldades de convergência ou soluções imprecisas.

Independente do método de utilizado, o processo de solução geralmente começa com uma estimativa (chute) inicial para as variáveis desconhecidas, como as tensões nas barras do sistema. Essa estimativa pode ser baseada em valores razoáveis ou em uma solução anterior.

O próximo passo envolve a resolução das equações do fluxo de carga, que relacionam as impedâncias/admitâncias, tensões, correntes, potências ativas e reativas nas barras do sistema. Neste momento a matriz de admitâncias é determinada. Também se faz necessário a especificação das barras, indicando o barramento de referência e os barramentos de carga e geração (se houver).

Uma vez que as equações são resolvidas, os valores das variáveis desconhecidas são obtidos. Em seguida, é realizada uma comparação entre os resultados obtidos e uma condição esperada ou critério de convergência pré-definido. Esse critério pode ser uma diferença máxima permitida entre as iterações consecutivas, um valor absoluto mínimo para o erro ou outro indicador de convergência.

Se o erro entre as iterações for considerado pequeno o suficiente, ou seja, se a condição de convergência for satisfeita, a solução é considerada encontrada e o processo é encerrado. Nesse caso, os valores das variáveis desconhecidas fornecem a solução do fluxo de carga no sistema elétrico de potência.

No entanto, se o erro entre as iterações ainda for significativo, indicando uma falta de convergência, o processo é repetido por um número pré-determinado de iterações, geralmente definido de antemão. Se, após o número máximo de iterações ser atingido, o erro máximo permitido ainda não for alcançado, o sistema é considerado não convergente.

A. Gauss-Seidel

No domínio da frequência, na forma matricial, um sistema de n barras pode ser descrito pelo relacionamento entre as correntes (\vec{I}), admitâncias (\vec{Y}) e tensões (\vec{V}).

$$[\vec{I}] = [\vec{Y}] \cdot [\vec{V}] \quad (1)$$

Para uma barra a qualquer:

$$I_a = \bar{Y}_{a1}V_1 + \bar{Y}_{a2}V_2 + \dots + \bar{Y}_{aa}V_a + \dots + \bar{Y}_{an}V_n \quad (2)$$

$$I_a = \frac{S_a^*}{V_a^*} \quad (3)$$

Utilizando k como indicação de iteração, e considerando a contribuição de Seidel ao equacionamento de Gauss [5], tem-se:

$$V_a^k = \frac{1}{\bar{Y}_{aa}} \cdot \left[\frac{(S_a^{k-1})^*}{(V_a^{k-1})^*} - \sum_{b=1}^{a-1} \bar{Y}_{ab} \cdot V_b^k - \sum_{b=a+1}^n \bar{Y}_{ab} \cdot V_b^{k-1} \right] \quad (4)$$

É observado que, em sistemas equilibrados, o processo de equacionamento é relativamente simples e de implementação direta. O esforço computacional em cada iteração é baixo, principalmente porque não é necessária a inversão de matrizes. No entanto, um aspecto a ser considerado é que a convergência do método é lenta e depende do quadrado do número de barras do sistema. Isso significa que, à medida que o sistema se torna maior e mais complexo, o tempo necessário

para atingir a convergência desejada aumenta consideravelmente. Portanto, embora o método seja fácil de implementar, é importante considerar a sua eficiência, em termos de tempo computacional, quando aplicado a sistemas elétricos de potência de grande porte.

B. Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson [8] é um algoritmo amplamente utilizado na solução do fluxo de carga e está fundamentado nas relações de potência ativa e reativa com as tensões de cada barra.

Para sistemas equilibrados, os valores das potências ativa e reativa em cada barra são:

$$P_a = \sum_{b=1}^n V_a \times V_b \times (G_{ab} \times \cos \theta_{ab} + B_{ab} \times \sin \theta_{ab}) \quad (5)$$

$$Q_a = \sum_{b=1}^n V_a \times V_b \times (G_{ab} \times \sin \theta_{ab} - B_{ab} \times \cos \theta_{ab}) \quad (6)$$

