

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALEX GRIGOLO DAGIOS

**INCLUSÃO DE TRANSFORMADORES REGULADORES  
NO ALGORITMO DE ANÁLISE DE FLUXO DE  
POTÊNCIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2021

ALEX GRIGOLO DAGIOS

# **INCLUSÃO DE TRANSFORMADORES REGULADORES NO ALGORITMO DE ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA**

**POWER FLOW ALGORITHM WITH THE INCLUSION OF  
REGULATING TRANSFORMERS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Edwin Choque Pillco

PATO BRANCO

2021



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **INCLUSÃO DE TRANSFORMADORES REGULADORES NO ALGORITMO DE ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA** do acadêmico **Alex Grigolo Dagios** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° 277 de 2021.

Fizeram parte da banca examinadora os professores:

**Prof. Dr. Edwin Choque Pillco**

**Prof. Dr. Alexandre Batista de Jesus Soares**

**Prof. Me. César Augusto Portolann**

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

Este trabalho é dedicado à minha família, em especial ao meu avô Samuel e minha namorada Kamilla. Dedico também a todos os meus amigos, em especial a Otávio Rossi e Guilherme Gallina.



*"La semplicità è l'ultima sofisticazione."*

— *Leonardo Da Vinci.*

*"A simplicidade é a maior sofisticação."*

— *Leonardo Da Vinci.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao professor Dr. Edwin Choque Pillco, pela disponibilidade de seu tempo, paciência e esforço para auxiliar na elaboração deste trabalho. Agradeço também a todos os meus colegas que me acompanharam durante este tempo na universidade e todo o corpo docente da UTFPR Campus Pato Branco.

Agradeço a minha família e a minha namorada Kamilla pelo apoio, motivação e pelo amor que sempre demonstraram por mim.

## RESUMO

DAGIOS, Alex G. (2021) **Inclusão de Transformadores Reguladores no Algoritmo de Análise de Fluxo de Potência**. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

Os sistemas elétricos de potência (SEPs) são sistemas não-lineares que estão constantemente mudando durante sua operação. Desde a criação dos SEPs, sua complexidade aumentou de forma rápida, implicando a necessidade de análises mais precisas. Este trabalho aborda a modelagem de pequenos SEPs em regime permanente, com a inclusão de dispositivos reguladores na resolução de problemas envolvendo fluxo de potência. Através da modelagem estática, o SEP é descrito de forma que, utilizando o algoritmo iterativo de *Newton-Raphson*, seja possível obter todas as tensões e ângulos das barras do SEP, com relação a uma barra de referência (*swing*). Neste trabalho será analisado a inclusão de dispositivos reguladores, como o transformador defasador e o transformador em fase com comutação de *taps*, através do *software* ANAREDE, e, posteriormente, será implementado um algoritmo iterativo no *software* MATLAB®, incluindo o transformador em fase nas equações para solução do fluxo de potência. Modificando o algoritmo para a inclusão do transformador em fase com *taps*, este trabalho tem como objetivo comparar os métodos de simulação utilizados para uma análise mais detalhada do SEP.

**Palavras-chave:** ANAREDE, MATLAB, Fluxo de Potência, Método de *Newton-Raphson*, Modelagem Estática, Sistemas Elétricos de Potência, Transformador em fase com *taps*, Transformadores Reguladores.



## ABSTRACT

DAGIOS, Alex G. (2021) **Power Flow Algorithm with the Inclusion of Regulating Transformers**. 58 f. Final Thesis - Electrical Engineering Course, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2021.

The electric power systems (EPS) are non-linear systems that are constantly changing during its operation. Since the EPS's creation, its complexity has grown fast, implying the needing of more precise analysis. This research address modeling a small power system in stationary state, including regulatory devices on resolutions of power flow studies. Static modeling has been used, and the EPS's descriptions are throughout non-linear equations. Hence, the Newton-Raphson method provides all voltages and angles of the bus network, with respect of a reference bus (swing, slack). In this report, the including of regulator devices in the power flow algorithm will be analyzed. The load-tap-changing (LTC) transformer and the phase-shifter transformer will be focused for software ANAREDE, and then, an algorithm will be developed in MATLAB®, including the LTC transformer in the equations for the power flow solutions. This work aims to modify the power flow algorithm, thus comparing the solutions for a more detailed analysis of EPS.

**Keywords:** ANAREDE, MATLAB, Power Flow, Newton-Raphson Method, Static Modeling, Electric Power Systems, Load-Tap-Changing Transformers, Regulatory Transformers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Representação de um SEP composto de duas barras, gerador, linha de transmissão, carga e compensação reativa. . . . .	21
Figura 2:	Modelo da representação $\pi$ da linha de transmissão. . . . .	22
Figura 3:	Modelo do transformador defasador. . . . .	23
Figura 4:	Modelo do transformador em fase. . . . .	23
Figura 5:	Representação $\pi$ do modelo do transformador em fase. . . . .	23
Figura 6:	Fluxograma caracterizando o processo iterativo do algoritmo de fluxo de potência. . . . .	26
Figura 7:	Fluxograma caracterizando o processo iterativo do algoritmo de fluxo de potência incluindo o <i>tap</i> do transformador em fase. . .	30
Figura 8:	Janela "DBAR" para inserção de dados das barras no ANAREDE <sup>1</sup> . . . . .	32
Figura 9:	Janela "DLIN" para inclusão de dados de linhas de transmissão e transformadores no ANAREDE <sup>1</sup> . . . . .	33
Figura 10:	Caminho para a janela "DCTR" para inclusão de dados do transformador defasador no ANAREDE <sup>1</sup> . . . . .	34
Figura 11:	Janela "DCTR" para inclusão de dados do transformador defasador no ANAREDE <sup>1</sup> . . . . .	34
Figura 12:	Janela "EXLF" para inclusão do controle de transformadores em fase e defasador no ANAREDE <sup>1</sup> . . . . .	35
Figura 13:	Janela DLIN para parametrização do transformador em fase no ANAREDE <sup>1</sup> . . . . .	36
Figura 14:	Janela EXLF para simulação do fluxo de potência utilizando o controle automático de <i>taps</i> dos transformadores em fase no ANAREDE <sup>1</sup> . . . . .	37
Figura 15:	SEP proposto para análise computacional. . . . .	39
Figura 16:	SEP proposto simulado no <i>software</i> ANAREDE <sup>2</sup> . . . . .	40

Figura 17: Janela "DLIN" do transformador em fase entre as barras 4 e 2 no ANAREDE. <sup>1</sup> . . . . .	42
Figura 18: Janela "DLIN" do transformador em fase entre as barras 5 e 3 no ANAREDE. <sup>1</sup> . . . . .	43
Figura 19: Janela "DCTR" com ajustes para controle de potência ativa do transformador defasador entre as barras 2 e 3 no ANAREDE. <sup>1</sup>	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Dados de linha do SEP proposto . . . . .	39
Tabela 2:	Dados de barra do SEP proposto . . . . .	40
Tabela 3:	Resultados do fluxo de potência do SEP proposto simulado no ANAREDE. . . . .	41
Tabela 4:	Resultados do fluxo de potência do SEP proposto simulado no ANAREDE utilizando o controle de tensão pela variação do <i>tap</i> dos transformadores em fase $T_{4,2}$ e $T_{5,3}$ . . . . .	44
Tabela 5:	Resultados das variações dos <i>taps</i> dos transformadores em fase $T_{4,2}$ e $T_{5,3}$ após o fluxo de potência do SEP proposto simulado no ANAREDE utilizando o controle de tensão . . . . .	44
Tabela 6:	Resultados do fluxo de potência do SEP proposto simulado no ANAREDE utilizando o controle de tensão pela variação dos <i>taps</i> dos transformadores em fase $T_{4,2}$ e $T_{5,3}$ e o controle de fluxo de potência ativa pelo transformador defasador. . . . .	47
Tabela 7:	Resultados das variações dos <i>taps</i> dos transformadores em fase $T_{4,2}$ e $T_{5,3}$ e da variação do ângulo de defasagem do transformador defasador após o fluxo de potência do SEP proposto simulado no ANAREDE utilizando o controle de tensão e controle de fluxo de potência ativa. . . . .	47
Tabela 8:	Resultados da matriz "dbar" após a simulação do fluxo de potência com o controle de tensão por transformadores em fase do SEP proposto no MATLAB. . . . .	50
Tabela 9:	Resultados da matriz "dlins" após a simulação do fluxo de potência com o controle de tensão por transformadores em fase do SEP proposto no MATLAB . . . . .	50

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	18
1.2.1	Objetivo Geral	18
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
<b>2</b>	<b>SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA</b>	<b>21</b>
2.1	MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SEP	22
2.1.1	Linhas de Transmissão	22
2.1.2	Compensadores Reativos em Derivação (Capacitores ou Reatores)	22
2.1.3	Cargas e Geradores	22
2.1.4	Transformadores Defasadores	22
2.1.5	Transformadores em Fase	23
2.1.6	Matriz de Admitâncias	24
2.1.7	Formulação das Equações do Fluxo de Potência	25
2.1.8	Matriz Jacobiana	26
2.2	CARACTERIZAÇÃO DO ALGORITMO DE FLUXO DE POTÊNCIA	27
2.2.1	Algoritmo de Fluxo de Potência	27
<b>3</b>	<b>DISPOSITIVOS REGULADORES NO ALGORITMO DE FLUXO DE POTÊNCIA</b>	<b>29</b>
3.1	<i>TAP</i> DO TRANSFORMADOR EM FASE NO ALGORITMO DE <i>NEWTON-RAPHSON</i>	29
3.2	CONTROLE DE FLUXO DE POTÊNCIA PELOS TRANSFORMADORES EM FASE E DEFASADOR	31
3.2.1	Controle do Fluxo de Potência Ativa pelo Transformador Defasador	31
3.2.2	Controle de Tensão pelo Transformador em Fase	35
<b>4</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DE FLUXO DE POTÊNCIA E ANÁLISE DO SEP</b>	<b>38</b>

