



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PLATAFORMA COMPUTACIONAL PARA ESTUDOS DE
FLUXO DE POTÊNCIA CA

John Lennon de Lima
Wemerson Patrick Reis

PLATAFORMA COMPUTACIONAL PARA ESTUDOS DE FLUXO DE POTÊNCIA CA

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

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Me. Ítalo Arthur João Wilson Silva Meireles

Prof. Dr. Felipe de Souza Delgado

Prof. Me. Márcio Wladimir Santana

Nepomuceno, 07 de julho de 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por nos guiar durante todos esses anos, proporcionando saúde, oportunidade e força para alcançar os objetivos, e ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo do curso.

À nossa família, expressamos nossa profunda gratidão. Seu amor, encorajamento e apoio incondicional foram fundamentais em todos os momentos. Agradecemos por estarem sempre ao nosso lado, por acreditarem em nós e por nos incentivar a perseguir nossos sonhos.

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

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

"Entrega ao Senhor as tuas obras, e teus
pensamentos serão estabelecidos"
(Provérbios 16:3).

RESUMO

O estudo do fluxo de potência é fundamental para a operação e planejamento dos sistemas elétricos de potência (SEP), seja nas fases de projeto ou de ampliação dos sistemas. Por meio dessas análises, é possível otimizar, estabilizar, controlar e supervisionar a rede elétrica como um todo. Como objetivo do trabalho tem-se o desenvolvimento de uma plataforma computacional em Matlab para estudos relacionados ao fluxo de potência em corrente alternada (CA), utilizando os métodos de Newton Raphson, Newton Raphson desacoplado e Newton Raphson desacoplado rápido. A plataforma desenvolvida permite realizar análises detalhadas do fluxo de potência em sistemas elétricos de potência, contribuindo para a otimização, estabilidade, controle e supervisão da rede. Para avaliar a eficácia desses métodos, foi utilizado um sistema de teste IEEE-RTS32. Os resultados obtidos foram comparados, permitindo uma avaliação das características e desempenho de cada método. A plataforma desenvolvida neste trabalho proporcionará uma ferramenta eficiente e de fácil utilização para o cálculo do fluxo de potência em sistemas elétricos de potência.

Palavras chaves: Fluxo, SEP, Matlab, Análises, Plataforma Computacional.

ABSTRACT

The study of power flow is essential for the operation and planning of electrical power systems (EPS), as well as in the design and expansion phases of systems. Through these analyses, it is possible to optimize, stabilize, control and supervise the electrical network as a whole. The objective of this work is the development of a computational platform in Matlab for studies related to power flow in alternating current (AC), using the methods of Newton Raphson, Newton Raphson uncoupled and Newton Raphson fast uncoupled. The developed platform allows to carry out detailed analyzes of the power flow in electrical power systems, contributing to the optimization, stability, control and supervision of the network. To evaluate the effectiveness of these methods, an IEEE-RTS32 test system was used. The obtained results were compared, allowing an evaluation of the characteristics and performance of each method. The platform developed in this work will provide an efficient and easy-to-use tool for calculating the power flow in electrical power systems.

Keywords: Flow, SEP, Matlab, Analysis, Computational Platform.

TABELAS

Tabela 1 - Dados de Carga do Barramento.....	42
Tabela 2 - Dados de Linha.....	42
Tabela 3 - Parâmetros obtidos via plataforma – Fluxo CA (Newton Raphson).....	45
Tabela 4 - Parâmetros obtidos via plataforma – Tensão e ângulo das barras Newton Raphson	47
Tabela 5 - Parâmetros obtidos via plataforma – Fluxo CA (Newton Desacoplado).....	49
Tabela 6 - Parâmetros obtidos via plataforma – Tensão e ângulo das barras Newton Desacoplado.....	50
Tabela 7- Parâmetros obtidos via plataforma – Fluxo CA (Newton Desacoplado Rápido).....	52
Tabela 8- Parâmetros obtidos via plataforma – Tensão e ângulo das barras Newton Desacoplado Rápido.....	54
Tabela 9- Interações de cada método	55
Tabela 10- Tempo de cada método até alcançar convergência	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energia Elétrica 2022.....	14
Figura 2 - Modelo SEP	17
Figura 3 - Sistema Interligado Nacional.....	18
Figura 4 - Equivalente π de uma linha de transmissão	22
Figura 5 – Interface da plataforma	31
Figura 6 – Análise do Fluxo CA método de Newton Raphson	33
Figura 7 - Análise do Fluxo CA método de Newton Raphson Desacoplado	34
Figura 8 - Análise do Fluxo CA método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.....	36
Figura 9 - Fluxograma método de Newton Raphson.....	37
Figura 10 - Fluxograma método Desacoplado	39
Figura 11 - Sistema teste IEEE RTS-32	41
Figura 12 - Plataforma operando a análise do fluxo de potência Newton Rapshon.....	45
Figura 13 - Plataforma operando a análise do fluxo de potência Newton Raphson desacoplado.	48
Figura 14 - Plataforma operando a análise do fluxo de potência Newton Raphson desacoplado rápido.....	52
Figura 15 - Sentido do fluxo entre barras.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Sistema Elétrico de Potência do Brasil.....	13
2.2	Crescimento de Sistemas Elétricos de Potência.....	15
2.3	Produção de Energia.....	15
2.4	Transmissão e Distribuição.....	16
2.5	Estudo de Fluxo de Carga.....	19
2.6	Matriz Y ou matriz admitância.....	20
2.7	Modelagem de elementos de SEP.....	21
2.8	Modelagem da linha de Transmissão.....	21
2.9	Métodos de resolução de fluxo de potência.....	22
2.9.1	Newton Raphson.....	24
2.9.2	Desacoplado.....	26
2.9.3	Desacoplado Rápido.....	28
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	Visão geral da proposta de pesquisa.....	30
3.2	Implementação da plataforma.....	30
3.2.1	Método de Newton Raphson.....	32
3.2.2	Método de Newton Raphson Desacoplado.....	33
3.2.3	Método de Newton Raphson Desacoplado Rápido.....	35
3.3	Implementação dos métodos.....	36
3.4	Sistema teste MODIFICADO.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	Método de Newton Raphson.....	44
4.2	Método de Newton Raphson Desacoplado.....	48

4.3	Método de Newton Raphson Desacoplado Rápido	51
4.4	Análise de desempenho computacional	55
4.5	Análise do fluxo entre barras	56
5	CONCLUSÃO.....	58
6	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência consistem em três principais divisões, as usinas geradoras, linhas de alta tensão responsáveis pela transmissão de energia e sistemas de distribuição (ZANETTA, 2006).

Para facilitar o processo de produção de energia, as usinas geradoras são localizadas próximo a recursos naturais energéticos. Por exemplo, as usinas térmicas por exemplo podem ser encontradas nas redondezas em que se encontram reservas de combustíveis fósseis como carvão e gás. Do mesmo modo, as usinas hidrelétricas são situadas em locais cujo desnível, quedas de água dos rios e o armazenamento da água favoreçam a produção de energia elétrica de uma maneira mais eficiente e econômica (ZANETTA, 2006).

Para conduzir a energia elétrica são utilizadas linhas de transmissão, que compõem o elo de ligação entre as grandes centrais geradoras de energia e os sistemas de distribuição, que através de interconexões conduzem a outros sistemas de potência (STEVENSON, 1974).

O sistema elétrico de potência de corrente alternada teve seu desenvolvimento nos Estados Unidos durante o século XVIII, o primeiro teste realizado utilizando esse tipo de sistema foi entre 1885-1886, realizado por William Stanley, tal sistema alimentou 150 lâmpadas na cidade de Massachusetts. A partir disso, a primeira linha de transmissão em CA foi instalada nos Estados Unidos em 1890, linha que possuía uma extensão de aproximadamente 20 Km e interligava a usina geradora localizada em Willamette Falls a Portland, Oregon (STEVENSON, 1974).

Geralmente utilizada apenas para iluminação, as primeiras linhas de transmissão implementadas eram monofásicas. Com o passar do tempo, em 1888 Nikola Tesla desenvolveu um estudo acerca dos motores de indução e motores síncronos bifásicos e suas respectivas vantagens quando comparados aos monofásicos, tal estudo levou a construção do primeiro sistema de distribuição bifásico em CA na cidade de Chicago, o qual foi apresentado ao público em 1893. Após isso, o uso de sistemas de transmissão por corrente alternada trifásica e bifásica substituiu gradualmente os sistemas de corrente contínua CC. O elemento que torna o sistema de transmissão CA eficaz é o transformador, pois possibilita a transmissão de energia elétrica em tensões elevadas, a tensão de transmissão é superior a tensão de geração e tensão de

consumo, através deste método obtém-se a vantagem da capacidade de transmissão maior (STEVENSON, 1974).

No início do século XIX os sistemas de potência geralmente atuavam de forma individual, pois começavam como sistemas isolados que se expandia para cobrir todo o território do país. Porém, com o aumento da demanda por energia elétrica e a necessidade de uma maior confiabilidade dos sistemas elétricos de potência surgiram as primeiras interligações. As interligações entre os sistemas elétricos de potência possuem uma série de vantagens, através destas interligações é possível efetuar a troca de energia entre companhias. Ou seja, sistemas que dependem principalmente de usinas hidroelétricas para o seu funcionamento, podem operar de forma contínua durante a estiagem obtendo energia de outros sistemas e vice-versa (STEVENSON, 1974).

Com o início das interligações novos problemas surgiram, porém nos dias atuais praticamente todos eles possuem soluções confiáveis, um desses problemas é o estudo do fluxo de potência. Este estudo é utilizado na operação e planejamentos de operação dos sistemas elétricos de potência e fases de projeto e planejamento de ampliação de sistemas, através dele é possível fazer análises da rede, essas análises são utilizadas para otimizar, estabilizar, controlar e supervisionar a rede como um todo (STEVENSON, 1974; BARBOSA, 1995).

Atualmente, encontra-se diversos métodos para efetuar o estudo de fluxo de potência para os sistemas de transmissão, sendo alguns desses os métodos de Newton-Raphson, Desacoplado, Desacoplado Rápido e Gauss-Seidel (BARBOSA, 1995).

Diante disso, o presente trabalho aborda o desenvolvimento de uma plataforma computacional que tem como objetivo realizar estudos relacionados a fluxo de potência CA, utilizando os métodos de Newton-Raphson, Desacoplado e Desacoplado Rápido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção aborda aspectos teóricos acerca de sistemas elétricos de potência e o seu desenvolvimento, geração de energia elétrica e sua transmissão. Além disso, discute-se os principais métodos utilizados para efetuar estudos sobre fluxo de potência em sistemas de transmissão CA e alguns exemplos de ferramentas computacionais utilizadas por indústrias e outros setores para estudo de fluxo de potência.

2.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA DO BRASIL

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários.

No Brasil, a matriz energética divide-se em dois tipos de sistemas:

- Sistema Interligado Nacional;
- Sistemas Isolados de Energia Elétrica.

O Sistema Interligado Nacional é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte (ONS, 2023).

O Sistema Interligado Nacional, conhecido por SIN, é caracterizado pela interdependência dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica. A interligação entre o funcionamento das usinas faz com que haja um uso otimizado dos recursos energéticos através do aproveitamento das diversidades hidrológicas e de mercado em todas as regiões (CARNEIRO, 2018).

O Brasil é um país rico em recursos hídricos, o que fez com que a hidroeletricidade fosse escolhida como a sua principal fonte de energia elétrica, sendo hoje responsável por cerca de 80% da potência instalada no SIN (5). A potência instalada das usinas hidrelétricas varia de 28 a 8370 MW e estão localizadas em todas as regiões do país, podendo ser tanto de reservatórios como a fio d'água (MIRANDA, 2012).