Para cada iteração do método, é necessário calcular o vetor das potências líquidas ($\Delta P, Q$), que representa a diferença entre as potências geradas e as potências (ativa e reativa) consumidas em cada barra. As derivadas parciais das equações do fluxo de carga em relação às tensões das barras constituem o jacobiano (J) do método. De posse destes valores, as discrepâncias dos módulos e ângulos das tensões ($\Delta \theta, V$) são obtidas e, conseqüentemente, o valor da tensão de cada iteração é calculado. As novas estimativas das tensões são então atualizadas e o processo de iteração continua até que a convergência seja alcançada. Na forma matricial, considerando um sistema de n barras e l barras de carga, resumidamente, tem-se:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_{n-1}} & \vdots & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_\ell} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial \theta_{n-1}} & \vdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial V_\ell} \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_{n-1}} & \vdots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_\ell} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial Q_\ell}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_\ell}{\partial \theta_{n-1}} & \vdots & \frac{\partial Q_\ell}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_\ell}{\partial V_\ell} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} H_{(n-1 \times n-1)} & N_{(n-1 \times l)} \\ M_{(l \times n-1)} & L_{(l \times l)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_l \end{bmatrix}^k = [J]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_\ell \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \\ V_1 \\ \vdots \\ V_l \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \\ V_1 \\ \vdots \\ V_l \end{bmatrix}^{k-1} + \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (10)$$

A dimensão do vetor de diferenças de potências e do vetor de resultados de ângulos e módulos é $n-l+l$, mesma lógica se aplica ao Jacobiano, cuja dimensão resulta em $(n-l+l) \times (n-l+l)$.

As derivadas parciais do Jacobiano, resultam nas seguintes equações:

$$H_{ab} = V_a \times V_b \times (G_{ab} \times \sin \theta_{ab} - B_{ab} \times \cos \theta_{ab}) \quad (11)$$

$$H_{aa} = -(V_a^2 \times B_{aa}) - Q_a \quad (12)$$

$$N_{ab} = V_a \times (G_{ab} \times \cos \theta_{ab} + B_{ab} \times \sin \theta_{ab}) \quad (13)$$

$$N_{aa} = V_a \times G_{aa} + \frac{P_a}{V_a} \quad (14)$$

$$M_{ab} = -V_a \times V_b \times (G_{ab} \times \cos \theta_{ab} + B_{ab} \times \sin \theta_{ab}) \quad (15)$$

$$M_{aa} = -(V_a^2 \times G_{aa}) + P_a \quad (16)$$

$$L_{ab} = V_a \times (G_{ab} \times \sin \theta_{ab} - B_{ab} \times \cos \theta_{ab}) \quad (17)$$

$$L_{aa} = -V_a \times B_{aa} + \frac{Q_a}{V_a} \quad (18)$$

III. MÉTODOS TRADICIONAIS ADAPTADOS PARA FLUXO DE CARGA DESEQUILIBRADO

A solução de sistemas desequilibrados pode ser realizada de duas maneiras: por fase ou por sequências.

Na modelagem por fase, cada fase do sistema é considerada individualmente, levando em conta as características de impedância, interações e conexões específicas de cada fase. Por outro lado, a modelagem por sequências considera as componentes positiva, negativa e zero do sistema, resultando em três sistemas balanceados distintos.

Ambas as abordagens têm suas vantagens e aplicabilidades específicas. A modelagem por fase é mais adequada quando se deseja uma análise mais detalhada e precisa, levando em conta as características específicas de cada fase. Por outro lado, a modelagem por sequências é útil quando se busca uma simplificação do modelo, mantendo um nível satisfatório de precisão quando os desequilíbrios são pequenos. Este trabalho optou por trabalhar a modelagem por fase.

Também se faz necessário definir a configuração do sistema em relação às fases e às conexões de neutro e terra [9,10]. Existem três configurações principais:

- Três fases: Nesse caso, considera-se apenas as três fases do sistema, sem conexão de neutro ou terra. A matriz de admitâncias, para uma barra, terá dimensão 3x3, representando as conexões e impedâncias entre as três fases.
- Três fases e neutro: Aqui, além das três fases, é considerada uma conexão de neutro. O neutro é utilizado como referência para os sistemas equilibrados, e a matriz de admitâncias, para uma barra, terá dimensão 4x4, incluindo as conexões e impedâncias entre as três fases e o neutro.
- Três fases, neutro e terra: Nessa configuração é possível incluir os caminhos/impedâncias entre os diversos ponto do SEP. A matriz de admitâncias, para uma barra, terá dimensão 5x5, representando as conexões e impedâncias entre as três fases, o neutro e o terra.