4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SEP PROPOSTO .....	38
4.2	SIMULAÇÃO DO SEP PROPOSTO COM CONTROLE DE TENSÃO NO ANAREDE .....	41
4.3	CONTROLE DE FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA PELO TRANSFORMADOR DEFASADOR ANAREDE .....	45
4.4	FLUXO DE POTÊNCIA COM O TRANSFORMADOR EM FASE PARA CONTROLE DE TENSÃO MATLAB.....	48
4.4.1	Modificação do Algoritmo de Fluxo de Potência para Inclusão do <i>Tap</i> do Transformador em Fase .....	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>52</b>
	<b>APÊNDICE A - ALGORITMO IMPLEMENTADO .....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são estruturas complexas, e obter análises precisas sobre o seu funcionamento é de extrema importância para garantir o suprimento de energia elétrica a todas as cargas, possibilitar planejamentos e otimizar o seu desempenho.

O estudo de fluxo de potência é uma ferramenta amplamente utilizada na análise de SEP. Modelando um SEP em regime permanente por meio dos componentes existentes, geradores, linhas de transmissão, transformadores, entre outros, é possível obter as equações para determinar o fluxo de potência utilizando-se de algoritmos iterativos, como o de *Newton-Raphson*, e obter as condições nominais de operação do SEP. O avanço da tecnologia computacional proporcionou uma grande vantagem nessa área do conhecimento, possibilitando análises mais rápidas e detalhadas dos SEP.

### 1.1 CARACTERIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

No final do século XIX o sistema de energia elétrica em corrente alternada (CA) foi adotado como padrão pela sociedade tendo como fator decisivo a invenção do transformador (WEEDY *et al.*, 2012), dessa forma, se originam os primeiros sistemas de distribuição de energia elétrica em CA.

Os sistemas em CA se popularizaram devido a sua simplicidade em relação aos sistemas em corrente contínua (CC) e sua flexibilidade em relação aos níveis de tensão de geração e de consumo. À medida que o uso comercial da energia elétrica se estabeleceu, foram concebidos os sistemas polifásicos, as máquinas assíncronas de indução e os sistemas de transmissão, essas invenções formam a base dos sistemas em CA até os dias atuais (KUNDUR, 1994).

O avanço tecnológico da sociedade implicou a necessidade, cada vez maior, de transmitir grandes quantidades de energia por longas distâncias, isso incentivava transmissões em altas tensões para reduzir perdas por Efeito Joule (KUNDUR, 1994). Padrões e normativas surgiram, e com isso, os métodos de geração, transmissão e distribuição foram aprimorados.

Na atualidade, há grandes incentivos para geração de energia elétrica de forma sustentável. A geração por fontes renováveis, principalmente a eólica e fotovoltaica, cresce a cada ano, com novos aerogeradores e painéis fotovoltaicos sendo conectados as redes de baixa tensão (FONSÊCA *et al.*, 2017; SIGA, 2021). As energias renováveis, são cada vez mais utilizadas nas matrizes de geração do planeta, e atualmente geram potência na casa dos GW em países como Alemanha, Austrália e Brasil (CASTRO; DANTAS, 2018).

Entretanto, a necessidade de fatores climáticos, como luz do sol e ventos, para a geração de energia elétrica, agrega complexidade para a operação conectada dessas fontes de energia renováveis, já que a potência não é injetada constantemente. Assim, o aumento de unidades de geração distribuída afeta a operação normal de um SEP, podendo alterar níveis de tensão, frequência, introduzir harmônicos e interferir na qualidade de energia elétrica (KHADKIKAR; KIRTLEY, 2011; ZHAN *et al.*, 2018; CAI *et al.*, 2018). No caso da geração fotovoltaica, os inversores utilizados para a adequação da energia gerada, em CC, com a energia da rede, em CA, introduzem harmônicos indesejados, no espectro de frequência de até 200 kHz, esses sinais elétricos causados por dispositivos eletrônicos chaveados, podem gerar efeitos indesejados nos sistemas de controle dos SEPs, diminuindo a qualidade da energia elétrica produzida. A diminuição da qualidade de energia tem grande impacto econômico nos consumidores conectados à rede, onde pequenas interrupções ou curtos mal funcionamentos de poucos segundos, causados por ela, significam grandes prejuízos (VEDAM; SARMA, 2009).

Por outro lado, a interconexão entre SEPs provou ser o melhor caminho para incrementar a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica (KUNDUR, 1994). Entretanto, isso incrementa drasticamente em sua complexidade, cuja conformação básica é dada por geradores, transformadores em fase, transformadores defasadores, linhas de transmissão, cargas, reatores, capacitores, entre outros (MONTICELLI, 1983). Diversos problemas surgem pelo fato que os SEPs interagem com sua própria estrutura, cada variação de carga e topologia de ligação interfere em seu comportamento. Consequentemente, na atualidade, os SEPs são extremamente complexos, e seu ciclo de trabalho é cada vez mais intenso, com novas cargas sendo acionadas a todo momento (KUNDUR, 1994).

Os requisitos fundamentais para o funcionamento adequado de um SEP estão relacionados com o suprimento contínuo de potência ativa e reativa demandada pelas cargas, e também, com os padrões de frequência, tensão, além da confiabili-



dade e segurança das instalações (KUNDUR, 1994). Geralmente variações externas causam perturbações na rede elétrica, assim como mudanças de topologia e acionamento de cargas. Essas interações adicionais, fisicamente, representam o mal funcionamento dos componentes do sistema, e matematicamente, a modificação de ordem do sistema, bem como o número de variáveis de interesse (KUNDUR *et al.*, 2004). Tais perturbações, que interagem com o SEP de forma indesejada, são ocasionadas na maioria das vezes, por variações nos níveis de tensão, as quais podem ocorrer instantaneamente, durando milissegundos, momentaneamente, por alguns segundos, ou temporariamente, chegando a durar alguns minutos. As perturbações de longa duração têm maiores impactos nos funcionamentos das cargas e, conseqüentemente, maiores impactos econômicos (VEDAM; SARMA, 2009).

As variações de tensão de longa duração, são um aumento (sobretensão) ou diminuição (subtensão) de cerca de 10% do valor eficaz (do inglês RMS) da tensão de operação com frequência nominal, com duração maior que 1 minuto. Subtensões são causadas por acionamentos de grandes motores elétricos ou desconexão de grandes bancos de capacitores. Por outro lado, uma sobretensão é causada energizando um grande banco de capacitores ou na desconexão de grandes cargas. Outra causa comum para as variações de tensões de longa duração, são o ajuste inadequado do *tap* de transformadores em fase, podendo acarretar em sobretensões ou subtensões, e por durar vários minutos, causam stress indesejados nas barras do SEP, podendo ocasionar acionamentos das proteções, ou até mesmo danificando os equipamentos, interferindo diretamente em sua vida-útil (VEDAM; SARMA, 2009).

No intuito de garantir o bom desempenho dos SEPs, os governos federais criaram órgãos para regulamentação e fiscalização dos padrões de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica dentro dos seus territórios (CASTRO; DANTAS, 2018). No Brasil, a Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é quem garante a qualidade de energia elétrica ao consumidor. A ANEEL juntamente com órgãos estaduais, são responsáveis por fornecer energia elétrica no padrão 60 Hz com qualidade, além de desenvolver novos projetos de pesquisa visando sempre acompanhar as novas tecnologias desenvolvidas no mundo, mantendo os padrões de confiabilidade e segurança (ANEEL, 2021).

Diversos estudos conduzidos proporcionaram uma análise mais detalhada e confiável dos SEPs. Entre eles estão as análises transitórias e análises em regime permanente. As análises transitórias são feitas a partir de equações diferenciais, demonstrando dinâmicas instantâneas ou em espaço de tempo muito reduzidos. No

entanto, as análises em regime permanente dão um panorama mais amplo, visando as condições de operações desejadas, tendo como foco as situações onde as variações no tempo são suficientemente lentas para que se possam ignorar os efeitos transitórios (MONTICELLI, 1983).

A análise em regime permanente, através de estudos de fluxo de potência, permite entender o comportamento do SEP, fundamental para o desenvolvimento e o funcionamento nominal de seus equipamentos, incrementando sua probabilidade de operação adequada durante um período considerável de tempo (KUNDUR *et al.*, 2004). Essa análise tem como objetivo calcular todas as tensões e ângulos das barras do SEP com relação a uma barra de referência (*slack* ou *swing*) (MONTICELLI, 1983; STAGG; EL-ABIAD, 1968) e, dessa forma conhecer a distribuição da potência que transfere cada um dos equipamentos que conformam o SEP, possibilitando a elaboração de planejamentos, visando atender crescentes demandas e avaliar o desempenho atual da rede (STAGG; EL-ABIAD, 1968).