A interligação de sistemas elétricos por meio de uma rede de transmissão permite a transferência de energia entre subsistemas, trazendo benefícios e explorando a diversidade de

regimes hidrológicos de diferentes bacias. A capacidade total de geração de energia do Sistema Interligado Nacional é composta principalmente por usinas hidrelétricas localizadas em dezesseis bacias hidrográficas em diferentes regiões do Brasil (ONS, 2023).

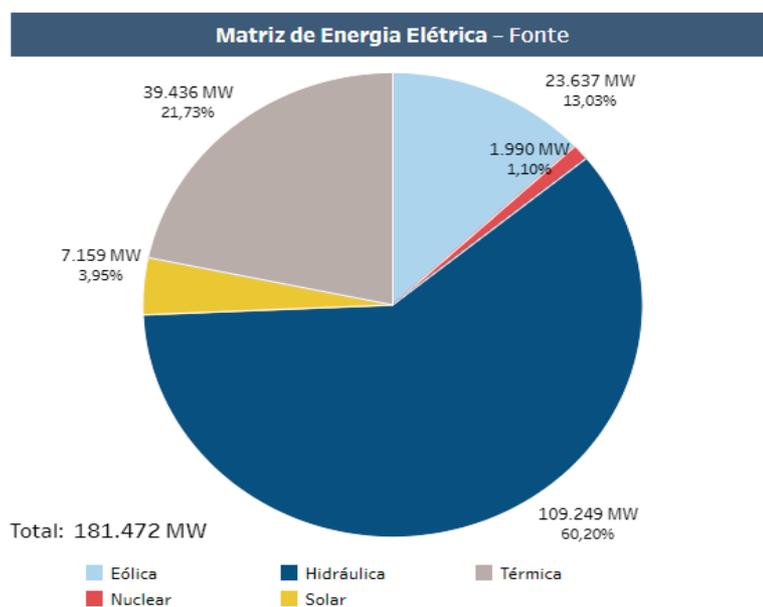


Figura 1 - Matriz Energia Elétrica 2022.
Fonte: ons.org.br

A diversificação da matriz energética brasileira, com a expansão das usinas eólicas nas regiões nordeste e sul, bem como a instalação estratégica de usinas térmicas, tem sido fundamental para garantir um suprimento de energia confiável e estável em todo o país. Essas fontes de energia desempenham um papel importante na complementaridade e equilíbrio do sistema interligado nacional, permitindo uma maior segurança energética e reduzindo a vulnerabilidade às oscilações climáticas e condições hidrológicas adversas (ONS, 2023).

No Brasil, atualmente existem 212 localidades isoladas. A maior parte está na região Norte, nos estados de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Amapá e Pará. A ilha de Fernando de Noronha, em Pernambuco, e algumas localidades de Mato Grosso completam a lista. Entre as capitais, Boa Vista (RR) é a única que ainda é atendida por um sistema isolado. O consumo nessas localidades é baixo e representa menos de 1% da carga total do país. A demanda por energia dessas regiões é suprida, principalmente, por térmicas a óleo diesel (ONS, 2023).

2.2 CRESCIMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

O sistema elétrico de potência (SEP) é responsável por gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica utilizada em nossa sociedade. O crescimento do SEP é um tema relevante em estudos de energia, uma vez que a demanda energética mundial continua a aumentar e os sistemas de energia precisam ser expandidos para atender a essa demanda.

O desenvolvimento dos sistemas de corrente alternada (CA) começou nos Estados Unidos em 1885. Dados estatísticos registrados desde 1920 até a década de 70-80 mostram uma taxa de crescimento quase constante, tanto para a capacidade instalada de geração como para a produção anual de energia (STEVENSON, 1974).

Inicialmente a tensão de operação cresceu rapidamente, onde em 1890, uma das linhas criadas, operava em 3300 V. Em 1907, as linhas já operavam em 100 kV, onde as tensões atingiam 150 kV em 1913, 220 kV em 1923, 244 kV em 1926 e 287 kV na linha que ligava Hoover Dam a Los Angeles em 1936. A meados de 1953, surgiu a primeira linha em 345 kV. Em 1965 já estava em operação a primeira linha a operar em 500 kV e em 1969 entrou em operação a primeira linha em 765 kV (STEVENSON, 1974).

O crescimento dos sistemas elétricos de potência desde a década de 1920 foi impulsionado pela crescente demanda por energia elétrica, pela necessidade de eletrificação de áreas urbanas e rurais, pela expansão da rede de distribuição e pelo desenvolvimento de novas tecnologias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

2.3 PRODUÇÃO DE ENERGIA

A produção de energia é um dos pilares fundamentais do desenvolvimento econômico e social, permitindo a realização de atividades produtivas, a mobilidade e a melhoria das condições de vida das pessoas.

O objetivo principal da geração de energia é fornecer um suprimento contínuo e sustentável de energia para uso doméstico, industrial, comercial e outros fins, visando o desenvolvimento e o bem-estar da sociedade. No Brasil, a geração distribuída é tipicamente limitada a uma capacidade instalada de 30 MW ou 50 MW. No entanto, há casos em que sistemas com capacidades maiores

podem ser considerados como geração distribuída. A geração distribuída é classificada em diferentes faixas, que incluem: Micro GD, para sistemas com potência inferior a 1 MW; Pequena GD, para sistemas com potência entre 1 MW e 30 MW; Média GD, para sistemas com potência entre 30 MW e 50 MW; e Grande GD, para sistemas com potência entre 50 MW e 100 MW.

As geradoras, responsáveis pelo processo de captação ou produção da energia, utilizam diversas fontes. No Brasil, a principal é produzida em hidrelétricas, sendo responsável por atender à maior parte da demanda de energia. Também existe, na matriz energética do país, de forma importante, a extraída de biomassa, principalmente, da cana-de-açúcar, a eólica, com boa participação na matriz energética, e a solar, que vem crescendo exponencialmente nos últimos anos.

A energia hidrelétrica é a fonte de energia amplamente utilizada em todo o mundo. Ela é gerada a partir da força da água, que é captada por meio de barragens e turbinas, produzindo energia elétrica. Embora a energia hidrelétrica seja uma fonte de energia renovável, sua utilização pode apresentar impactos negativos para o meio ambiente e para as comunidades locais, como o deslocamento de populações e a alteração dos ecossistemas aquáticos (IEA, 2019).

A energia solar e eólica também são fontes renováveis de energia que têm apresentado um crescimento significativo nos últimos anos, impulsionado pelo avanço tecnológico e pelo incentivo governamental. A energia solar é gerada a partir da captação da luz solar por meio de painéis fotovoltaicos, enquanto a energia eólica é gerada a partir da força dos ventos, que movimentam as turbinas. Embora essas fontes de energia sejam consideradas limpas e renováveis, sua utilização pode apresentar desafios em relação à intermitência e variabilidade da geração (FEARNSIDE, 2019).

2.4 TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

Um sistema elétrico de potência (SEP) é definido como uma complexa infraestrutura para fornecimento de energia elétrica. Ele deve atender padrões de confiabilidade e qualidade, tarifas de valores acessíveis e sustentabilidade social e ambiental. O sistema é classicamente composto de geração, transmissão e distribuição conforme a Figura 2 (CGEE, 2012).

A tensão de grandes geradores geralmente está na faixa de 13,8kV a 24kV, sendo os geradores mais modernos construídos para tensões de 18 a 24 kV. As tensões geradoras são elevadas para níveis de transmissão de 115 a 765 kV (STEVENSON, 1974).

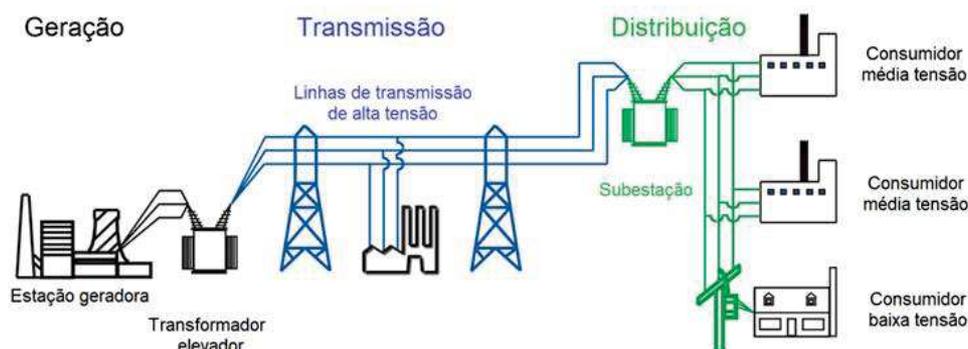


Figura 2 - Modelo SEP

Fonte: <https://alfacomp.net/portfolio-item/energia-eletrica/>

A transmissão de energia ocorre através de cabos aéreos que são protegidos por camadas isolantes e estão instalados em imponentes torres de metal. Ao longo do percurso, a eletricidade passa por várias subestações, onde dispositivos transformadores aumentam ou reduzem seu nível de tensão, modificando o que é conhecido como tensão elétrica. No início do trajeto, os transformadores elevam a tensão para evitar perdas excessivas de energia (CARVALHO, 2016).

A distribuição de energia é quando a eletricidade chega perto dos centros de consumo, as subestações diminuem a tensão elétrica, para que ela possa chegar às residências, empresas e indústrias. A partir daí, os cabos prosseguem por via aérea ou subterrânea, formando as redes de distribuição (CARVALHO, 2016).

Segundo Stevens, as vantagens dos níveis de tensão mais elevados das linhas de transmissão se dão por conta da capacidade de transmissão da linha megavolt-ampere (MVA). A capacidade varia aproximadamente segundo uma relação um pouco maior do que o quadrado da tensão. Não é possível especificar a capacidade de uma linha de transmissão para uma tensão, pois a capacidade depende de limites do condutor, queda de tensão permitida, confiabilidade e

2.5 ESTUDO DE FLUXO DE CARGA

O estudo de fluxo de potência é algo considerado relativamente complexo, até meados do século XX a representação dos fluxos de potência era feita através de leituras de vários instrumentos de medição efetuadas ao mesmo tempo combinadas com diversos diagramas elétricos e anotações feitas em papéis, o que tornava o processo complexo, pouco eficiente e muito trabalhoso. Com a chegada dos computadores na década de 50, houve grandes melhorias, pois tarefas complexas puderam ser modernizadas por meio de programas numéricos capazes de realizar simulações de sistemas de potência, tornando o processo mais eficiente e confiável, além de diminuir consideravelmente o trabalho, uma vez que os programas resolviam equações algébricas muito longas em pouco tempo e de forma confiável (JUNIOR e CARVALHO, 2019).

Até começo dos anos 60 o método de Gauss-Seidel foi pioneiro, facilitando muito o trabalho dos engenheiros. Algum tempo depois um segundo método foi desenvolvido chamado de Newton-Raphson, tal método apresentou ótimas taxas de convergência de resultados, porém limitada devido a precariedade dos computadores locais que as executavam. Somente após o surgimento dos métodos de Newton-Raphson desacoplado e desacoplado rápido nos anos 70, que foi possível obter programas com rápida e precisa taxa de convergência de resultados, esses dois métodos são utilizados até os dias atuais por concessionárias de energia e pesquisadores (JUNIOR e CARVALHO, 2019; STOTT e ALSAC, 1974; STOTT, 1972).

Para determinar a potência líquida ativa e reativa de cada barra de um sistema de potência é necessário primeiramente determinar a magnitude e a fase das tensões de cada barra, para que se possa efetuar o cálculo do fluxo de potência líquida no sistema. De acordo com Borges 2005, as equações de potência são obtidas a partir das Leis fundamentais de Circuitos obtidas por Kirchhoff, e a equação de potência elétrica clássica (BORGES, 2005).