Devido à dificuldade de obtenção dos parâmetros dos sistemas de aterramento, optou-se pela configuração de 4 fios, 3 fases e neutro.

Naturalmente, a modelagem dos componentes do SEP deve seguir esta mesma opção. Neste ponto, a maior dificuldade está relacionada às diferentes conexões dos transformadores. Existem várias configurações de conexão (lado de tensão superior e inferior) de transformadores, como delta, estrela isolada, estrela diretamente aterrada, estrela aterrada por impedância, zigue-zague, cada uma com suas particularidades [11]. Cada uma dessas configurações possui implicações distintas na modelagem do sistema elétrico de potência e na análise do fluxo de carga desequilibrado.

Uma vez montada a matriz de admitâncias é necessário fazer a adequação das equações dos modelos tradicionais de fluxo de carga para contemplar o fluxo de carga desequilibrado. Isso envolve introduzir termos e componentes que levem em conta as variações entre as fases e o efeito do desequilíbrio, garantindo uma representação precisa e completa do comportamento do sistema elétrico de potência em condições desequilibradas.

A. Gauss-Seidel

A forma matricial indicada pela equação (1) não possui alterações, mas as dimensões são diferentes. Por exemplo, para um sistema equilibrado de 5 barras, os vetores \dot{I} e \dot{V} , possuem dimensão 5, e a matriz \bar{Y} , 5x5. Já para o mesmo sistema, considerando as fases e o neutro, as dimensões são 20 para \dot{I} e \dot{V} , e 20x20 para \bar{Y} .

Reescrevendo (4) para incluir todas as fases f , tem-se:

Utilizando f (linha) e g (coluna) como indicações para fase ou neutro (R, S, T, N), a equação (4) adaptada para o cálculo desequilibrado resulta em:

$$[\dot{V}_a]_f^k = \sum_{g=R}^N \left[\frac{1}{[\bar{Y}_{aa}]_{fg}} \right] \times \begin{bmatrix} [\dot{S}_a^*]_g^k \\ [\dot{V}_a^*]_g^{k-1} \\ - \sum_{b=1}^{a-1} \sum_{i=R}^N \sum_{j=R}^N [\bar{Y}_{ab}]_{ij} \times [\dot{V}_b]_j^k \\ - \sum_{b=a+1}^N \sum_{i=R}^N \sum_{j=R}^N [\bar{Y}_{ab}]_{ij} \times [\dot{V}_b]_j^{k-1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Onde:

$$[\bar{Y}_{aa}]_{fg} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{RR} & \bar{Y}_{RS} & \bar{Y}_{RT} & \bar{Y}_{RN} \\ \bar{Y}_{SR} & \bar{Y}_{SS} & \bar{Y}_{ST} & \bar{Y}_{SN} \\ \bar{Y}_{TR} & \bar{Y}_{TS} & \bar{Y}_{TT} & \bar{Y}_{TN} \\ \bar{Y}_{NR} & \bar{Y}_{NS} & \bar{Y}_{NT} & \bar{Y}_{NN} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{- submatriz de admitâncias da} \\ \text{barra a, os índices } f, g, h, i \text{ e } j \\ \text{indicam a posição interna a} \\ \text{esta matriz.} \end{array}$$

$[\dot{V}_a]_f^k$ - fase f da barra a na iteração k

A equação também é de fácil implementação computacional, no entanto, a inversão da \bar{Y}_{aa} pode não ser passível em função da configuração do sistema, como, por exemplo, nas conexões em delta ou estrela isolada, barramentos sem referência de neutro.

B. Newton-Raphson

Da mesma forma que para o método de Gauss-Seidel, as dimensões dos vetores e matrizes foram multiplicadas por 4, assim como o Jacobiano, representando assim os pontos/fases de interesse. Perfazendo as derivadas em função dos ângulos, módulos de cada fase resulta nas equações (20-27). As novas equações para as potências são apresentadas em (28-29).

Para avaliação, as equações de ambos os métodos serão aplicadas ao sistema teste de 13 barras, representativo de um sistema de distribuição desequilibrado.