A modelagem em regime permanente do SEP se realiza através de um conjunto de equações algébricas não-lineares, onde ao menos dois dos parâmetros principais de cada barra serão conhecidos (MONTICELLI, 1983). A formulação básica do problema de fluxo de potência assume um sistema trifásico equilibrado, e o modelo tipo da representação de sequência positiva do sistema de transmissão com reatores *shunt*. Assim é possível a obtenção da matriz de admitâncias do SEP (STOTT, 1974) e classificar as barras de acordo as especificações de potência e tensão. De acordo com a literatura, o método de *Newton-Raphson* provou ser o mais eficiente atualmente para obter soluções do problema de fluxo de potência (PETERSON; MEYER, 1971; STOTT, 1974; GÓMEZ-EXPÓSITO *et al.*, 2018).

Os padrões criados para o correto funcionamento de grandes sistemas interconectados, tornaram necessários ajustes em tempo real das variáveis dos SEPs. Visando cumprir esses requisitos, introduziu-se dispositivos controladores capazes de atuar para manter o sistema dentro dessas especificações. Atualmente, a variedade de cargas e interconexões nos SEPs, dificultam a ação de dispositivos de controle para atingir determinados limites de operação (AJJARAPU, 2007). Estes limites podem ser Fator de Potência (FP), tensão, frequência, corrente e injeções de potência ativa e reativa. Portanto, para uma análise completa, esses limites bem como os dispositivos de controle, devem ser incluídos nas modelagens analíticas do SEP.

O SEP encontra-se no seu estado normal de operação quando a sua frequência e tensão são mantidas praticamente constantes, e as demandas das car-

gas são supridas (COSTA; SILVA, 2000). Para isso, métodos de controle atuam de forma a manter a frequência e tensão dentro dos limites desejados. Estes dois parâmetros estão diretamente ligados ao fluxo de potência do SEP. A frequência está ligada ao balanço de potência ativa, ou seja, uma mudança da demanda de potência ativa em um ponto da rede, tem como resposta, uma variação na frequência. De maneira análoga, os níveis de tensão estão relacionados com o balanço de potência reativa do SEP, entretanto, por existirem várias formas de compensação reativa como banco de capacitores e reatores, por exemplo, ao longo das linhas de transmissão, as variações de tensão são mais flexíveis do que as de frequência (KUNDUR, 1994; COSTA; SILVA, 2000).

Existem diversas abordagens de controle para manter o SEP em seus valores nominais. No controle de frequência, pode-se controlar localmente os geradores, atuando sobre a velocidade do rotor, contudo, existem controles suplementares que atuam de forma centralizada como o controle automático de geração (COSTA; SILVA, 2000) e o controle por transformadores defasadores (MONTICELLI, 1983; PETERSON; MEYER, 1971). O controle dos níveis de tensão do SEP pode ser feito através de ajustes dos *taps* de transformadores em fase ou por compensadores reativos como banco de capacitores e reatores *shunt*. O controle da corrente de excitação dos geradores, por outro lado, é uma forma de controle de tensão local e que não modifica consideravelmente as características da rede (KUNDUR, 1994).

Adicionando transformadores defasadores e transformadores em fase no SEP, por exemplo, é possível controlar os fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, contudo, a introdução desses dispositivos de controle no SEP, representa a inclusão de novas variáveis nas equações do fluxo de potência (MONTICELLI, 1983; PETERSON; MEYER, 1971). Uma relação de transformação variável por meio de *taps* comutáveis permite ao transformador em fase controlar o fluxo de potência reativa, enquanto o transformador defasador limita o fluxo de potência ativa introduzindo uma defasagem angular entre seus bornes (primário - secundário) (MONTICELLI, 1983; STOTT, 1974).

Na inclusão dessas novas variáveis, os limites de operação dos sistemas serão automaticamente atualizados com cada iteração do método de Newton-Raphson. A definição desses limites é arbitrária, como por exemplo a escolha de uma tensão em uma determinada barra, ou um limite físico, como a quantidade de *taps* presentes em um transformador em fase (MONTICELLI, 1983; BONE *et al.*, 2018). O algoritmo do fluxo de potência, tem como objetivo calcular todas as tensões e ângulos

das barras do SEP levando em consideração a atuação dos dispositivos de controle e seus limites. A partir da análise contendo os dispositivos responsáveis por manter os limites de operação, as ações de controle serão automaticamente ajustas nas equações do fluxo de potência.

No passado, os métodos computacionais não acompanhavam o crescimento acelerado da complexidade dos SEPs, então, a velocidade de convergência do Método de *Newton-Raphson* considerando controles e limites não era tão utilizada (STOTT, 1974). Com o avanço do processamento computacional atual, e o aumento significativo de sistemas de controle nos SEPs, esta abordagem consegue ser efetiva mesmo com o aumento significativo de iterações devido ao acréscimo de novas equações e variáveis que representam os controladores (GÓMEZ-EXPÓSITO *et al.*, 2018).

O poder computacional atualmente, possibilitou o desenvolvimento de novos métodos para otimizar o monitoramento e os métodos utilizados para estudar fluxos de potência. Com os níveis de tensão das transmissões de energia elétrica cada vez maiores, a capacidade de controlar e planejar SEPs de grande porte se torna indispensável, tanto pela questão financeira quanto pela segurança das instalações elétricas. Consequentemente, novas estruturas e métodos de controle veem sendo implementados nos SEPs (YANG *et al.*, 2017), agregando cada vez mais valor a uma das áreas mais importantes para a sociedade moderna.

## 1.2 OBJETIVOS

Modelagem computacional do sistema elétrico de potência em regime permanente, incluindo transformador regulador de módulo de tensão com comutação automática de *taps* e a caracterização do controle do fluxo de potência através do transformador defasador mediante simulações no *software* ANAREDE.

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Neste trabalho, pretende-se desenvolver de um algoritmo computacional no *software* MATLAB<sup>1</sup> de um sistema elétrico de potência em regime permanente, incluindo o transformador de regulação de módulo de tensão com comutação automática de *taps*. Os resultados obtidos pelo algoritmo computacional, a ser testado em sistemas de potência de pequeno porte, serão contrastados através dos resultados obtidos

---

<sup>1</sup> **Software MATLAB Versão 2021a licensed to UTFPR - PATO BRANCO.**

no *software* ANAREDE<sup>2</sup>. Por outro lado, o controle do fluxo de potência ativa realizado pelo transformador defasador será caracterizado mediante sua modelagem no ANAREDE.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Modelagem em regime permanente de sistemas de potência de pequeno porte.
2. Desenvolvimento do algoritmo computacional do fluxo de potência para o problema do controle de tensão mediante transformadores reguladores de módulo de tensão no MATLAB®.
3. Contraste dos resultados obtidos pela simulação em MATLAB® mediante ao ANAREDE.
4. Modelagem do transformador defasador no ANAREDE e caracterização do controle de potência ativa.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo: introdução, sistemas elétricos de potência, inclusão de dispositivos reguladores no algoritmo de fluxo de potência, implementação do algoritmo de fluxo de potência e análises do SEP proposto em *software* e conclusão.

- Capítulo 1: Introdução, no qual descreve a justificativa, objetivos gerais, objetivos específicos e importância do trabalho.
- Capítulo 2: São apresentados conceitos preliminares sobre Sistemas Elétricos de Potência e como é realizada a modelagem matemática dos seus componentes mais importantes.
- Capítulo 3: É apresentado o algoritmo de fluxo de potência e como é realizada a implementação do algoritmo em *software*. Neste capítulo também é exemplificado como são introduzidos dispositivos reguladores como o transformador em fase e o transformador defasador no ANAREDE.

---

<sup>2</sup> **Software ANAREDE Versão 11.03.01 licensed to UTFPR - PATO BRANCO.**

- Capítulo 4: É apresentado a implementação de um SEP de pequeno porte no ANAREDE com controle de tensão e com controle de fluxo de potência ativa. Posteriormente é apresentada a implementação do algoritmo de fluxo de potência com a inclusão do controle feito pelo transformador em fase no MATLAB.
- Capítulo 5: É apresentada a Conclusão do trabalho.

## 2 SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos básicos e indispensáveis para modelagem e análise de Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Primeiramente será apresentada uma descrição dos componentes primários que compõem um SEP como linhas de transmissão, transformadores, cargas e geradores. Em seguida é apresentada a estrutura do algoritmo de *Newton-Raphson*, uma ferramenta iterativa aplicada em SEP para a obtenção do fluxo de potência ativa e reativa entre as barras do SEP analisado.

Para a resolução de problemas envolvendo fluxo de potência, o SEP deve ser representado por um conjunto de equações e inequações algébricas. Para obter as representações matemáticas afim de determinar o estado da rede, cada componente do SEP deve ser descrito através de uma modelagem estática (MONTICELLI, 1983). Esses elementos podem ser divididos em dois grupos: componentes terminais e componentes intermediários, como ilustrado na Figura 1. Os componentes terminais estão ligados a uma barra qualquer e a referência do circuito, como geradores, cargas, e os elementos *shunt*, capacitores e reatores. Os componentes intermediários são aqueles ligados entre duas barras quaisquer do sistema, como linhas de transmissão, transformadores em fase e defasadores.