Em um sistema de potência existem três tipos de barras e elas devem ser definidas para se realizar o estudo do fluxo de potência: as barras $V\theta$ ou barras de referência, apresentam a magnitude e ângulo de fase da tensão fornecidos pelo sistema, as barras PQ , apresentam a potência ativa e reativa fornecidas pelos sistemas, são utilizadas para representar as barras de cargas. As barras PV , apresentam a potência ativa e a magnitude da tensão na barra e são utilizadas para representar barras de geração do sistema elétrico (DA SILVA, 2004).

É preciso levar em consideração que as equações consideram como potências positivas, as potências que entram na barra, já as potências que saem da barra são consideradas negativas (DA SILVA, 2004).

Para planejar e realizar expansões do sistema elétrico de potência o estudo de fluxo de potência é feito em regime permanente, tal ferramenta é comumente utilizada pelas concessionárias de energia, pois devido a inclusão de novas cargas consumidoras e transformadores, se faz necessário que o operador faça estudos sobre o comportamento das variáveis do sistema (KAGAN, 2021).

2.6 MATRIZ Y OU MATRIZ ADMITÂNCIA

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

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

Onde:

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

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

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

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

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

- Simétrica;
- Complexa;
- Quadrada de dimensão $n \times n$, onde n representa o número de barras ou nós da rede;
- Os elementos da diagonal principal são positivos;
- Os elementos fora da diagonal principal são negativos;
- Os elementos da diagonal Y_{kk} são o somatório das admitâncias ligadas à barra k ;

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

2.7 MODELAGEM DE ELEMENTOS DE SEP

Para modelar os elementos que constituem um sistema elétrico de potência, tais elementos são divididos em dois grupos, o primeiro grupo composto pelos componentes que se encontram ligados entre um nó qualquer e um nó terra, por exemplo geradores, cargas, reatores e capacitores. O segundo grupo é composto por elementos que se encontram entre dois nós, que são as linhas de transmissão, transformadores em fase e defasadores (DA SILVA, 2004).

Na formulação do problema de fluxo de potência, cada barra tem associada a si quatro variáveis, V_k representando o módulo da tensão na barra, P_k que indica a potência líquida ativa injetada, θ_k mostra o ângulo da tensão nodal e Q_k indicando a potência líquida reativa injetada (DA SILVA, 2004).

Como citado no índice 2.5, os três tipos de barras mais encontrados em sistemas elétricos de potência são as barras PQ , PV e $V\theta$. Nas barras PQ são disponibilizados pelo sistema P_k e Q_k , e devem ser calculados θ_k e V_k , já nas barras PV são disponibilizados os dados de P_k e V_k os demais dados devem ser encontrados no estudo do fluxo de potência, por último as barras $V\theta$ consideradas barras de referência disponibilizam os dados de V_k e θ_k , assim podendo encontrar os valores de P_k e Q_k .

2.8 MODELAGEM DA LINHA DE TRANSMISSÃO

O equivalente π é a forma clássica utilizada para ilustrar uma linha de transmissão, conforme a Figura 4.

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

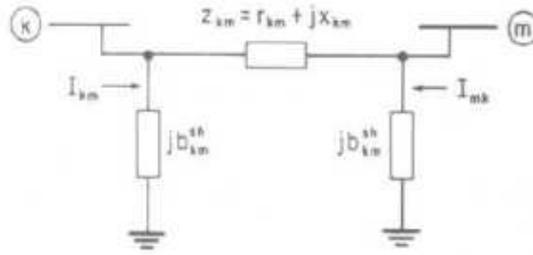


Figura 4 - Equivalente π de uma linha de transmissão
 Fonte: MONTICELLI (1983)

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

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

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

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

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

2.9 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA

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

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

Com isso existem dois subsistemas de equações:

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

Abaixo a representação do vetor de variáveis de estado:

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

Seja também, o vetor de funções não lineares:

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

que é detalhado pelas equações abaixo:

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

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

No segundo subsistema, conhecidos V_i e θ_i em todas as barras, é possível calcular Q_i e P_i nas barras $V\theta$, e Q_i nas barras PV , o que é feito tranquilamente uma vez que todas as incógnitas aparecem na forma explícita (MONTICELLI, 1983).

2.9.1 Newton-Raphson

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

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

Neste caso, em que o sistema de equações a ser resolvido é o subsistema 1, tem -se:

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

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

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

Lembrando que P^{esp} e Q^{esp} são constantes e utilizando as equações (8) e (9), a matriz jacobiana pode ser reescrita da seguinte forma:

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

As submatrizes que compõem a matriz jacobiana, são muitas vezes representadas da seguinte maneira:

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

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

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

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

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

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

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

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

Com isso a partir das Equações (18) a (20), pode-se concluir que se $Y_{km} = B_{km} + G_{km}$ for nulo, então os elementos da matriz jacobiana H_{km}, M_{km}, N_{km} e L_{km} também serão

elementos nulos, isso mostra que as matrizes H, M, N e L possuem as mesmas características de esparsidade que a matriz admitância.

Para aplicar o método de Newton deve-se seguir os passos descritos abaixo:

- i. Ler os dados do sistema;
- ii. Montar a matriz Y ;
- iii. Definir os tipos de barra e especificar os valores das variáveis que serão mantidas constantes;
- iv. Fazer $v = 0$ e definir o chute inicial (x_0) ;
- v. Calcular $g(x^v)$ utilizando as equações (8) e (9);
- vi. Testar convergência: se $Max \{|\Delta P_i|\} \leq \varepsilon$ e $Max \{|\Delta Q_i|\} \leq \varepsilon$, em que ε representa a tolerância admitida, verificar se o sistema converge caso contrário prosseguir para o passo vii;
- vii. Calcular matriz jacobiana;
- viii. Atualizar vetor x ;
- ix. Atualizar v , fazendo $v = v + 1$ e retornar ao passo v;

2.9.2 Desacoplado

Como o próprio nome diz, os métodos desacoplado e desacoplado rápido baseiam-se no desacoplamento de $P\theta$ e QV , com isso, são obtidos considerando-se que as sensibilidades $\partial P/\partial\theta$ e $\partial Q/\partial V$ são mais intensas que as outras. Ao desacoplar $P\theta$ e QV o problema pode ser resolvido alternadamente, ou seja, na resolução do subproblema $P\theta$ são utilizados os valores atualizados de V e para a resolução do subsistema QV são utilizados os valores atualizados de θ (MONTICELLI, 1983).

Para o método desacoplado as componentes $M(\partial Q/\partial\theta)$ e $N(\partial P/\partial V)$ são consideradas nulas. É válido ressaltar que, apesar do processo ser modificado, a solução final se mantém, pois, o problema $[\Delta P = (V, \theta) = 0; \Delta Q = (V, \theta) = 0]$ continua o mesmo (MONTICELLI, 1983).

Para a sequência, utilizando o sistema descrito na equação (17) o método de Newton pode ser escrito da seguinte forma:

$$\Delta P(V^v, \theta^v) = H(V^v, \theta^v)\Delta\theta^v + N(V^v, \theta^v)\Delta V^v \quad (22)$$

$$\Delta Q(V^v, \theta^v) = M(V^v, \theta^v)\Delta\theta^v + L(V^v, \theta^v)\Delta V^v \quad (23)$$

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta\theta^v \quad (24)$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v \quad (25)$$

Porém, como o método desacoplado despreza as variáveis N e M o sistema a ser utilizado é:

$$\Delta P(V^v, \theta^v) = H(V^v, \theta^v)\Delta\theta^v \quad (26)$$

$$\Delta Q(V^v, \theta^v) = L(V^v, \theta^v)\Delta V^v \quad (27)$$

$$\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta\theta^v = \theta^v + \Delta P(V^v, \theta^v).H^{-1}(V^v, \theta^v) \quad (28)$$

$$V^{v+1} = V^v + \Delta V^v = V^v + \Delta Q(V^v, \theta^v).L^{-1}(V^v, \theta^v) \quad (29)$$

Vão existir situações em que os subproblemas $P\theta$ e QV vão ter velocidade de convergência diferentes, ou seja, um vai converter primeiro que o outro. Com isso podem ser obtidas vantagens computacionais interagindo apenas o subsistema que ainda não convergiu, para isso são utilizados dois contadores distintos. A seguir estão descritas as etapas para aplicação do método desacoplado (MONTICELLI, 1983):

- i. Testar convergência $P\theta$, $Max \{|\Delta P_i(\theta^p, V^q)|\} \leq \varepsilon$
- ii. Aplicar, $\theta^{p+1} = \theta^p + \Delta P(\theta^p, V^q).H^{-1}(\theta^p, V^q)$
- iii. Incrementa contador $p, p = p + 1$;
- iv. Testar convergência QV , $Max \{|\Delta Q_i(\theta^p, V^q)|\} \leq \varepsilon$
- v. Aplicar, $V^{q+1} = V^q + \Delta Q(\theta^p, V^q).L^{-1}(\theta^p, V^q)$
- vi. Incrementa contador $q, q = q + 1$;

2.9.3 Desacoplado Rápido

O método desacoplado rápido segue os mesmos passos de aplicação utilizados no método desacoplado, porém o que diferencia os dois métodos é a utilização das equações $\Delta P/V = B' \cdot \Delta\theta$ e $\Delta Q/V = B'' \cdot \Delta V$ no método desacoplado rápido, as quais aparecem as matrizes constantes B' e B'' , as matrizes B' e B'' , podem ter suas componentes calculadas por:

$$B'_{km} = -x_{km}^{-1} \quad (30)$$

$$B'_{kk} = \sum_{m \in \Omega_k} -x_{km}^{-1} \quad (31)$$

$$B''_{km} = -B'_{km} \quad (32)$$

$$B''_{kk} = -B'_{kk} \quad (33)$$

Para o método desacoplado rápido as submatrizes H e L são mantidas constantes, para tornar essas matrizes mais simples e fáceis de trabalhar são adotadas algumas aproximações, primeiramente temos que:

$$H_{kk} = -Q_k - V_k^2 B_{kk} \quad (34)$$

$$H_{km} = V_k V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \quad (35)$$

$$L_{kk} = V_k^{-1} Q_k - V_k B_{kk} \quad (36)$$

$$L_{km} = V_k (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \quad (37)$$

Ao aplicar as aproximações apresentadas abaixo teremos novas equações simplificadas:

- i. $\text{cos} \theta_{km}$ muito próximo de 1;
- ii. B_{km} é, em magnitude, muito maior que $G_{km} \text{sen} \theta_{km}$;

iii. $B_{kk}V_k^2$ é, em magnitude, muito maior que Q_k .

Com isso teremos:

$$H'_{kk} = -V_k B_{kk} \quad (38)$$

$$H'_{km} = -V_m (B_{km}) \quad (39)$$

$$L'_{kk} = -B_{kk} \quad (40)$$

$$L'_{km} = (-B_{km}) \quad (41)$$

Como V_i e V_k são valores próximos de 1 pu, pode-se novamente simplificar a matriz H . Logo, as matrizes H e L são denotadas por B' e B'' . Observe que essas matrizes dependem apenas de parâmetros da rede e mantêm as dimensões e estrutura de H e L . Com isso, para efetuar o método desacoplado rápido é necessário resolver as seguintes equações (MONTICELLI, 1983):

$$\theta^{p+1} = \theta^p + (B')^{-1} \frac{\Delta P}{V} (\theta^p, V^q) \quad (42)$$

$$V^{q+1} = V^q + (B'')^{-1} \frac{\Delta Q}{V} (\theta^p, V^q) \quad (43)$$

3 METODOLOGIA

A estrutura dos procedimentos metodológicos desenvolvida ao longo deste trabalho está apresentada abaixo.