Para $b \neq a$ ou $g \neq f$

$$[H_{ab}]_{fg} = [V_a]_f \times [V_b]_g \times ([G_{ab}]_{fg} \times \text{sen}[\theta_{ab}]_{fg} - [B_{ab}]_{fg} \times \text{cos}[\theta_{ab}]_{fg}) \quad (20)$$

$$[N_{ab}]_{fg} = [V_a]_f \times [V_b]_g \times ([G_{ab}]_{fg} \times \text{cos}[\theta_{ab}]_{fg} + [B_{ab}]_{fg} \times \text{sen}[\theta_{ab}]_{fg}) \quad (21)$$

$$[M_{ab}]_{fg} = -[V_a]_f \times [V_b]_g \times ([G_{ab}]_{fg} \times \text{cos}[\theta_{ab}]_{fg} + [B_{ab}]_{fg} \times \text{sen}[\theta_{ab}]_{fg}) \quad (22)$$

$$[L_{ab}]_{fg} = [V_a]_f \times ([G_{ab}]_{fg} \times \text{sen}[\theta_{ab}]_{fg} - [B_{ab}]_{fg} \times \text{cos}[\theta_{ab}]_{fg}) \quad (23)$$

Para $b = a$ e $g = f$

$$[H_{aa}]_{ff} = -([V_a]_f^2 \times [B_{aa}]_{ff}) - [Q_a]_f \quad (24)$$

$$[N_{aa}]_{ff} = ([V_a]_f \times [G_{aa}]_{ff}) - \frac{[P_a]_f}{[V_a]_f} \quad (25)$$

$$[M_{aa}]_{ff} = -([V_a]_f^2 \times [G_{aa}]_{ff}) - [P_a]_f \quad (26)$$

$$[L_{aa}]_{ff} = -([V_a]_f \times [B_{aa}]_{ff}) + \frac{[Q_a]_f}{[V_a]_f} \quad (27)$$

Naturalmente, o cálculo das potências também é alterado:

$$[P_a]_f = [V_a]_f \times \sum_{b=1}^n \sum_{g=R}^{nN} [V_b]_g \times ([G_{aa}]_{fg} \times \text{cos}[\theta_{ab}]_{fg} + [B_{aa}]_{fg} \times \text{sen}[\theta_{ab}]_{fg}) \quad (28)$$

$$[Q_a]_f = [V_a]_f \times \sum_{b=1}^n \sum_{g=R}^{nN} [V_b]_g \times ([G_{aa}]_{fg} \times \text{sen}[\theta_{ab}]_{fg} - [B_{aa}]_{fg} \times \text{scos}[\theta_{ab}]_{fg}) \quad (29)$$

IV. ESTUDO DE CASO

O diagrama unifilar da Figura 1 apresenta o sistema desequilibrado de 13 barras disponibilizado pelo IEEE [12,13]. Este sistema possui diversas configurações, englobando cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas, modeladas como impedância, corrente e potência constante; diferentes tipos de linhas de transmissão e um transformador abaixador, ou seja, apresenta diferentes conexões passíveis de ocorrência em um sistema desequilibrado.

A modelagem, por fase, dos diversos componentes de um SEP também é importante e essencial na obtenção de valores confiáveis. No entanto, o objetivo deste trabalho é verificar a aplicabilidade dos métodos GS e NR a sistemas desequilibrados. Assim, os modelos adotados são aqueles indicados na bibliografia [3,5,6,7,11,15].

Os métodos foram considerados foram configurados no software SSEP [14], considerando um erro máximo de 10^{-5} , calculado na forma retangular das tensões de cada fase.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para as tensões (em pu) em todos os barramentos considerados para cada um dos métodos. Conforme pode ser observado, as diferenças entre os valores divulgados pelo IEEE e os calculados são desprezíveis e, provavelmente, são decorrentes de aproximações nos dados de entrada.