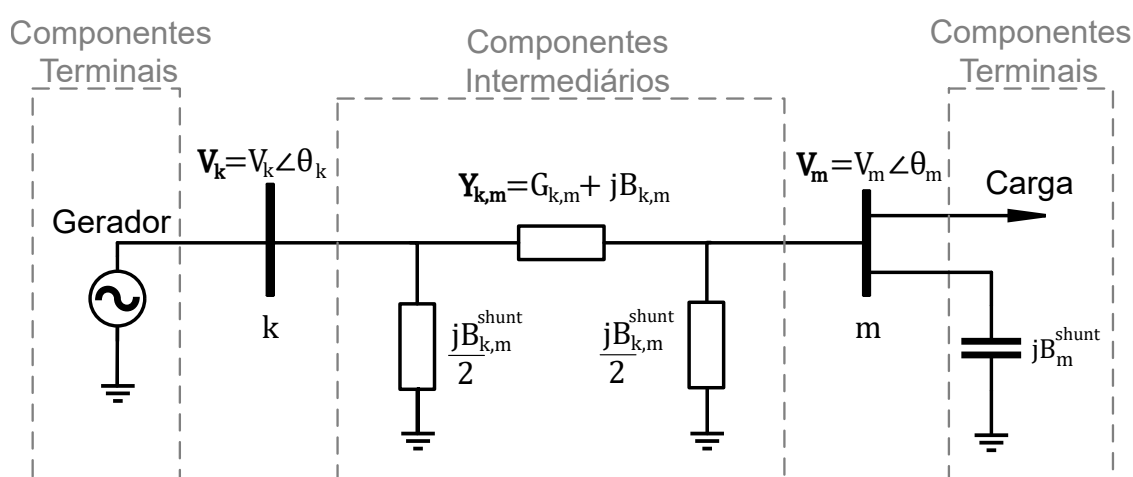


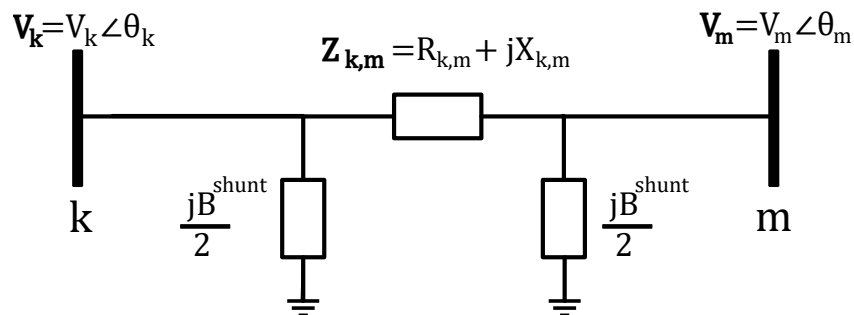
Figura 1: Representação de um SEP composto de duas barras, gerador, linha de transmissão, carga e compensação reativa.

Fonte: Autoria própria.

## 2.1 MODELAGEM DOS COMPONENTES DO SEP

### 2.1.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO

Assume-se o modelo  $\pi$  de sequência positiva com reatores *shunt* da linha de transmissão trifásica equilibrada apresentado na Figura 2, onde os parâmetros definidos são a impedância série  $Z_{k,m}$  e a susceptância capacitiva *shunt*  $jB^{shunt}$ .



**Figura 2: Modelo da representação  $\pi$  da linha de transmissão.**  
Fonte: Autoria própria.

### 2.1.2 COMPENSADORES REATIVOS EM DERIVAÇÃO (CAPACITORES OU REATORES)

São elementos terminais representados por uma susceptância  $jB^{shunt}$ , Figura 1, positiva no caso de capacitores ou negativa no caso de reatores.

### 2.1.3 CARGAS E GERADORES

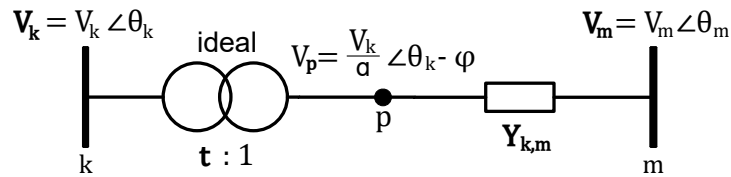
Os geradores e as cargas são considerados elementos terminais externos ao SEP, como apresentados na Figura 1, onde suas características são modeladas apenas por suas injeções de potências líquidas nas barras, ou seja, a quantidade de potência ativa e reativa que é gerada e consumida nas barras as quais esses elementos estão conectados.

### 2.1.4 TRANSFORMADORES DEFASADORES

Os transformadores são modelados através de um autotransformador ideal com relação de transformação  $t$  e uma admitância série  $\mathbf{Y}_{k,m}$ . Nos transformadores defasadores, ilustrado na Figura 3, a relação de transformação é um número complexo ( $\mathbf{t} = a \cdot e^{j\phi}$ ) onde,  $a$  é relação entre as magnitudes de tensão e  $\phi$  é o ângulo de



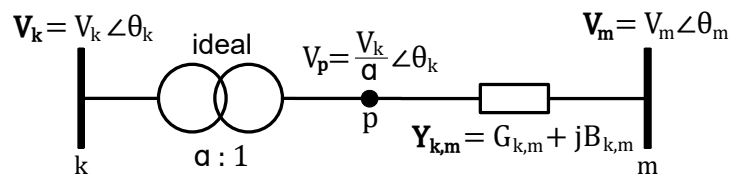
defasagem que o defasador introduz. Em geral, a relação entre as magnitudes de tensão é unitária, caracterizando um transformador defasador puro.



**Figura 3: Modelo do transformador defasador.**  
Fonte: Autoria própria.

### 2.1.5 TRANSFORMADORES EM FASE

O transformador em fase, apresentado na Figura 4, é um caso especial do transformador defasador, onde a relação de transformação é um número real ( $t = a$ ) diferente de um.

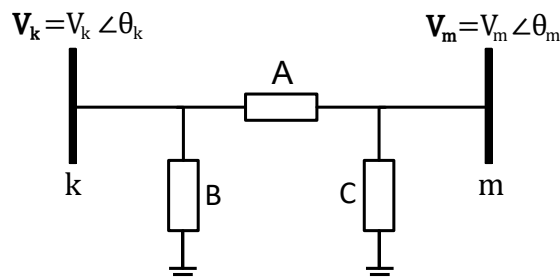


**Figura 4: Modelo do transformador em fase.**  
Fonte: Autoria própria.

Ainda na Figura 4, o fato do transformador entre o nó  $k$  e o nó intermediário  $p$  ser ideal significa que a transferência de potência complexa ocorre sem perdas, ou seja,  $S_k = S_p$ . Conseqüentemente, a relação de transformação é dada pela Equação 1.

$$\frac{V_k}{V_p} = a. \quad (1)$$

O transformador em fase também pode ser representado pelo modelo  $\pi$  ilustrado na Figura 5, onde as admitâncias **A**, **B** e **C** são funções da admitância  $Y_{k,m}$  do transformador e da sua relação de transformação apresentada da Equação 1.



**Figura 5: Representação  $\pi$  do modelo do transformador em fase.**  
Fonte: Autoria própria.

As admitâncias **A**, **B** e **C**, apresentadas na Figura 5, são representadas respectivamente por

$$\mathbf{A} = \frac{\mathbf{Y}_{k,m}}{a}, \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mathbf{Y}_{k,m}}{a} \cdot \left( \frac{1}{a} - 1 \right), \quad (3)$$

$$\mathbf{C} = \frac{\mathbf{Y}_{k,m}}{a} \cdot (a - 1). \quad (4)$$

Observa-se que quando a relação de transformação da Equação (1) é unitária, as admitâncias **B** e **C** serão nulas, então, o transformador se reduz a uma admitância série  $\mathbf{Y}_{k,m}$ . Quando o transformador trabalha, com relação de transformação maior que 1 p.u., **B** tem sinal contrário a  $\mathbf{Y}_{k,m}$  (capacitivo) e **C** tem o mesmo sinal de  $\mathbf{Y}_{k,m}$  (indutivo). Analogamente, quando a relação de transformação é menor a 1 p.u., **B** tem o mesmo sinal de  $\mathbf{Y}_{k,m}$  (indutivo) e **C** tem sinal oposto a  $\mathbf{Y}_{k,m}$  (capacitivo). Se uma barra dos terminais do transformador em fase tiver tensão controlada (PV ou  $V\theta$ ), ou estiver eletricamente próxima a uma barra deste tipo, será como o transformador se apoiasse em um dos seus terminais para diminuir ou aumentar a tensão do terminal oposto (MONTICELLI, 1983).