3.1 VISÃO GERAL DA PROPOSTA DE PESQUISA

A proposta deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional capaz de realizar estudos em determinado sistema de energia elétrica referente ao cálculo do fluxo de potência. O programa em questão contará com uma interface onde o usuário entrará com os dados do sistema, o usuário poderá escolher três maneiras diferentes de fazer o cálculo do fluxo de potência do sistema, o primeiro método implementado na ferramenta é o método de Newton-Raphson, em seguida o método desacoplado e por último o método desacoplado rápido.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO DA PLATAFORMA

Foi adotada a abordagem do App Designer, uma ferramenta integrada no Matlab, para criar uma interface gráfica intuitiva. Essa interface foi desenvolvida com o objetivo de simplificar e tornar mais acessíveis os estudos relacionados à confiabilidade dos cálculos para a implementação dos métodos relacionado ao fluxo de potência em sistemas de corrente alternada.

A Figura 5 exibe a interface principal da plataforma computacional utilizada para a análise do Sistema Elétrico de Potência, apresentando botões distintos, que correspondem aos métodos de Newton-Raphson, desacoplado e desacoplado rápido.

Após abrir a plataforma, o usuário deve escolher uma das abas disponíveis para selecionar o método que deseja utilizar. Cada aba contém os parâmetros específicos para cada método, como configurações iniciais, critérios de convergência e precisão dos resultados. Ao selecionar uma das abas, o usuário pode inserir os valores necessários nos campos de entrada de dados.



Figura 5 – Interface da plataforma
Fonte: Autores

Após inserir os valores, o usuário pode executar o cálculo clicando em um botão específico, que iniciará o algoritmo correspondente ao método selecionado. Durante o processamento, a interface pode exibir informações de progresso ou mensagens de erro, caso ocorra alguma inconsistência nos dados inseridos.

Após a conclusão do cálculo, os resultados serão exibidos na própria interface. O usuário também tem a opção de exportar os resultados para outros formatos, como arquivos de texto ou planilhas, para facilitar a análise posterior ou o compartilhamento com outros usuários.

A plataforma computacional desenvolvida oferece uma maneira intuitiva e conveniente de utilizar os métodos de Newton-Raphson, Newton desacoplado e Newton desacoplado rápido, facilitando a análise do sistema elétrico de potência. Ela permite que os usuários realizem cálculos complexos de forma rápida e eficiente, auxiliando na tomada de decisões e no estudo da confiabilidade da geração de energia elétrica e do fluxo de potência CA.

3.2.1 Método de Newton-Raphson

A Figura 6 mostra a interface gráfica para o estudo de fluxo de potência em corrente alternada utilizando o método de Newton-Raphson. A operação da plataforma para o fluxo de potência em corrente alternada dá-se por:

1. Entrada de dados do sistema: pode ser realizada tanto por meio de um arquivo com extensão (.xlsx) como manualmente.
2. Tem-se na aba ao lado do botão procurar o diretório do arquivo de dado.
3. O operador deve informar o número máximo de interações.
4. O operador deve informar a tolerância que é o critério de parada utilizado para determinar quando o método atingiu uma solução aproximada aceitável.
5. Botão calcular, realiza o cálculo do sistema.
6. Tem-se expostos nos resultados o fluxo de potência em CA das barras, a matriz referente a tensão nas barras e, por fim, a matriz referente aos ângulos encontrados para cada barra.
7. Botão voltar ao início. Volta a tela inicial da interface.

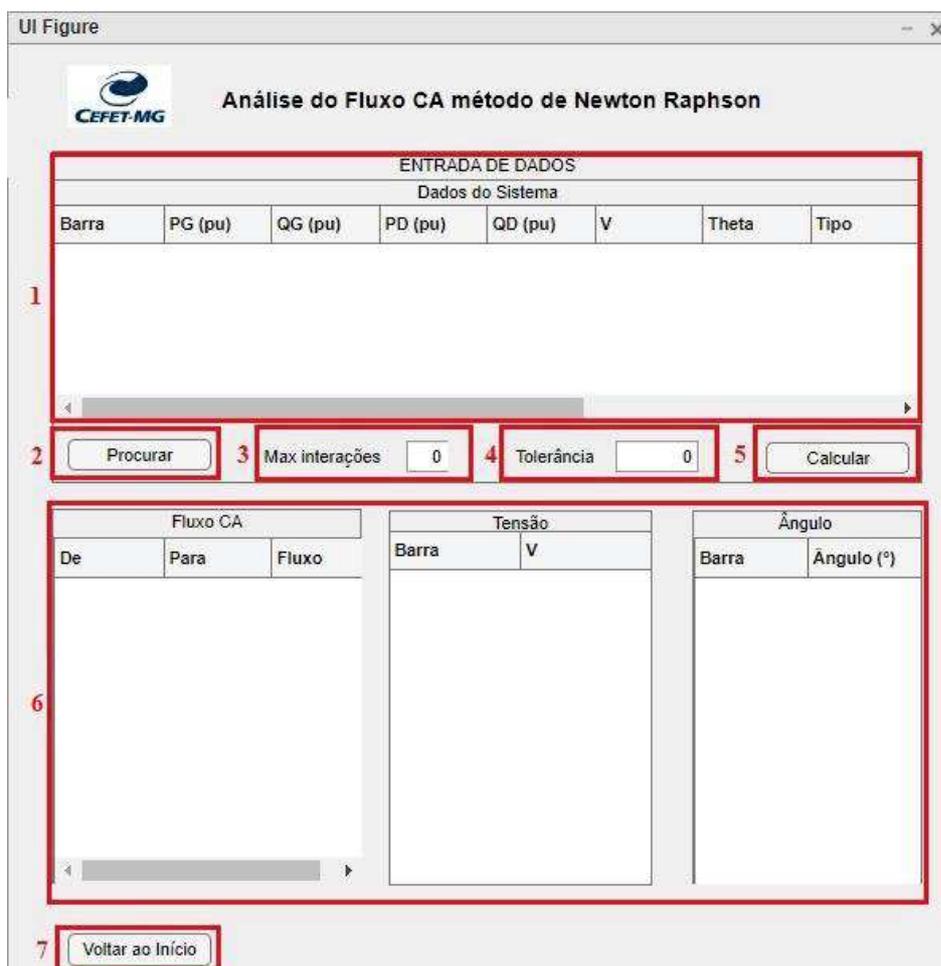


Figura 6 – Análise do Fluxo CA método de Newton Raphson
Fonte: Autores

3.2.2 Método de Newton-Raphson Desacoplado

A Figura 7 mostra a interface gráfica para o estudo de fluxo de potência em corrente alternada utilizando o método de Newton-Raphson Desacoplado. A operação da plataforma para o fluxo de potência em corrente alternada dá-se por:

1. Entrada de dados do sistema: pode ser realizada tanto por meio de um arquivo com extensão (.xlsx) como manualmente.
2. Tem-se na aba ao lado do botão procurar o diretório do arquivo de dado.
3. O operador deve informar o número máximo de interações.

4. O operador deve informar a tolerância que é o critério de parada utilizado para determinar quando o método atingiu uma solução aproximada aceitável.
5. Botão calcular, realiza o cálculo do sistema.
6. Tem-se expostos nos resultados o fluxo de potência em CA das barras, a matriz referente a tensão nas barras e, por fim, a matriz referente aos ângulos encontrados para cada barra.
7. Botão voltar ao início. Volta a tela inicial da interface.



Figura 7 - Análise do Fluxo CA método de Newton-Raphson Desacoplado
 Fonte: Autores

3.2.3 Método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido

A Figura 8 mostra a interface gráfica para o estudo de fluxo de potência em corrente alternada utilizando o método de Newton-Raphson Desacoplado. A operação da plataforma para o fluxo de potência em corrente alternada dá-se por:

1. Entrada de dados do sistema: pode ser realizada tanto por meio de um arquivo com extensão (.xlsx) como manualmente.
2. Tem-se na aba ao lado do botão procurar o diretório do arquivo de dado.
3. O operador deve informar o número máximo de interações.
4. O operador deve informar a tolerância que é o critério de parada utilizado para determinar quando o método atingiu uma solução aproximada aceitável.
5. Botão calcular, realiza o cálculo do sistema.
6. Tem-se expostos nos resultados o fluxo de potência em CA das barras, a matriz referente a tensão nas barras e, por fim, a matriz referente aos ângulos encontrados para cada barra.
7. Botão voltar ao início. Volta a tela inicial da interface.

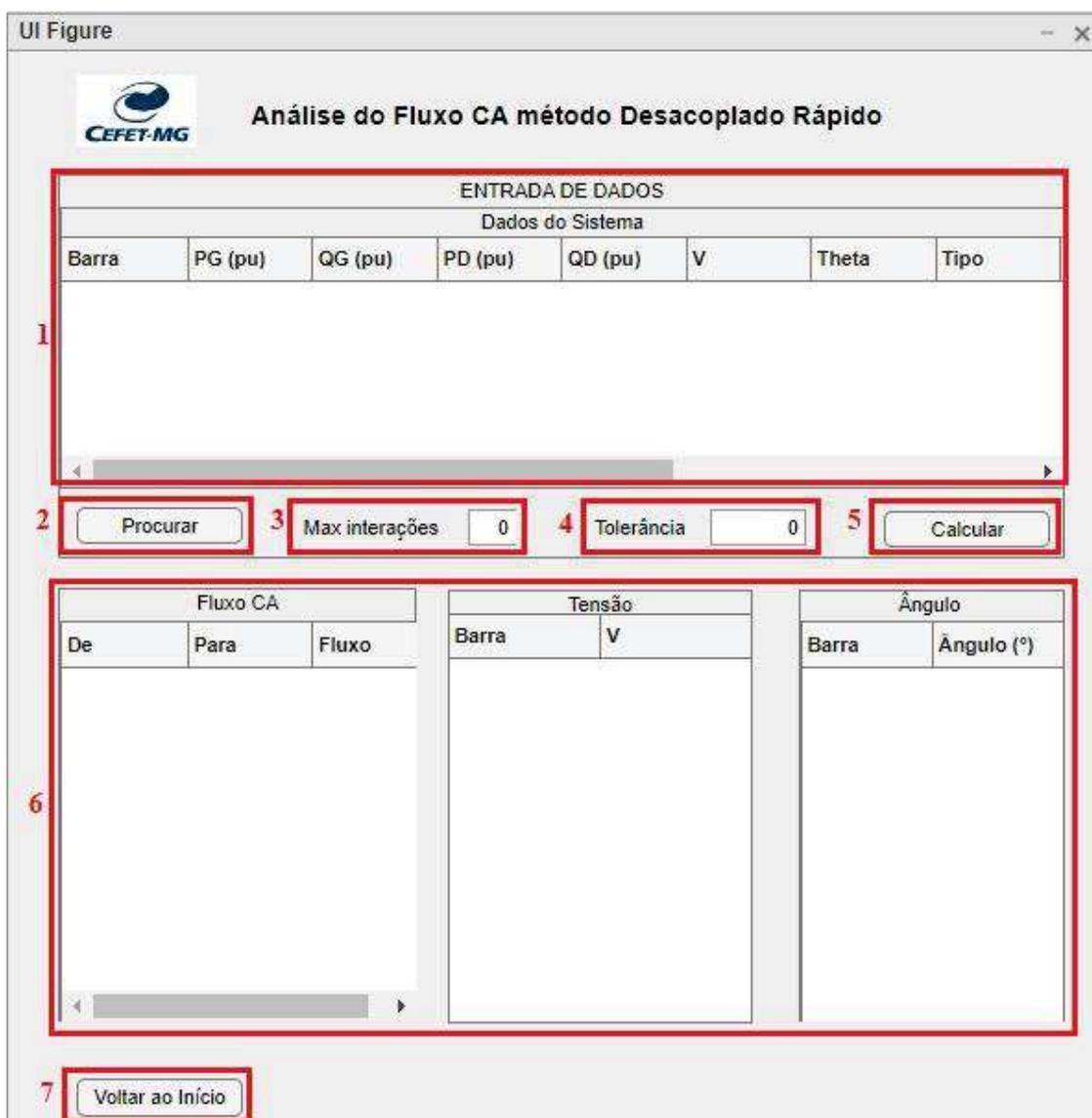


Figura 8 - Análise do Fluxo CA método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido
 Fonte: Autores

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS MÉTODOS

Para realizar a implementação dos métodos de análise de fluxo de potência, foi utilizado o software *Matlab*, o qual fornece as respostas dos estudos relacionado ao sistema para os três diferentes métodos aplicados. O primeiro método a ser implementado foi o Newton-Raphson, para facilitar a implementação foi utilizado o fluxograma representado pela Figura 5.