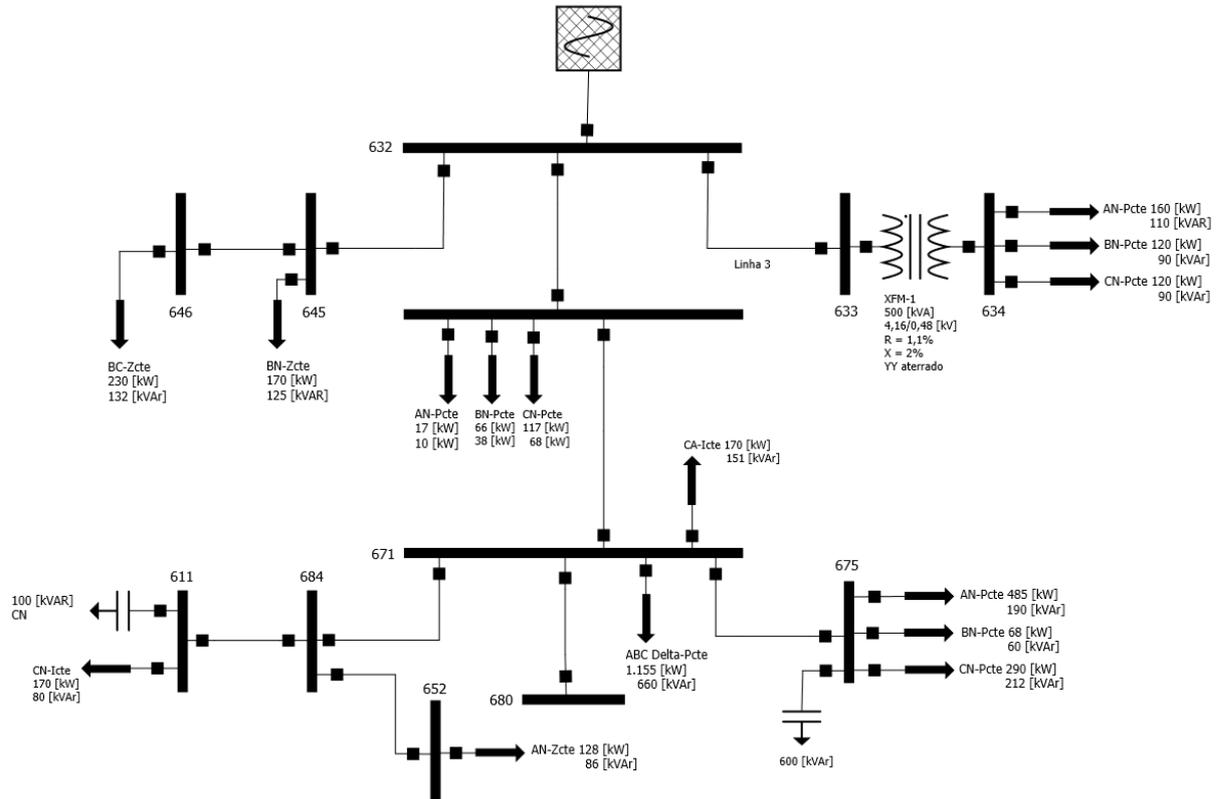


Figura 1 – Diagrama unifilar do sistema de 13 barras do IEEE [1].

Observações:

- 1 – A barra de referência 632, possui tensões $1,021 \angle -2,49^\circ$, $1,042 \angle -121,72^\circ$ e $1,0174 \angle 117,83^\circ$, respectivamente.
- 2 – A carga distribuída entre as barras 632 e 671 foi considerada como localizada no meio da linha entre estas barras, gerando uma barra fictícia, conforme indicado no diagrama unifilar.

Tabela 1 – Comparação dos resultados obtidos com os indicados pelo IEEE.