### 2.1.6 MATRIZ DE ADMITÂNCIAS

Na formação da Matriz de Admitâncias do SEP, Equação (5), os elementos na diagonal principal, representados pela Equação (6), serão a soma de cada admitância conectada a cada barra do SEP respectiva a sua posição, enquanto elementos fora da diagonal principal, Equação (7), serão representados pelo oposto da admitância série entre duas barras.

$$[\mathbf{Y}] = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \cdots & \mathbf{Y}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Y}_{n1} & \cdots & \mathbf{Y}_{nn} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{Y}_{ii} = \sum_{x=1}^n \mathbf{Y}_{ix} + \mathbf{Y}_i^{shunt}, \quad (6)$$

$$\mathbf{Y}_{in} = \mathbf{Y}_{ni} = -\mathbf{Y}_{k,m} = -\mathbf{Y}_{m,k}. \quad (7)$$

A matriz de admitâncias da Equação (5), pode ser expressa em termos de matriz de condutâncias e matriz de susceptâncias, representada na Equação (8).

$$[\mathbf{Y}] = [G] + j [B], \quad (8)$$

$$[G] = \text{Re} [\mathbf{Y}], \quad (9)$$

$$[B] = \text{Im} [\mathbf{Y}], \quad (10)$$

### 2.1.7 FORMULAÇÃO DAS EQUAÇÕES DO FLUXO DE POTÊNCIA

As equações do fluxo de potência, relacionam potência ativa e reativa de uma barra qualquer, com tensões, ângulos, condutâncias e susceptâncias entre duas barras  $k$  e  $m$  conectadas eletricamente em um SEP com  $n$  barras. As equações do fluxo de potência são descritas a seguir

$$\mathbf{P}_k(V, \theta) = V_k \cdot \sum_{m=1}^n V_m \cdot (G_{k,m} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{k,m} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m)), \quad (11)$$

$$\mathbf{Q}_k(V, \theta) = V_k \cdot \sum_{m=1}^n V_m \cdot (G_{k,m} \cdot \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{k,m} \cdot \cos(\theta_k - \theta_m)), \quad (12)$$

Cada barra do SEP terá uma injeção de potência líquida, uma potência gerada e uma potência consumida pelas cargas, definida como potência especificada de acordo com as Equações (13) e (14),

$$\mathbf{P}_k^{\text{especificada}} = \mathbf{P}_k^{\text{gerada}} - \mathbf{P}_k^{\text{carga}}, \quad (13)$$

$$\mathbf{Q}_k^{\text{especificada}} = \mathbf{Q}_k^{\text{gerada}} - \mathbf{Q}_k^{\text{carga}}. \quad (14)$$

As potências especificadas, são constantes definidas na classificação das barras do SEP. Barras PV terão potência ativa especificada e barras PQ terão potência ativa e reativa especificadas. A partir das potências calculadas nas Equações (11) e (12), e das potências especificadas nas Equações (13) e (14), obtêm-se os resíduos

$$\Delta \mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^{\text{especificada}} - \mathbf{P}_k(V, \theta) = 0, \quad (15)$$

$$\Delta \mathbf{Q}_k = \mathbf{Q}_k^{\text{especificada}} - \mathbf{Q}_k(V, \theta) = 0, \quad (16)$$

Os resíduos de potência ativa, Equação (15), e reativa, Equação (16), são utilizados para definir a convergência do algoritmo. O maior valor em módulo dos resíduos, deve ser menor que um critério de convergência previamente definida para obter uma solução convergente, como pode ser observado na tomada de decisão (bloco iv) da Figura 6.

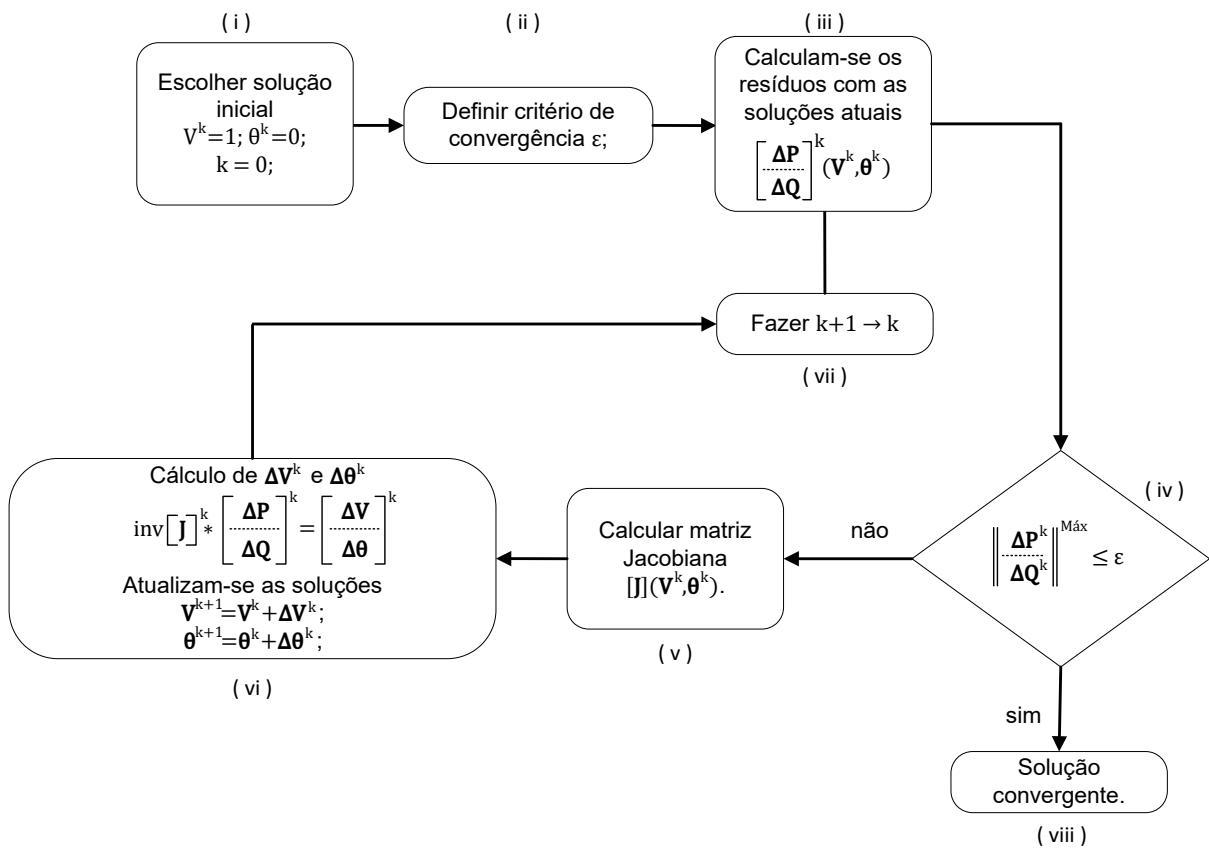


Figura 6: Fluxograma caracterizando o processo iterativo do algoritmo de fluxo de potência.  
Fonte: Autoria própria.

### 2.1.8 MATRIZ JACOBIANA

Segundo (MONTICELLI, 1983), a matriz Jacobiana, Equação (17), é formada pelas derivadas parciais das expressões de fluxo de potência apresentadas nas Equações (11) e (12), em relação as variáveis de interesse

$$[\mathbf{J}](V, \theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial V} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial V} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

A matriz Jacobiana é utilizada para atualizar o valor das variáveis ao longo do processo de iteração. Em sistemas com um número grande de barras, a matriz jacobiana é dividida em submatrizes apresentadas na Equação 18, para condensar as equações.

$$[\mathbf{J}](V, \theta) = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}. \quad (18)$$

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DO ALGORITMO DE FLUXO DE POTÊNCIA

### 2.2.1 ALGORITMO DE FLUXO DE POTÊNCIA

O algoritmo iterativo de *Newton-Raphson* necessita que o SEP analisado tenha primeiramente todas as suas barras classificadas de acordo com sua injeção de potência e tensão. Uma das barras do SEP será a barra de referência  $V\theta$  (*swing, slack*), com tensão 1 p.u. e ângulo  $0^\circ$  fixos. As demais barras serão classificadas como PV ou PQ, no qual as barras PV terão tensão e injeção de potência ativa definidas, e barras PQ terão a injeção de potência ativa e reativa especificadas.

Após a classificação das barras do SEP, são definidos valores iniciais para o ângulo das barras PQ e PV, convencionalmente igual a zero, e as magnitudes das tensões das barras PQ, definidas em 1 p.u., como ilustrado no bloco (i) da Figura 6. Contudo, deve-se definir um critério de convergência, uma tolerância a qual determinará quando a solução de algoritmo será atingida, essa tolerância, bloco (ii) da Figura 5, tem valores típicos entre 0,01 p.u. e 0,000001 p.u., quanto menor a tolerância, mais iterações o algoritmo realizará até convergir.

Posteriormente, calculam-se os valores das Equações (11) e (12), representadas no bloco (iii) da Figura 5, utilizando os dados da matriz de admitâncias da Equação (5) e as soluções iniciais definidas. Após, determinam-se os resíduos de potência ativa para barras PQ e PV, Equação (15), e os resíduos de potência reativa para barras PQ, Equação (16).

Comparando os maiores valores, em módulo, dos resíduos com o critério de convergência, como descrito na tomada de decisão (bloco iv) da Figura 6, é constatado se o algoritmo convergiu. Se,

$$\left\| \begin{array}{c} \Delta \mathbf{P}^k \\ \Delta \mathbf{Q}^k \end{array} \right\|^{Max} \leq \varepsilon, \quad (19)$$

o algoritmo convergiu para a solução, caso contrário, o algoritmo segue para o bloco (v) da Figura 6, calculando a matriz Jacobiana da Equação (18). Em seguida, como ilustra o bloco (vi) da Figura 6, determina-se o vetor de variáveis dependentes  $(\Delta\theta, \Delta\mathbf{V})$  da Equação (20) a seguir,

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}_k \\ \Delta \mathbf{Q}_k \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix}^k. \quad (20)$$

Portanto, atualizam-se os valores para  $\theta$  e  $V$ , bloco (vii) da Figura 6, e o algoritmo prossegue para a próxima iteração utilizando as variáveis atualizadas das Equações (21) e (22).

$$\boldsymbol{\theta}^{k+1} = \boldsymbol{\theta}^k + \Delta\boldsymbol{\theta}^k, \quad (21)$$

$$\mathbf{V}^{k+1} = \mathbf{V}^k + \Delta\mathbf{V}^k. \quad (22)$$

### 3 DISPOSITIVOS REGULADORES NO ALGORITMO DE FLUXO DE POTÊNCIA

Em um SEP, a energia elétrica raramente é consumida nas proximidades de onde ela é gerada, portanto, essa energia deve ser devidamente transportada e controlada com um alto grau de confiabilidade e eficiência, pois os SEP estão sujeitos a inúmeras mudanças em sua demanda por potência ativa e reativa durante sua operação.