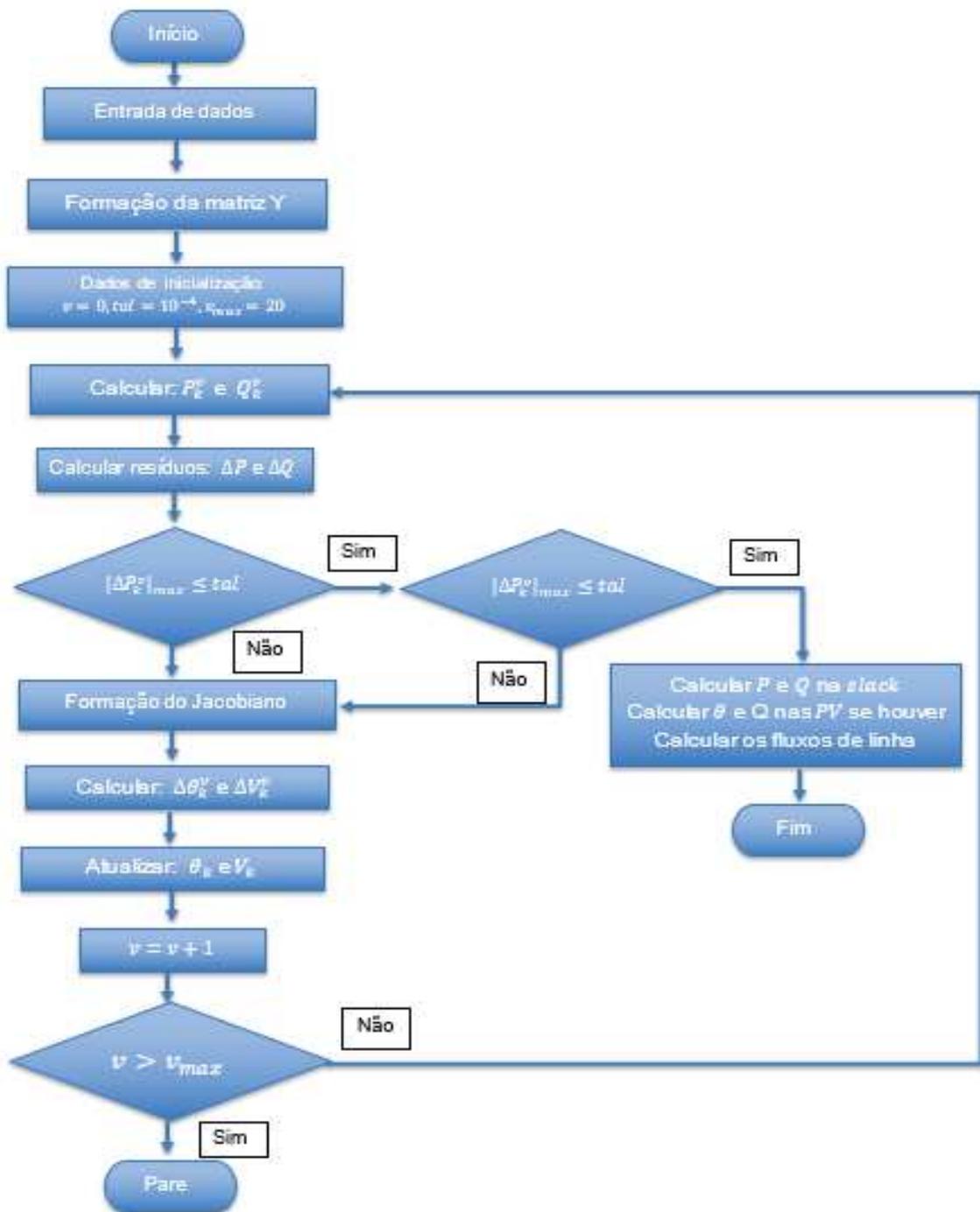


Figura 9 - Fluxograma método de Newton-Raphson
Fonte: Autores

Primeiramente é feita a leitura dos dados, em seguida é construído a matriz admitância, após a construção da matriz é determinado a quantidade máxima de interações e o valor de tol , com isso podem ser feitos os cálculos de P_k e Q_k , que serão utilizados para calcular ΔP e ΔQ , caso

os valores de ΔP e ΔQ em modula corresponda a um valor menor que *tal* não é necessário o cálculo do Jacobiano, podendo ser calculado o fluxo nas linhas, caso os valores ΔP e ΔQ em modulo não sejam menores que o valor de *tal* é necessário a construção da matriz Jacobiana e o cálculo de ΔV e $\Delta \theta$ para fazer as atualizações dos valores de V e θ , ao atualizar os valores deve-se incrementar o valor de interações e retornar ao cálculo de P_k e Q_k repetindo todos os procedimentos até atingir o valor máximo de interações estipuladas ou alcançar valores de ΔP e ΔQ menores que *tal* para resolver o problema proposto.

Para a segunda parte da implementação do programa foi utilizado o método Desacoplado, o fluxograma da Figura 6 descreve o passo a passo seguido de forma a auxiliar a programação.

Neste caso primeiramente é feito a coleta dos dados de entrada e inicializado os contadores de interações separadamente, pois se trata de um método desacoplado, em seguida é feito o cálculo de ΔP e verificado se seu valor em modulo é menor do que o estipulado para ele, caso o valor de ΔP já seja menor que o estipulado não é necessário a atualização de θ , caso o valor de ΔP em modulo for maior que o estipulado aí será necessário a atualização do valor de θ utilizando a Equações (28), em seguida é incrementado o valor do contador de ΔP , em seguida é feito o cálculo de ΔQ seguindo a mesma ideia no passo anterior, caso o valor encontrado seja menor que o estipulado não é necessário a atualização do valor de V caso contrário o valor deverá ser atualizado e incrementado o valor de seu contador individual, para a atualização do valor de V é utilizado a Equação (29). Dessa forma o valor de ΔP e ΔQ poderá ser encontrada separadamente respeitando os critérios iniciais de quantidade de interações e valor máximo em modulo das grandezas de forma independente uma da outra.

Para o método desacoplado rápido, basta utilizar o fluxograma do método desacoplado com algumas alterações, primeiramente substituir a matriz H pela matriz B' e a matriz L pela matriz B'' nas expressões de atualização das variáveis V e θ . Além disso é necessário normalizar os desvios de potência ativa e reativa, dividindo-os pelo módulo da tensão.

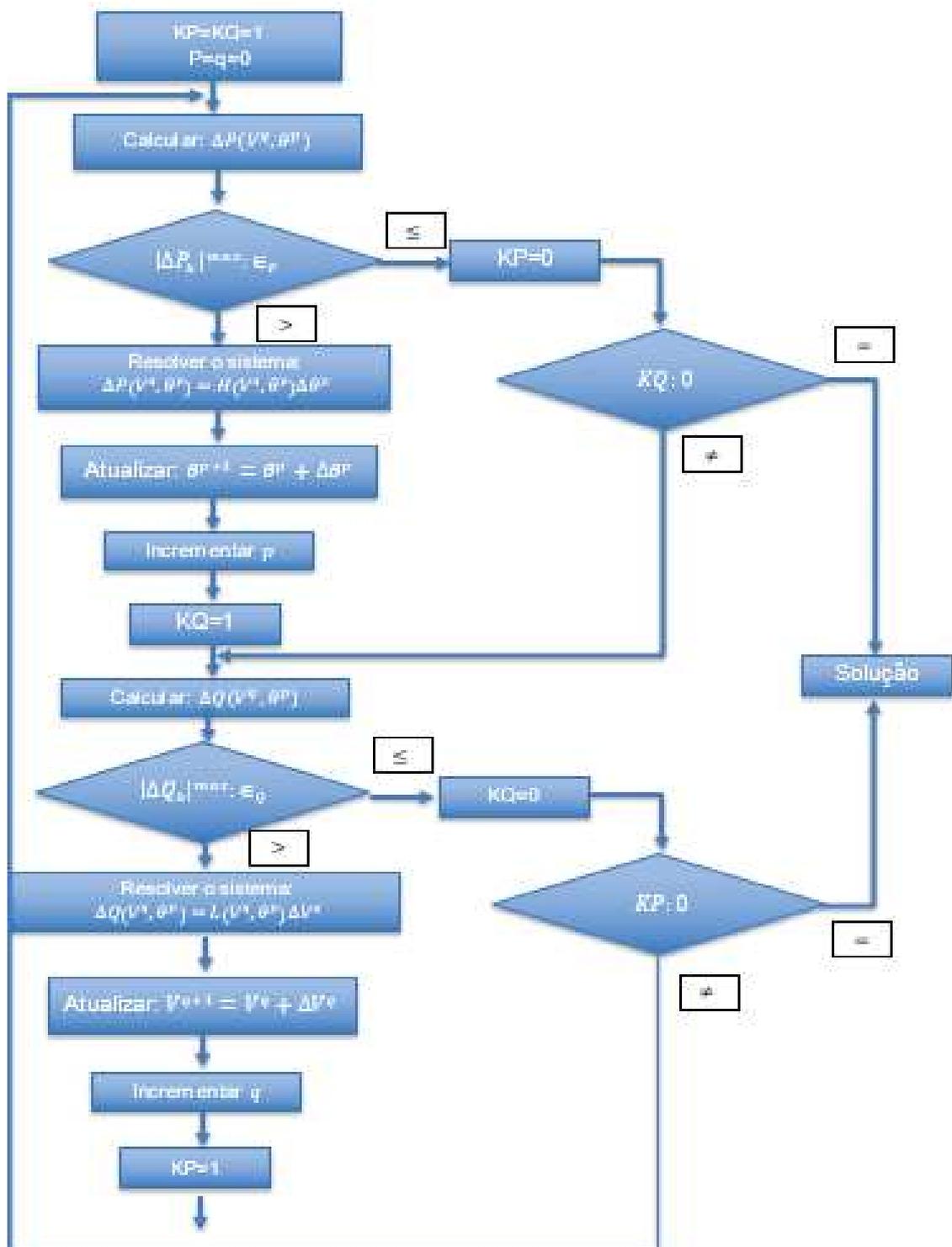


Figura 10 - Fluxograma método Desacoplado
Fonte: Autores

3.4 SISTEMA TESTE MODIFICADO

Para realizar os testes do estudo do fluxo de potência, foi utilizado o sistema teste IEEE-RTS32, apresentado na figura 4. O sistema em questão é amplo, contendo 24 barras e 11 fontes geradoras.

Em seguida na tabela 1 são apresentados os dados de geração e consumo nas barras, onde P_G e Q_G são os dados de potência ativa e reativa respectivamente geradas no barramento, os dados de P_D e Q_D são os valores de potência ativa e reativa consumidas no barramento e por fim os valores de V e θ são os chutes iniciais para dar início a resolução do fluxo de potência do sistema.