Barra	Fase	IEEE	Gauss-Seidel	Erro	NR	Erro
633	R	$1,0180 \angle -2,56^\circ$	$1,0180 \angle -2,55^\circ$	$0,00 \angle -0,39\%$	$1,0180 \angle -2,55^\circ$	$0,00 \angle -0,39\%$
	S	$1,0401 \angle -121,77^\circ$	$1,0401 \angle -121,77^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$	$1,0401 \angle -121,77^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$
	T	$1,0148 \angle 117,82^\circ$	$1,0148 \angle 117,83^\circ$	$0,00 \angle 0,01\%$	$1,0148 \angle 117,83^\circ$	$0,00 \angle 0,01\%$
634	R	$0,9940 \angle -3,23^\circ$	$0,9940 \angle -3,23^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$	$0,9940 \angle -3,23^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$
	S	$1,0218 \angle -122,22^\circ$	$1,0217 \angle -122,22^\circ$	$-0,01 \angle 0,00\%$	$1,0217 \angle -122,22^\circ$	$-0,01 \angle 0,00\%$
	T	$0,9960 \angle 117,34^\circ$	$0,9960 \angle 117,35^\circ$	$0,00 \angle 0,01\%$	$0,9960 \angle 117,35^\circ$	$0,00 \angle 0,01\%$
645	S	$1,0329 \angle -121,90^\circ$	$1,0329 \angle -121,89^\circ$	$0,00 \angle -0,01\%$	$1,0329 \angle -121,89^\circ$	$0,00 \angle -0,01\%$
	T	$1,0155 \angle 117,86^\circ$	$1,0156 \angle 117,85^\circ$	$0,01 \angle -0,01\%$	$1,0156 \angle 117,85^\circ$	$0,01 \angle -0,01\%$
646	S	$1,0311 \angle -121,98^\circ$	$1,0311 \angle -121,97^\circ$	$0,00 \angle -0,01\%$	$1,0311 \angle -121,97^\circ$	$0,00 \angle -0,01\%$
	T	$1,0134 \angle 117,90^\circ$	$1,0136 \angle 117,90^\circ$	$0,02 \angle 0,00\%$	$1,0136 \angle 117,90^\circ$	$0,02 \angle 0,00\%$
671	R	$0,9900 \angle -5,30^\circ$	$0,9901 \angle -5,30^\circ$	$0,01 \angle 0,00\%$	$0,9900 \angle -5,30^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$
	S	$1,0529 \angle -122,34^\circ$	$1,0529 \angle -122,34^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$	$1,0529 \angle -122,34^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$
	T	$0,9778 \angle 116,02^\circ$	$0,9777 \angle 116,02^\circ$	$-0,01 \angle 0,00\%$	$0,9778 \angle 116,03^\circ$	$0,00 \angle 0,01\%$
684	R	$0,9881 \angle -5,32^\circ$	$0,9882 \angle -5,32^\circ$	$0,01 \angle 0,00\%$	$0,9880 \angle -5,32^\circ$	$-0,01 \angle 0,00\%$
	T	$0,9758 \angle 115,92^\circ$	$0,9756 \angle 115,92^\circ$	$-0,02 \angle 0,00\%$	$0,9758 \angle 115,92^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$
611	T	$0,9738 \angle 115,78^\circ$	$0,9736 \angle 115,78^\circ$	$-0,02 \angle 0,00\%$	$0,9738 \angle 115,78^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$
652	R	$0,9825 \angle -5,25^\circ$	$0,9826 \angle -5,25^\circ$	$0,01 \angle 0,00\%$	$0,9825 \angle -5,24^\circ$	$0,01 \angle 0,19\%$
675	R	$0,9835 \angle -5,56^\circ$	$0,9836 \angle -5,55^\circ$	$0,01 \angle -0,18\%$	$0,9835 \angle -5,55^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$
	S	$1,0553 \angle -122,52^\circ$	$1,0553 \angle -122,51^\circ$	$-0,02 \angle -0,01\%$	$1,0553 \angle -122,52^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$
	T	$0,9758 \angle 116,03^\circ$	$0,9757 \angle 116,04^\circ$	$-0,01 \angle 0,01\%$	$0,9759 \angle 116,04^\circ$	$0,01 \angle 0,01\%$
680	R	$0,9900 \angle -5,30^\circ$	$0,9901 \angle -5,30^\circ$	$0,01 \angle 0,00\%$	$0,9900 \angle -5,30^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$
	S	$1,0529 \angle -122,34^\circ$	$1,0529 \angle -122,34^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$	$1,0529 \angle -122,34^\circ$	$0,00 \angle 0,00\%$
	T	$0,9778 \angle 116,02^\circ$	$0,9777 \angle 116,02^\circ$	$-0,01 \angle 0,00\%$	$0,9778 \angle 116,03^\circ$	$0,00 \angle 0,01\%$

V. CONCLUSÕES

A importância do estudo do fluxo de carga desequilibrado nos sistemas elétricos atuais é inegável, uma vez que reflete de maneira mais precisa as condições reais de operação das redes elétricas.

Os métodos Gauss-Seidel e Newton-Raphson são tradicionalmente utilizados para solução do fluxo de carga em sistemas elétricos equilibrados. Eles têm sido amplamente aplicados e são eficazes para resolver esse tipo de problema, sendo considerados os métodos padrões na bibliografia e prática da análise de sistemas de potência.