Devido as características da energia elétrica, ela não pode ser armazenada em grandes quantidades, conseqüentemente deve haver um fluxo de energia contínuo nos SEPs, capaz de fornecer a potência necessária as cargas, com o mínimo de variações em tensão e frequência (KUNDUR, 1994).

Nesta seção será demonstrado como modificar o algoritmo de *Newton-Raphson*, incluindo o *tap* do transformador em fase para controle de fluxo de potência reativa, enquanto o controle de potência ativa será caracterizado através do ANAREDE, demonstrando como é possível simular corretamente este tipo de controle em um estudo de fluxo de potência.

#### 3.1 TAP DO TRANSFORMADOR EM FASE NO ALGORITMO DE *NEWTON-RAPHSON*

Após a definição das condições nominais de operação dos equipamentos do SEP, muitas vezes o fluxo de potência ativa e reativa é insuficiente ou até causa a violação de alguns limites pré-estabelecidos de tensão e frequência. Se tratando de níveis de tensão em estudos de fluxo de potência, o transformador em fase tem bom desempenho na regulação da tensão nas barras de um SEP, e pode ser utilizado como dispositivo regulador nestes casos.

Nos estudos de fluxo de potência utilizando o algoritmo de *Newton-Raphson*, o *tap* do transformador em fase pode ser incluído como variável nas equações do algoritmo, e a variação de sua relação de transformação através das posições dos *taps*, controla a tensão nos terminais do transformador em fase e conseqüentemente regula o fluxo de potência.

Partindo do algoritmo apresentado na Figura 6, o *tap* do transformador em fase será incluído entre as variáveis do estudo de fluxo de potência, como indica o bloco (i) da Figura 7. Utilizando a representação  $\pi$  do transformador em fase com admitâncias variáveis, ilustrado na Figura 5, o algoritmo proposto terá matriz de admitâncias em função da relação de transformação, como representado no bloco (iii) da Figura 7.

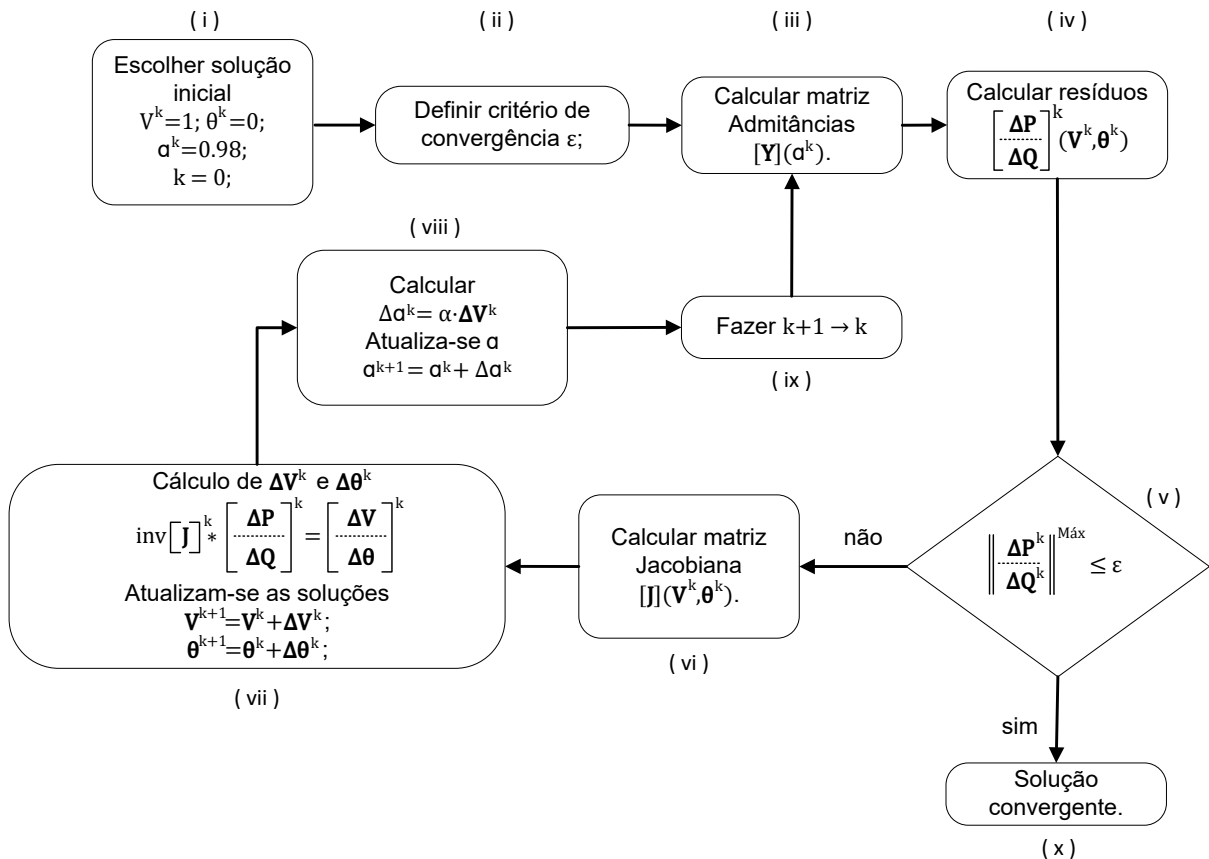


Figura 7: Fluxograma caracterizando o processo iterativo do algoritmo de fluxo de potência incluindo o *tap* do transformador em fase.

Fonte: Autoria própria.

Para a definição da matriz de admitâncias, os transformadores serão modelados conforme os parâmetros apresentados nas Equações (2), (3) e (4), e o valor da relação de transformação será atualizado a cada iteração do algoritmo modificando a matriz de admitâncias para a próxima iteração. A cada iteração do algoritmo as tensões e os ângulos serão atualizados através dos resíduos, bloco (iv) da Figura 7. No bloco (viii) da Figura 7, determina-se a correção a ser introduzida na nova variável  $a$ , utilizando-se da relação de sensibilidade

$$\Delta a^k = \alpha \cdot \Delta V^k, \quad (23)$$



onde a variação tensão  $\Delta V$  de uma barra  $m$  qualquer é definida por

$$\Delta V_m = V_m^{\text{especificado}} - V_m^{\text{calculado}}, \quad (24)$$

no qual  $\alpha$  atua como um ganho proporcional local. Esse ganho pode ser determinado empiricamente, baseando-se nos estados anteriores do sistema, e deve ser definido de modo que não deixe o processo de convergência lento e nem o leve para divergência. Por outro lado,  $\alpha$  pode ser computado através da análise de sensibilidade entre a variável de controle e a grandeza controlada. Geralmente, em transformadores situados em sistemas radiais o valor de  $\alpha$  é -1 ou 1, quando deseja-se controlar a barra oposta aos *taps*  $\alpha = -1$ , do contrário  $\alpha = 1$ . Em termos práticos, no final do processo iterativo, o *tap* é arredondado para o valor mais próximo disponível no transformador real (GÓMEZ-EXPÓSITO *et al.*, 2018).

Como pode ser observado, o cálculo do valor do *tap* é um método de controle simplificado e eficaz para controlar as tensões nos terminais do transformador em fase, e o fluxo de potência reativa em um SEP. Portanto, observa-se que modificações nas equações de fluxo de potência possibilitam manter as condições de operação dentro dos limites especificados em um SEP.

## 3.2 CONTROLE DE FLUXO DE POTÊNCIA PELOS TRANSFORMADORES EM FASE E DEFASADOR

Este trabalho tem como foco obter uma representação computacional de um SEP com transformadores em fase utilizando o MATLAB®, e utilizar o ANAREDE para caracterizar o controle de fluxo de potência ativa pelo transformador defasador e, também, validar os resultados obtidos com o algoritmo desenvolvido.

### 3.2.1 CONTROLE DO FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA PELO TRANSFORMADOR DEFASADOR

Quando há necessidade de controles sobre o fluxo de potência ativa e frequência, um dos dispositivos capazes de atuar regulando estas grandezas é o transformador defasador. Para caracterizar o controle de fluxo de potência ativa, a ferramenta escolhida para análise foi o ANAREDE, um programa desenvolvido pela Cepel e que tem respaldo no mercado brasileiro se tratando de análises de SEPs.