Os dados de linha estão representados na tabela 2, a qual contém os valores de R e X , que representam os dados de impedância da linha e o valor de B_{shunt} que é caracterizado por elementos conectados as barras e o ponto de referência do sistema, podendo ser bancos de capacitores ou reatores, utilizados para corrigir o nível de tensão nas barras através da injeção de reativos.

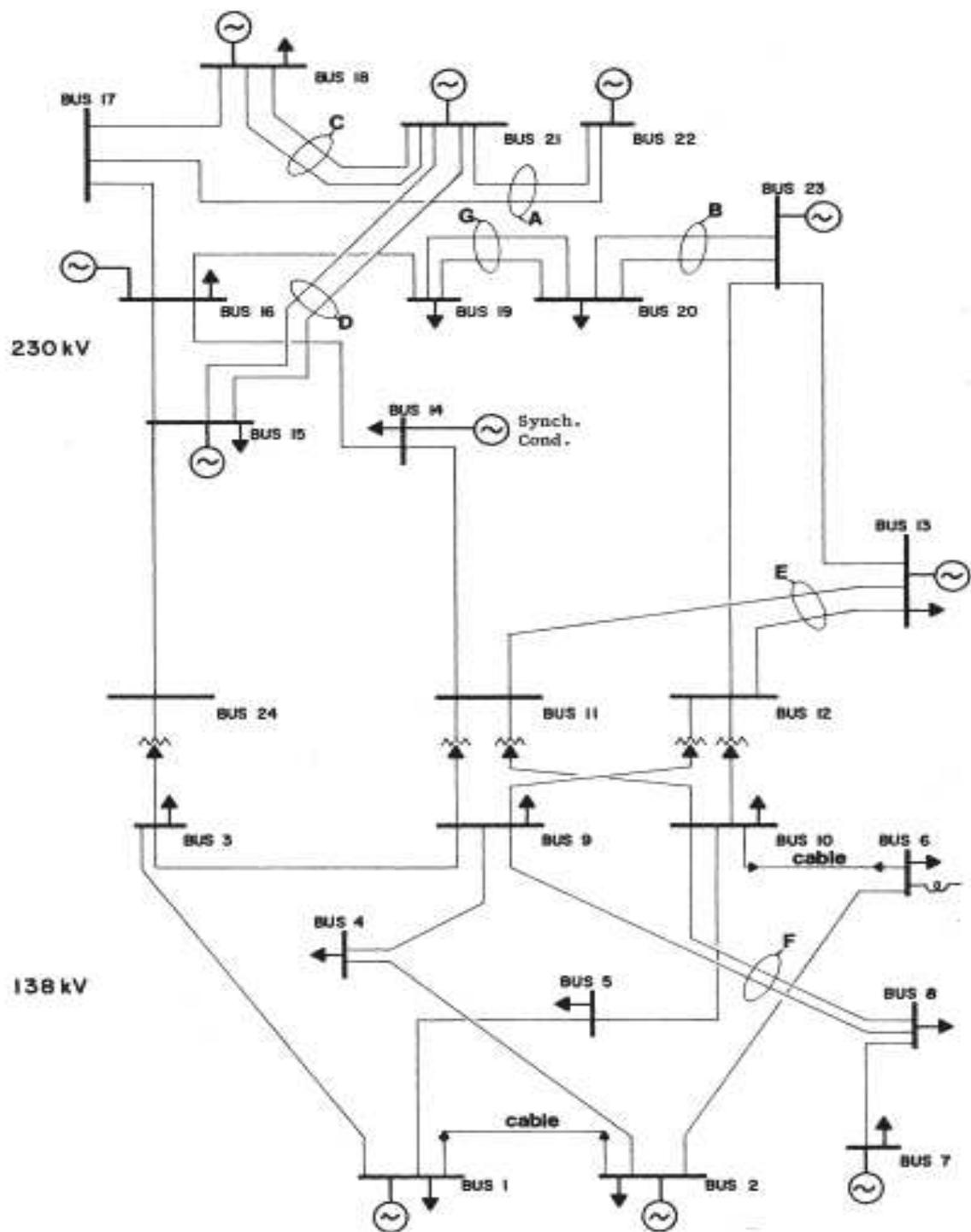


Figura 11 - Sistema teste IEEE RTS-32
 Fonte: IEEE RTS-32

Tabela 1 - Dados de Carga do Barramento

Barras	P_G	Q_G	P_D	Q_D	V	$\theta(^{\circ})$
1	1.92	0.80	1.08	0.22	1	0
2	1.92	0.80	0.97	0.20	1	0
3	0.00	0.00	1.80	0.37	1	0
4	0.00	0.00	0.74	0.15	1	0
5	0.00	0.00	0.71	0.14	1	0
6	0.00	0.00	1.36	0.28	1	0
7	3.00	1.80	1.25	0.25	1	0
8	0.00	0.00	1.71	0.35	1	0
9	0.00	0.00	1.75	0.36	1	0
10	0.00	0.00	1.95	0.40	1	0
13	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0
14	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0
15	5.91	2.40	2.65	0.54	1	0
16	1.55	0.80	1.94	0.39	1	0
18	2.15	1.10	3.17	0.64	1	0
19	1.55	0.80	1.00	0.20	1	0
20	0.00	0.01	0.00	0.00	1	0
21	4.00	2.00	3.33	0.68	1	0
22	0.00	0.00	1.81	0.37	1	0
23	0.00	0.00	1.28	0.26	1	0
24	4.00	2.00	0.00	0.00	1	0

Tabela 2 - Dados de Linha

De	Para	$R(pu)$	$X(pu)$	$B_{shunt}(pu)$
1	2	0.003	0.014	0.461
1	3	0.055	0.211	0.057
1	5	0.022	0.022	0.023
2	4	0.033	0.127	0.034

2	6	0.050	0.192	0.052
3	9	0.031	0.119	0.032
3	24	0.002	0.084	0.00
4	9	0.027	0.104	0.028
5	10	0.023	0.088	0.024
6	10	0.014	0.061	0.017
7	8	0.016	0.061	0.017
8	9	0.043	0.165	0.045
8	10	0.043	0.165	0.045
9	11	0.002	0.084	0.000
9	12	0.002	0.084	0.000
10	11	0.002	0.084	0.000
10	12	0.002	0.084	0.000
11	13	0.006	0.048	0.100
11	14	0.005	0.042	0.088
12	13	0.006	0.048	0.100
12	23	0.005	0.097	0.203
13	23	0.011	0.087	0.182
14	16	0.005	0.059	0.082
15	16	0.002	0.017	0.036
15	21	0.003	0.024	0.206
15	24	0.007	0.052	0.109
16	17	0.003	0.026	0.055
16	19	0.003	0.023	0.049
17	18	0.002	0.014	0.030
17	22	0.014	0.011	0.221
18	21	0.002	0.013	0.110
19	20	0.003	0.020	0.166
20	23	0.002	0.011	0.092
21	22	0.009	0.068	0.142

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentaremos a aplicação da metodologia proposta com os resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos de cálculo do fluxo de potência CA: Método de Newton-Raphson, Desacoplado e Desacoplado Rápido, para todos os casos apresentados nos subitens 4.1, 4.2 e 4.3, foi utilizado uma mesma tolerância de 0.001, o mesmo número máximo de interações 100 e os mesmos dados de linha e de barras apresentados nas tabelas 1 e 2.

4.1 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

O objetivo principal desses testes foram verificar a eficiência e a precisão do método de Newton-Raphson na resolução do fluxo de potência em corrente alternada, verificando também as respostas apresentadas pela plataforma para tensão e ângulo das barras. A Figura 12 apresenta os resultados obtidos a partir da solução do sistema.

Vale destacar que a solução do fluxo de potência utilizando o método de Newton-Raphson foi embasada em conceitos teóricos previamente apresentados.

A análise dos resultados da simulação apresentou valores referente ao fluxo de potência CA no sistema elétrico. Esses dados foram compilados na Tabela 3, fornecendo os valores correspondentes aos fluxos de potência entre as barras.

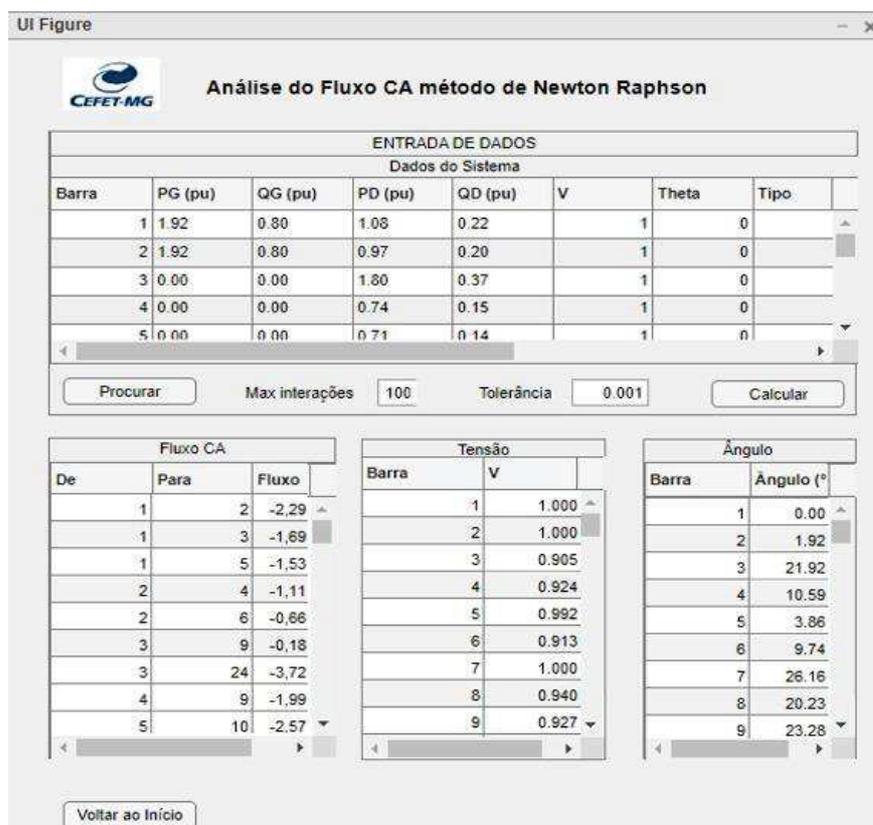


Figura 12 - Plataforma operando a análise do fluxo de potência Newton-Rapshon.
 Fonte: Autores.

Tabela 3 - Parâmetros obtidos via plataforma – Fluxo CA (Newton-Rapshon)

De	Para	Fluxo de Potência (pu)
1	2	-2,2913
1	3	-1,6984
1	5	-1,5349
2	4	-1,1160
2	6	-0,6661
3	9	-0,1863
3	24	-3,7272
4	9	-1,9955
5	10	-2,5750
6	10	-2,1728
7	8	1,5874

8	9	-0,3021
8	10	0,2472
9	11	-2,2012
9	12	-2,3031
10	11	-3,3529
10	12	-3,4548
11	13	-2,5856
11	14	-2,3789
12	13	-2,4100
12	23	-2,8025
13	23	-1,7933
14	16	-2,8297
15	16	0,2914
15	21	-4,5359
15	24	3,2110
16	17	-3,0438
16	19	1,0001
17	18	-1,6899
17	22	-1,3860
18	21	-1,0237
19	20	-0,7751
20	23	-2,0284
21	22	-1,5969

Como citado anteriormente a plataforma também disponibiliza a coleta dos dados de tensão e ângulo calculados em cada uma das barras, para este caso os valores foram coletados estão apresentados na Tabela 4.

Para as barras PV, que representam barras de geração de energia, os ângulos foram determinados durante o processo de iteração, porém suas tensões mantiveram-se fixas. Já para as barras PQ, que representam barras de carga, os valores de tensão e ângulo foram encontrados durante as interações do programa.