No entanto, ao lidar com sistemas elétricos desequilibrados, as equações do fluxo de carga se tornam mais complexas e desafiam a aplicação direta desses métodos tradicionais. Nessas situações, o método de injeção de corrente tem se destacado como uma alternativa mais adequada e eficaz para abordar o fluxo de carga desequilibrado [15-17].

Ainda assim, conforme demonstrado, é importante destacar que tanto o Gauss-Seidel quanto o Newton-Raphson continuam sendo valiosos e relevantes para a resolução do fluxo de carga em sistemas elétricos desequilibrados, pois são capazes de fornecer resultados precisos e confiáveis nesse contexto.

Não obstante, vale ressaltar que, em sistemas elétricos de potência desequilibrados ou com fenômenos não lineares mais complexos, podem ser necessários algoritmos mais avançados para a solução do fluxo de carga. Isso inclui métodos de otimização, fundamentados em técnicas de inteligência artificial como conjuntos fuzzy, algoritmos genéticos, e algoritmos de enxame de partículas, que são capazes de lidar com problemas de otimização não lineares e podem encontrar soluções eficientes em sistemas mais complexos.

REFERÊNCIAS

- [1] STEVENSON, William D. Elementos de análise de sistemas de potência. São Paulo: McGraw-Hill, 1974. 347p.
- [2] ELGERD, Olle Ingemar. Introdução a teoria de sistemas de energia elétrica. São Paulo: McGraw-Hill, 1978. 604 p.
- [3] ARRILLAGA, J. Computer modelling of electrical power systems. 2nd ed. Chichester; New York: J. Wiley, 2001. 369 p.
- [4] MONTICELLI, Alcir José. Fluxo de carga em redes de energia elétrica. São Paulo: E. Blucher; Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 1983. 164 p.
- [5] PEREIRA, C. Redes elétricas no domínio da frequência : técnicas de análise, modelos de componentes, técnicas computacionais. 1. ed. [s. l.]: Artliber, 2015. ISBN 9788588098923.
- [6] J. Arrillaga, C. P. Arnold, and B. J. Harker, "Computer modeling of electrical power systems", IEEE PES. 2nd ed. New York: Wiley, 2001
- [7] J.D. Glover and M. Sarma, "Power system analysis and design", 2nd Edition, PWS Publishing Company, Boston, MA, 1994
- [8] W. F. Tinney and C. E. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, no. 11, pp. 1449-1460, Nov. 1967, doi: 10.1109/TPAS.1967.291823.
- [9] PIZZALI, Luis Fernando Ochoa. Cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição com modelagem a quatro fios. Dissertação de Mestrado da UNESP, Ilha solteira, 2003.
- [10] R. M. Ciric, A. P. Feltrin, and L. F. Ochoa, "Power flow in four-wire distribution networks-general approach", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 18, no. 4, pp. 1283-1290, Nov. 2003
- [11] I. F. Novais, A. A. P. Junior, and S. F. P. Silva, "Modeling Three-Phase Transformers," no. 17, 2019. <https://doi.org/10.24084/repqj17.233>
- [12] W. H. Kersting, "Radial distribution test feeders," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, no. 3, pp. 975-985, Aug. 1991, <https://cmt.ee.org/pes-testfeeders/>, doi: 10.1109/59.119237.
- [13] W. H. Kersting, "Radial distribution test feeders," 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194), Columbus, OH, USA, 2001, pp. 908-912 vol.2, doi: 10.1109/PESW.2001.916993.
- [14] SILVA, S. F. P. "SSEP - Simulador de Sistemas Elétricos de Potência", Versão 5, 2004.
- [15] P. A. N. Garcia, J. L. R. Pereira, S. Jr. Carneiro, V. M. da Costa, and N. Martins, "Three-phase power flow calculations using the current injection method", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 2, pp. 508-514, May 2000
- [16] ARAUJO, L. R.; PENIDO, D. R. R.; CARNEIRO, S.; PEREIRA, J. L. R.; GARCIA, P. A. N. A comparative study on the performance of tcim full newton versus backward-forward power flow methods for large distribution systems. p. 522-526, Oct 2006
- [17] P.A.N. Garcia, J.L.R. Pereira, S. Carneiro Jr, V.M. da Costa, N. Martins Three-phase power flow calculations using the currents injection methods IEEE Trans Power Syst, 15 (2) (2000), pp. 508-514