A implementação de um algoritmo para o controle do fluxo de potência ativa é mais complexa que o controle de fluxo de potência reativa, por isso, o ANA-

REDE será utilizado para caracterizar o controle de fluxo de potência ativa feito pelo transformador defasador. Para a correta simulação do SEP no ANAREDE, primeiramente deve-se criar as barras do sistema utilizando a ferramenta "Inserir ou Desenhar Elemento". Utilizando esta ferramenta, pode-se incluir também os outros elementos do SEP, como linha CA, transformadores, geradores e cargas. Após inseridos os elementos na área de trabalho do ANAREDE e conectá-los, utilizando a ferramenta "Informações do Elemento", são definidos os parâmetros de cada elemento. Clicando sobre uma barra qualquer inserida na área de trabalho do ANAREDE, a janela "Dados de Barra CA (DBAR)" irá abrir, Figura 8, e nela serão definidos o número da barra e o seu tipo, PQ, PV ou Referência.

Figura 8: Janela "DBAR" para inserção de dados das barras no ANAREDE <sup>1</sup>.

Após definidas as classificações das barras, clicando sobre um transformador ou linha de transmissão inserida na área de trabalho do ANAREDE, a janela "Dados de Circuito CA (DLIN)", aparecerá e nela serão definidos os parâmetros como resistência, reatância e susceptância dos elementos, como mostra a Figura 9.

<sup>1</sup> Versão 11.03.01 licensed to UTFPR - PATO BRANCO.

Dados de Circuito CA (DLIN) X

Circuito

Barra De: 3 Nome: Barra C  Ligado

Barra Para: 6 Nome: Geração2  Ligado

Número: 36  Circuitos existentes

---

Barra Proprietária

De  Para

Barra Controlada

Direção De  Direção Para

Ligado

Capacidade

Normal: 9999 MVA

Emergência: 9999 MVA

Equipamento: 9999 MVA

Resistência: 1. %

Reatância: 5. %

Susceptância: 2. Mvar

Tap

Especificado:

Mínimo:

Máximo:

Defasamento:  graus

Steps:

Controle Congelado

---

Agregadores

---

Tensão Barra  p.u. 🔍

Tensão Especificada

Shunt Equivalente

Injeção De:  Mvar

Injeção Para:  Mvar

Shunt Individualizado (DBSH)

Injeção De: 0 Mvar 🔍

Injeção Para: 0 Mvar 🔍

**Figura 9: Janela "DLIN" para inclusão de dados de linhas de transmissão e transformadores no ANAREDE<sup>1</sup>.**

Em uma barra PQ define-se a carga ativa e reativa, e calcula-se a tensão e seu ângulo. Enquanto que para uma barra PV, são definidas a geração de potência ativa e a tensão, e calcula-se a potência reativa líquida e o ângulo da barra. Na barra de referência, são definidos a tensão e o ângulo, e as potências ativa e reativas líquidas serão calculadas. No ajuste dos transformadores é necessário definir a resistência e a reatância em porcentagem, e especificar o ajuste do *tap* em p.u., valores máximo e mínimo, e quantas posições possíveis para o ajuste.

Para o ajuste do transformador defasador define-se o *tap* como constante e seu ângulo de defasagem inicial, em seguida especificam-se os dados complementares do elemento. Após adicionar o transformador defasador e especificar o ângulo inicial na janela DLIN, segue-se para a janela DCTR, como apresenta a Figura 10. Na janela DCTR, Figura 11, são especificadas a defasagem máxima e mínima, e qual controle ele utilizará: fixo, controle de corrente, ou controle de potência ativa.

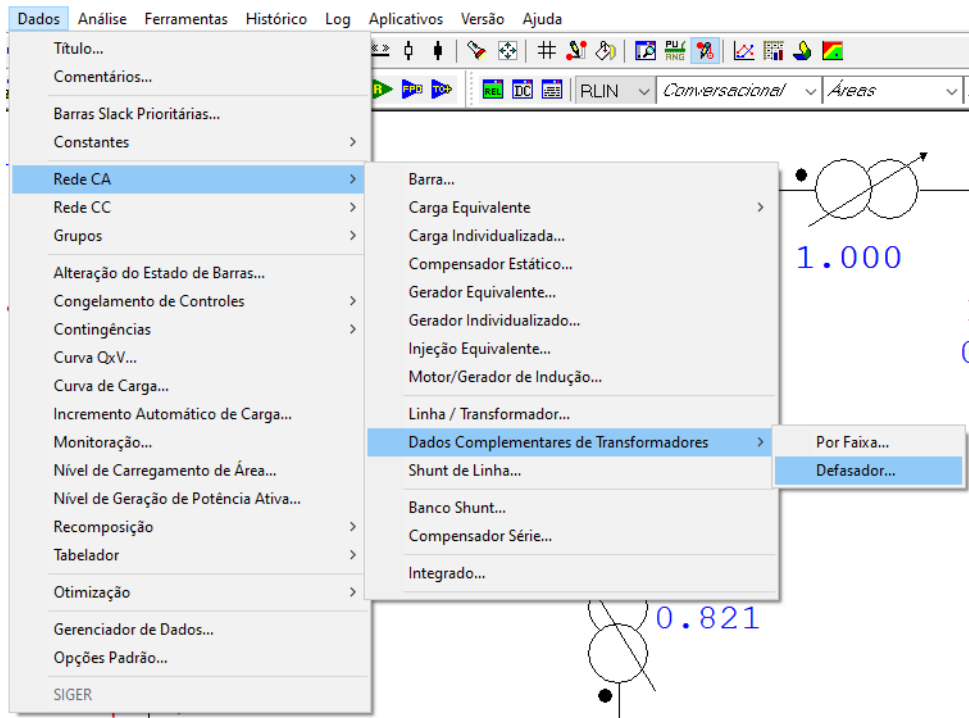


Figura 10: Caminho para a janela "DCTR" para inclusão de dados do transformador defasador no ANAREDE <sup>1</sup>.

Para fins deste trabalho, foi escolhido o controle de potência ativa, e uma defasagem máxima inserida pelo defasador de 30 graus, como apresenta a Figura 11.

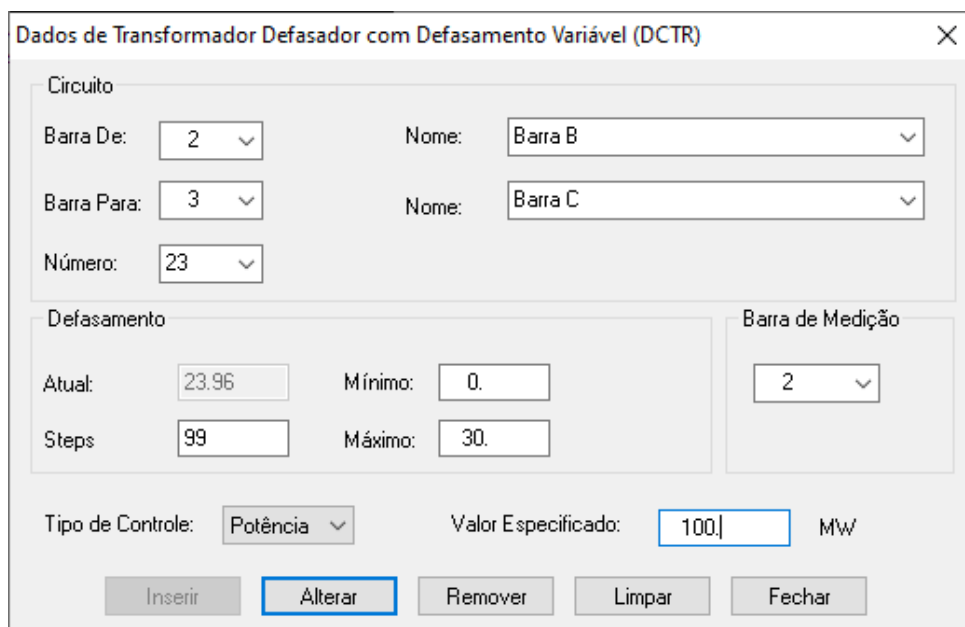


Figura 11: Janela "DCTR" para inclusão de dados do transformador defasador no ANAREDE <sup>1</sup>.

Após definir os parâmetros do sistema, é necessário resolver o fluxo de potência (Ctrl + R) e marcar a opção para ativar o controle de defasadores (CPHS), para que o defasador possa ajustar o ângulo de defasagem automaticamente, como exemplifica a Figura 12.