Tabela 4 - Parâmetros obtidos via plataforma – Tensão e ângulo das barras Newton-Raphson

Barra	V (pu)	Ângulo θ (pu)
1	1,0000	0,0000
2	1,0000	1,9223
3	0,9052	21,9273
4	0,9247	10,5916
5	0,9927	3,8671
6	0,9133	9,7470
7	1,0000	26,1630
8	0,9404	20,2333
9	0,9275	23,2842
10	0,9324	17,7376
11	0,9575	33,8864
12	0,9432	34,3768
13	1,0000	41,1185
14	1,0000	39,6921
15	1,0000	49,6148
16	1,0000	49,3269
17	1,0000	53,9216
18	1,0000	55,3048
19	0,9936	47,9832
20	0,9962	48,8852
21	1,0000	56,0740
22	1,0000	62,4049
23	1,0000	50,1874
24	0,9294	39,8711

4.2 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON DESACOPLADO

Assim como para o método Newton-Raphson os testes de desempenho da ferramenta computacional foram realizados na plataforma utilizando o sistema elétrico IEEE-RTS32.

O objetivo principal desses testes foi verificar a eficiência e a precisão do método de Newton-Raphson Desacoplado na resolução do fluxo de potência em corrente alternada. A Figura 13 apresenta os resultados obtidos através da plataforma.

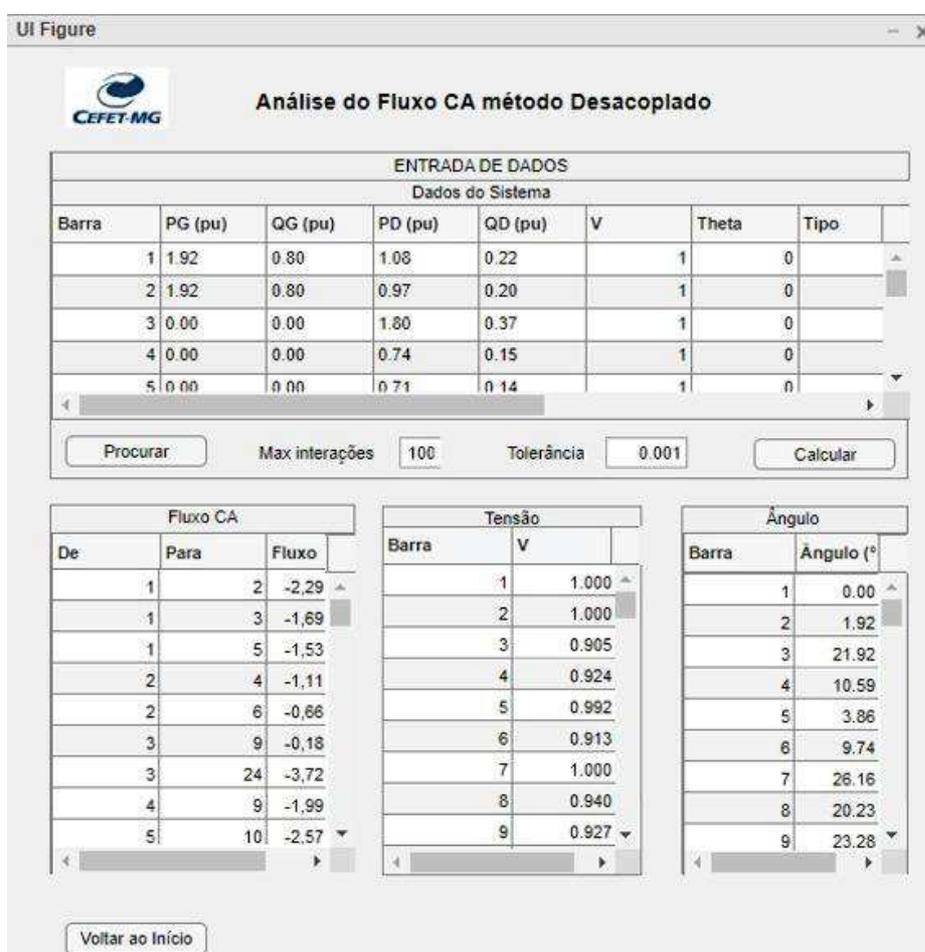


Figura 13 - Plataforma operando a análise do fluxo de potência Newton-Raphson desacoplado.

Fonte: Autores.

Repetindo o que foi feito na análise anterior os dados referentes ao fluxo, tensão e ângulo foram coletados e compilados nas Tabelas 5 e 6 respectivamente. Com base nessas informações foi possível observar uma mínima variação nos valores quando comparado aos obtidos no

método de Newton-Raphson, o que demonstra uma ótima convergência e confiabilidade do método.

Tabela 5 - Parâmetros obtidos via plataforma – Fluxo CA (Newton Desacoplado)

De	Para	Fluxo de Potência (pu)
1	2	-2,2911
1	3	-1,6983
1	5	-1,5347
2	4	-1,1160
2	6	-0,666
3	9	-0,1864
3	24	-3,7271
4	9	-1,9957
5	10	-2,5752
6	10	-2,1722
7	8	1,5873
8	9	-0,3023
8	10	0,2471
9	11	-2,2016
9	12	-2,3035
10	11	-3,3534
10	12	-3,4553
11	13	-2,5856
11	14	-2,3789
12	13	-2,4100
12	23	-2,8025
13	23	-1,7933
14	16	-2,8298
15	16	0,2915
15	21	-4,5359

15	24	3,2108
16	17	-3,0438
16	19	1,0002
17	18	-1,6899
17	22	-1,3860
18	21	-1,0237
19	20	-0,7750
20	23	-2,0284
21	22	-1,5969

Tabela 6 - Parâmetros obtidos via plataforma – Tensão e ângulo das barras Newton
Desacoplado

Barra	V	Theta(°)
1	1,0000	0,0000
2	1,0000	1,9221
3	0,9052	21,9268
4	0,9247	10,5909
5	0,9927	3,8684
6	0,9133	9,7459
7	1,0000	26,1618
8	0,9404	20,2323
9	0,9275	23,2842
10	0,9324	17,7376
11	0,9575	33,8864
12	0,9432	34,3768
13	1,0000	41,1185
14	1,0000	39,6921
15	1,0000	49,6148
16	1,0000	49,3269
17	1,0000	53,9216

18	1,0000	55,3048
19	0,9936	47,9864
20	0,9962	48,8884
21	1,0000	56,0774
22	1,0000	62,4083
23	1,0000	50,1906
24	0,9294	39,8751

4.3 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON DESACOPLADO RÁPIDO

Assim como para os métodos anteriores, a plataforma calculou de forma eficiente os valores de tensão, ângulo e fluxo do sistema, obtendo valores muito próximos quando comparados aos outros métodos. A Figura 14 ilustra a plataforma com todos os itens já calculado, as tabelas 7 e 8 contém os valores do fluxo entre as barras e tensão e ângulo de cada barra.

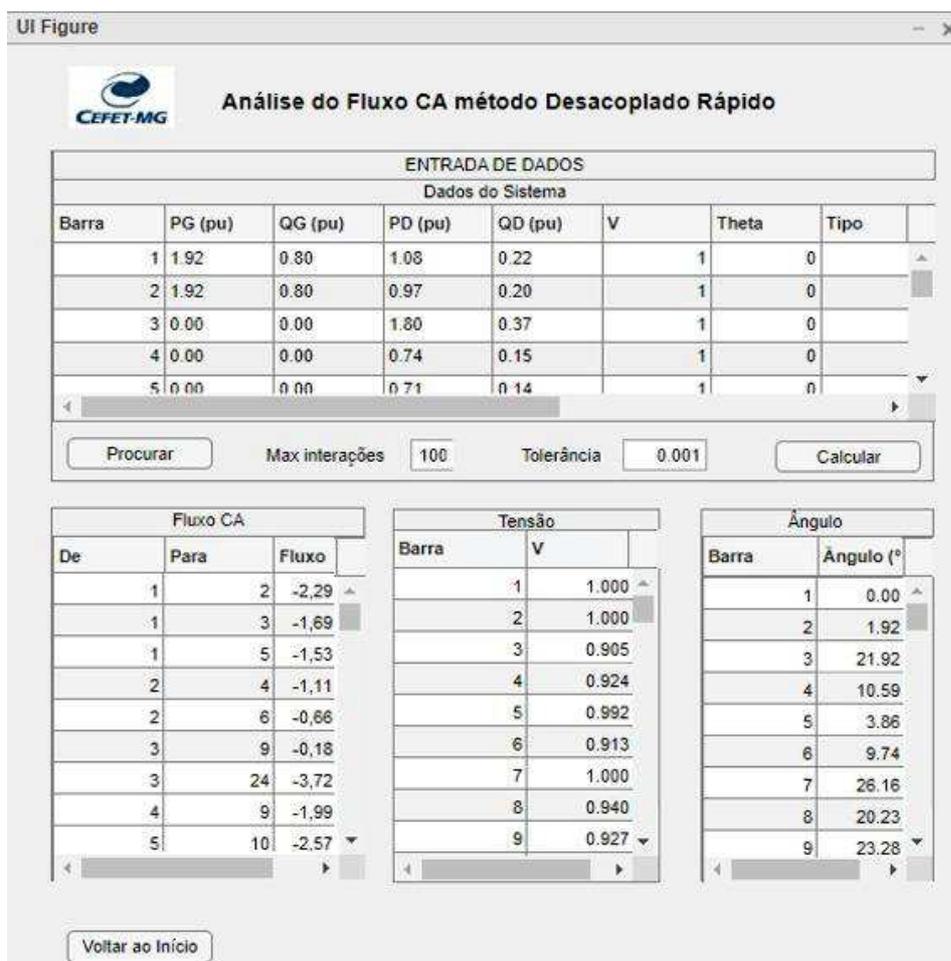


Figura 14 - Plataforma operando a análise do fluxo de potência Newton-Raphson desacoplado rápido.

Fonte: Autores

Tabela 7- Parâmetros obtidos via plataforma – Fluxo CA (Newton Desacoplado Rápido)

De	Para	Fluxo de Potência (pu)
1	2	-2,2913
1	3	-1,6985
1	5	-1,5346
2	4	-1,1161
2	6	-0,6661
3	9	-0,1865
3	24	-3,7272

4	9	-1,9958
5	10	-2,5752
6	10	-2,1723
7	8	1,5873
8	9	-0,3023
8	10	0,2471
9	11	-2,2017
9	12	-2,3036
10	11	-3,3535
10	12	-3,4553
11	13	-2,5857
11	14	-2,3789
12	13	-2,4101
12	23	-2,8025
13	23	-1,7933
14	16	-2,8299
15	16	0,2915
15	21	-4,5359
15	24	3,2109
16	17	-3,0438
16	19	1,0002
17	18	-1,6899
17	22	-1,3861
18	21	-1,0237
19	20	-0,7750
20	23	-2,0284
21	22	-1,5970

Tabela 8- Parâmetros obtidos via plataforma – Tensão e ângulo das barras Newton

Desacoplado Rápido

Barra	V	Theta(°)
1	1,0000	0,0000
2	1,0000	1,9224
3	0,9052	21,9286
4	0,9247	10,5921
5	0,9927	3,8687
6	0,9133	9,7475
7	1,0000	26,1639
8	0,9404	20,2344
9	0,9275	23,2862
10	0,9324	17,7398
11	0,9575	33,8887
12	0,9432	34,3792
13	1,0000	41,1109
14	1,0000	39,6946
15	1,0000	49,6173
16	1,0000	49,3295
17	1,0000	53,9242
18	1,0000	55,3074
19	0,9936	47,9890
20	0,9962	48,8910
21	1,0000	56,0801
22	1,0000	62,4111
23	1,0000	50,1931
24	0,9294	39,8774

4.4 ANÁLISE DE DESEMPENHO COMPUTACIONAL

Para realizar a análise do tempo foi utilizado um desktop com processador Intel Celeron 1.83GHz. Primeiramente, foi realizada a variação na tolerância dos três métodos estudados e coletados dados como número de interações realizadas e tempo de simulação de cada execução do programa. A tabela 9 contém os valores de interações realizadas por cada método até sua convergência.

Tabela 9- Interações de cada método

Tolerância	Quantidade de interações		
	Newton-Raphson	Newton Desacoplado	Desacoplado Rápido
0.1	2	P=5 Q=5	P=21 Q=21
0.01	3	P=11 Q=10	P=34 Q=34
0.001	3	P=16 Q=15	P=47 Q=46
0.0001	4	P=21 Q=21	P=59 Q=59

Observando a tabela acima é de se esperar que o Método de Newton-Raphson se mostre o método com compilação mais rápida entre os três, devido a quantidade inferior de interações que ele necessita para a sua convergência. Porém não é isso o que acontece, de fato o método de Newton apresenta quantidade muito menor de interações do que o método desacoplado e desacoplado rápido, para sua convergência, mas este método também apresenta equacionamentos complexos e necessita de atualizações da matriz Jacobiana constantemente, o que o torna o método mais lento entre os três.

O método que apresenta menor esforço computacional entre os três é o método desacoplado rápido, apesar da necessidade de grandes quantidades de interações para sua convergência ele possui uma estrutura de equações muito mais simples que os demais, isso devido a utilização das matrizes B' e B'' no lugar da matriz Jacobiana quando feito a relação com as potências. As matrizes B' e B'' são obtidas através da matriz admitância e são mantidas fixas durante todas as interações, o que evita uma grande quantidade de cálculos como feito na matriz Jacobiana, isso faz com que o programa rode muito mais interações com menos esforço

e mais rapidez. O método desacoplado rápido também utiliza algumas aproximações para o tornar mais eficiente e confiável como descrito no subitem 2.9.3. A comprovação do estudo realizado acima se encontra na tabela 10, onde é possível analisar o tempo em segundos que cada método gasta para obter a convergência.

Tabela 10- Tempo de cada método até alcançar convergência

Tolerância	Tempo de execução		
	Newton-Raphson	Newton Desacoplado	Desacoplado Rápido
0.1	0.2277	0.2064	0.1845
0.01	0.2485	0.2153	0.1916
0.001	0.2485	0.2231	0.2067
0.0001	0.2641	0.2308	0.2108

Esses resultados podem ser utilizados para analisar a eficiência e a precisão dos métodos estudados. O tempo de execução é um fator importante a ser considerado ao escolher um método de resolução, pois pode afetar o desempenho e a viabilidade prática do algoritmo.

4.5 ANÁLISE DO FLUXO ENTRE BARRAS

Nas Tabelas 3, 4 e 5 são apresentados os valores dos fluxos entre as barras. Os valores obtidos pelos três métodos são bem próximo, não interferido no sentido do fluxo.

Ao examinar as tabelas de resultados, podemos observar que, nos casos em que os valores são positivos, indica-se que há um fluxo de potência entrando na barra de referência. Por outro lado, quando os valores são negativos, indica-se um fluxo de potência saindo da barra de referência e indo em direção a outra. Tem-se uma compreensão melhor analisando a Figura 15 onde as setas indicam o sentido do fluxo.

Essa distinção entre valores positivos e negativos nos fornece uma compreensão mais clara do fluxo de potência no sistema elétrico. Ao analisar esses resultados, podemos identificar as barras que estão gerando energia e as barras que estão recebendo energia da rede.

A predominância de valores negativos nas Tabelas 3, 4 e 5 representam uma distribuição equilibrada das cargas. Esse equilíbrio é fundamental para garantir o bom funcionamento da rede elétrica e todo o fluxo de energia e é um indicativo de que a geração de energia está adequada às demandas permitindo que a rede opere de forma eficiente e confiável.

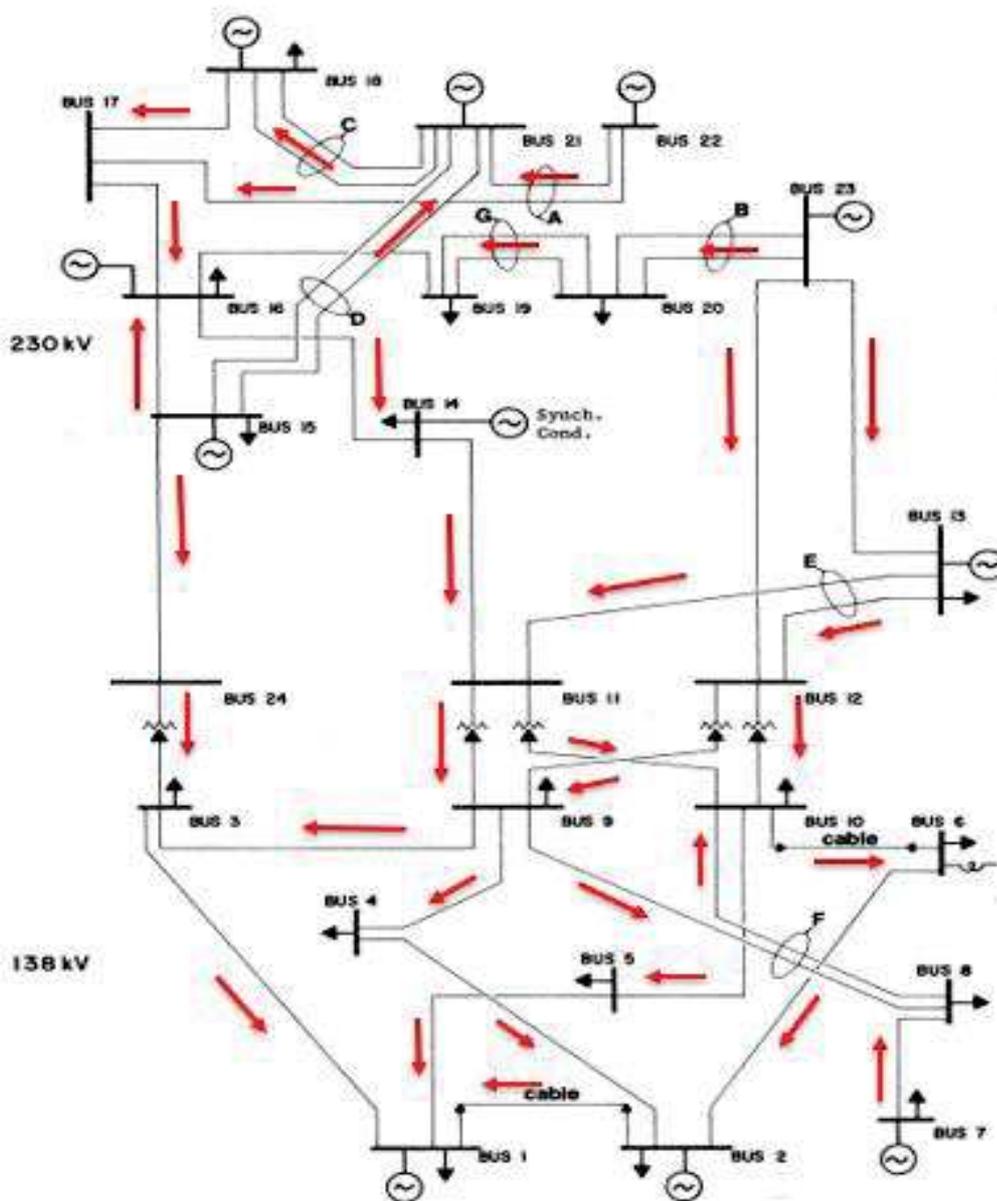


Figura 15 - Sentido do fluxo entre barras.
Fonte: IEEE adaptado.

5 CONCLUSÃO

O estudo do fluxo de potência desempenha um papel fundamental no planejamento, na operação, no controle e na supervisão de sistemas elétricos. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo aprofundar os conhecimentos sobre a formulação do método do fluxo de potência em corrente alternada (CA) por meio de diferentes abordagens.

O desenvolvimento deste trabalho, foi projetada e implementada uma plataforma computacional específica para a análise do fluxo de potência em CA. Essa plataforma permitiu a aplicação dos métodos de Newton-Raphson, Newton-Raphson desacoplado e Newton-Raphson desacoplado rápido, proporcionando uma análise abrangente e detalhada do comportamento do sistema elétrico de potência.

Uma das principais vantagens obtidas com a utilização dessa plataforma computacional foi a automação dos cálculos e a simplificação do processo de análise do fluxo de potência. Por meio da plataforma, foi possível realizar os cálculos de forma mais eficiente e precisa, economizando tempo e recursos.

Além disso, a plataforma possibilitou uma comparação direta entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos. Isso permitiu identificar as diferenças de desempenho, precisão e convergência entre os métodos. Outra vantagem da plataforma computacional foi a capacidade de lidar com sistemas elétricos de diferentes tamanhos e complexidades.

Por fim, a plataforma computacional desenvolvida neste trabalho contribuiu para aprimorar a compreensão e a aplicação dos métodos de análise do fluxo de potência em CA.

6 REFERÊNCIAS

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

BARBOSA, Jordana Alves; ÂNGELO, Frederico de Almeida; BERNARDO, Marcelo Henrique Ribeiro. Plataforma computacional para análise de redes elétricas e confiabilidade de sistemas elétricos de potência. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso Eng. Elétrica - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Nepomuceno-MG.

BORGES, CARMEN LÚCIA TANCREDO. Análise de Sistemas de Potência. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

CARNEIRO, J. L. V. Impacto Da Inserção De Veículos Elétricos No Sistema Elétrico De Potência Brasileiro. Universidade Federal Do Ceará Campus De Sobral. Sobral, P. 56. 2018.

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

CGEE. Redes Elétricas Inteligentes: contexto nacional. 2012. 176 f. Centro de Gestão e estudos estratégicos. Série Documentos Técnicos. Dezembro 2012.

DA SILVA, F. H. J. R. Controle de Tensão por Meio do Fluxo de Potência. 1. ed. Minas Gerais. 2004.

FEARNSIDE, P. M. Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisão. Estudos Avançados. 2019.

IEA, Agência Internacional de Energia. (2019). CO2 emissions from fuel combustion highlights 2019. Paris: IEA.

JUNIOR, Jerri Carlos Tavares; CARVALHO, Prof^o Dr Breno Elias Bretas. Implementação e Análise de Fluxo de Potência pelo Método de Newton-Raphson Desacoplado.

KAGAN, Nelson; DE OLIVEIRA, Carlos César Barioni; ROBBA, Ernesto João. Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Editora Blucher, 2021.

MIRANDA, M. M. D. Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 164. 2012.

MONTICELLI, Alcir José. Fluxo de carga em redes de energia elétrica. E. Blucher, 1983.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: <https://www.ons.org.br/>. Acesso em: 24 mar. 2023.

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

STOTT, B. "Decoupled Newton Load Flow," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, no. 5, pp. 1955-1959, Sept. 1972, doi: 10.1109/TPAS.1972.293524.

STOTT, B. and ALSAC, O., "Fast Decoupled Load Flow," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-93, no. 3, pp. 859-869, May 1974, doi: 10.1109/TPAS.1974.293985.

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



RELATÓRIO FINAL DE CURSO Nº 6/2025 - DENP (11.62.04)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 06/03/2025 15:50)
ITALO ARTHUR JOAO WILSON SILVA MEIRELES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DENP (11.62.04)
Matricula: ###624#3

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: 6, ano: 2025, tipo:
RELATÓRIO FINAL DE CURSO, data de emissão: 06/03/2025 e o código de verificação: **cd064067a5**