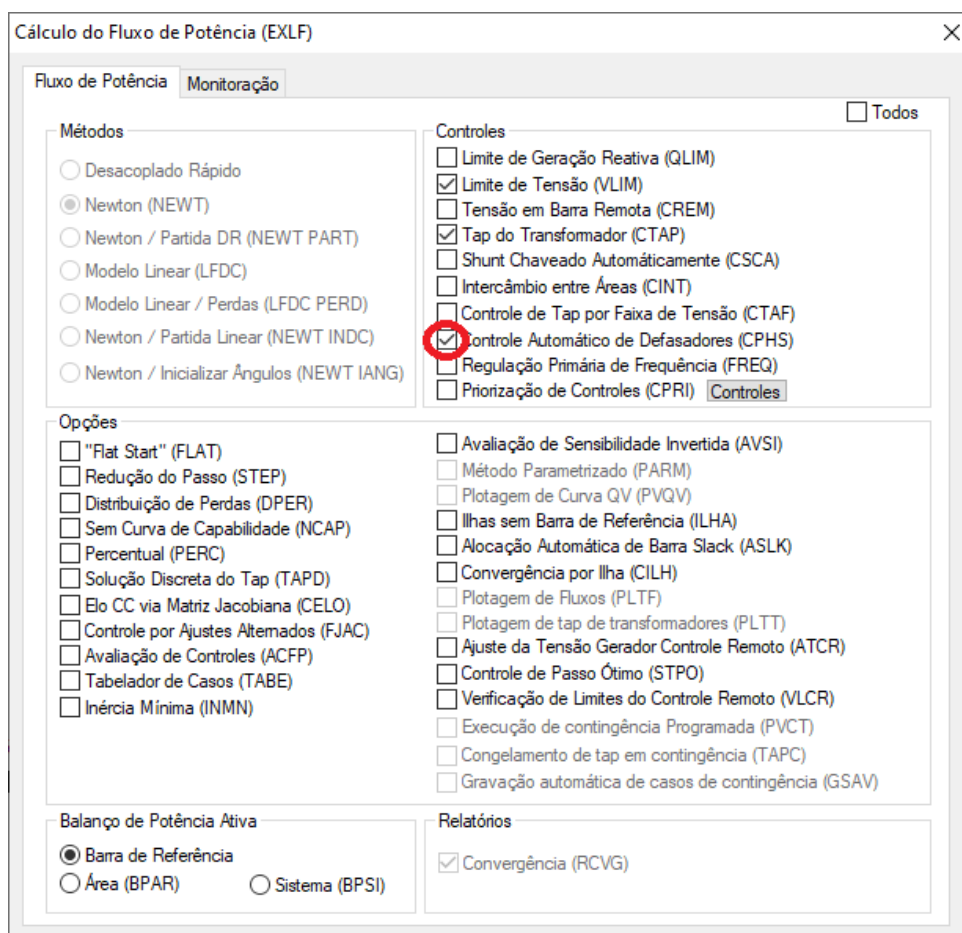


Figura 12: Janela "EXLF" para inclusão do controle de transformadores em fase e defasador no ANAREDE<sup>1</sup>.

### 3.2.2 CONTROLE DE TENSÃO PELO TRANSFORMADOR EM FASE

Para fazer análises que envolvem controle de tensão, pode-se incluir o transformador em fase para caracterizar esses tipos de controles no ANAREDE. Para inserir as barras, linhas CA e transformadores em fase do SEP deve-se utilizar a ferramenta "Inserir ou Desenhar Elemento" e posicionar os elementos na área de trabalho do ANAREDE e em seguida conectá-los, definindo a topologia do SEP analisado. Utilizando a ferramenta "Informações do Elemento", é possível parametrizar cada elemento adicionado. No entanto, o transformador em fase precisa de informações adicionais para ser modelado corretamente. Clicando sobre cada elemento, a janela "Dados do Circuito CA (DLIN)" aparecerá, e além da parametrização da resistência, reatância

e susceptância, deverão ser preenchidos os dados referentes ao *tap* do transformador, a posição especificada, o *tap* mínimo e máximo em p.u. e o número de possíveis ajustes (*steps*), como exemplifica a Figura 13.

Figura 13: Janela DLIN para parametrização do transformador em fase no ANAREDE <sup>1</sup> .

Na janela "DLIN", Figura 13, após inserir os parâmetros corretamente para o transformador em fase, deve-se definir qual barra terá a tensão controlada pela comutação dos *taps* e o qual será o módulo da tensão especificado para o ajuste.

Contudo, para simular o fluxo de potência juntamente com o controle de tensão pela comutação automática de *taps* dos transformadores em fase, no momento da simulação do fluxo de potência, é necessário marcar a opção "Tap do Transformador" (CTAP), como é exibido na Figura 14.

Cálculo do Fluxo de Potência (EXLF) ×

Fluxo de Potência Monitoração  Todos

<p><b>Métodos</b></p> <p><input type="radio"/> Desacoplado Rápido</p> <p><input checked="" type="radio"/> Newton (NEWT)</p> <p><input type="radio"/> Newton / Partida DR (NEWT PART)</p> <p><input type="radio"/> Modelo Linear (LFDC)</p> <p><input type="radio"/> Modelo Linear / Perdas (LFDC PERD)</p> <p><input type="radio"/> Newton / Partida Linear (NEWT INDC)</p> <p><input type="radio"/> Newton / Inicializar Ângulos (NEWT IANG)</p>	<p><b>Controles</b></p> <p><input type="checkbox"/> Limite de Geração Reativa (QLIM)</p> <p><input type="checkbox"/> Limite de Tensão (VLIM)</p> <p><input type="checkbox"/> Tensão em Barra Remota (CREM)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Tap do Transformador (CTAP)</p> <p><input type="checkbox"/> Shunt Chaveado Automaticamente (CSCA)</p> <p><input type="checkbox"/> Intercâmbio entre Áreas (CINT)</p> <p><input type="checkbox"/> Controle de Tap por Faixa de Tensão (CTAF)</p> <p><input type="checkbox"/> Controle Automático de Defasadores (CPHS)</p> <p><input type="checkbox"/> Regulação Primária de Frequência (FREQ)</p> <p><input type="checkbox"/> Priorização de Controles (CPRI) <span style="float: right;">Controles</span></p>
<p><b>Opções</b></p> <p><input type="checkbox"/> "Flat Start" (FLAT)</p> <p><input type="checkbox"/> Redução do Passo (STEP)</p> <p><input type="checkbox"/> Distribuição de Perdas (DPER)</p> <p><input type="checkbox"/> Sem Curva de Capacidade (NCAP)</p> <p><input type="checkbox"/> Percentual (PERC)</p> <p><input type="checkbox"/> Solução Discreta do Tap (TAPD)</p> <p><input type="checkbox"/> Elo CC via Matriz Jacobiana (CELO)</p> <p><input type="checkbox"/> Controle por Ajustes Alternados (FJAC)</p> <p><input type="checkbox"/> Avaliação de Controles (ACFP)</p> <p><input type="checkbox"/> Tabelador de Casos (TABE)</p> <p><input type="checkbox"/> Inércia Mínima (INMN)</p>	<p><input type="checkbox"/> Avaliação de Sensibilidade Invertida (AVSI)</p> <p><input type="checkbox"/> Método Parametrizado (PARM)</p> <p><input type="checkbox"/> Plotagem de Curva QV (PVQV)</p> <p><input type="checkbox"/> Ilhas sem Barra de Referência (ILHA)</p> <p><input type="checkbox"/> Alocação Automática de Barra Slack (ASLK)</p> <p><input type="checkbox"/> Convergência por Ilha (CILH)</p> <p><input type="checkbox"/> Plotagem de Fluxos (PLTF)</p> <p><input type="checkbox"/> Plotagem de tap de transformadores (PLTT)</p> <p><input type="checkbox"/> Ajuste da Tensão Gerador Controle Remoto (ATCR)</p> <p><input type="checkbox"/> Controle de Passo Ótimo (STPO)</p> <p><input type="checkbox"/> Verificação de Limites do Controle Remoto (VLCR)</p> <p><input type="checkbox"/> Execução de contingência Programada (PVCT)</p> <p><input type="checkbox"/> Congelamento de tap em contingência (TAPC)</p> <p><input type="checkbox"/> Gravação automática de casos de contingência (GSAV)</p>
<p><b>Balanco de Potência Ativa</b></p> <p><input checked="" type="radio"/> Barra de Referência</p> <p><input type="radio"/> Área (BPAR)    <input type="radio"/> Sistema (BPSI)</p>	<p><b>Relatórios</b></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Convergência (RCVG)</p>

Figura 14: Janela EXLF para simulação do fluxo de potência utilizando o controle automático de taps dos transformadores em fase no ANAREDE <sup>1</sup>.

## 4 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DE FLUXO DE POTÊNCIA E ANÁLISE DO SEP

Neste capítulo será modelado no ANAREDE um SEP proposto pela referência (PETERSON; MEYER, 1971), onde serão analisados os fluxos de potência nesse sistema de seis barras sem nenhum controle, modelando os transformadores como linhas de transmissão. Em seguida, será simulado o mesmo sistema utilizando controles de tensão por transformadores em fase com comutação automática de *taps*. Posteriormente, será introduzido no SEP proposto o transformador defasador para controle da potência ativa.

Finalmente, após obter os dados de simulação para o SEP proposto por meio do ANAREDE, será implementado o mesmo SEP no MATLAB com a inclusão do controle de tensão feito pelo transformador em fase no algoritmo de fluxo de potência, e serão comparados os resultados obtidos com o algoritmo desenvolvido com os resultados obtidos através ANAREDE utilizando o controle de tensão pelo transformador em fase.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SEP PROPOSTO

O SEP proposto a ser analisado, exemplificado na Figura 15, é composto por seis barras, das quais, quatro são barras de carga e duas são barras de geração, três transformadores e dois geradores. As barras 1 e 6 foram definidas como barras de geração e as demais barras como barras de carga. As linhas de transmissão foram conectadas entre as barras, como demonstrado na Figura 15, estabelecendo a topologia primária do SEP. Os transformadores foram conectados entre as barras 4 e 2, 5 e 3, e 2 e 3, definindo a topologia final na qual o SEP proposto será analisado, de acordo com (PETERSON; MEYER, 1971).

A partir da topologia apresentada na Figura 15, as barras 2, 3, 4 e 5 foram definidas como barras tipo PQ, enquanto a barra 1 foi definida como PV, e, consequentemente a barra 6 é a referência angular (*slack*) do SEP proposto.



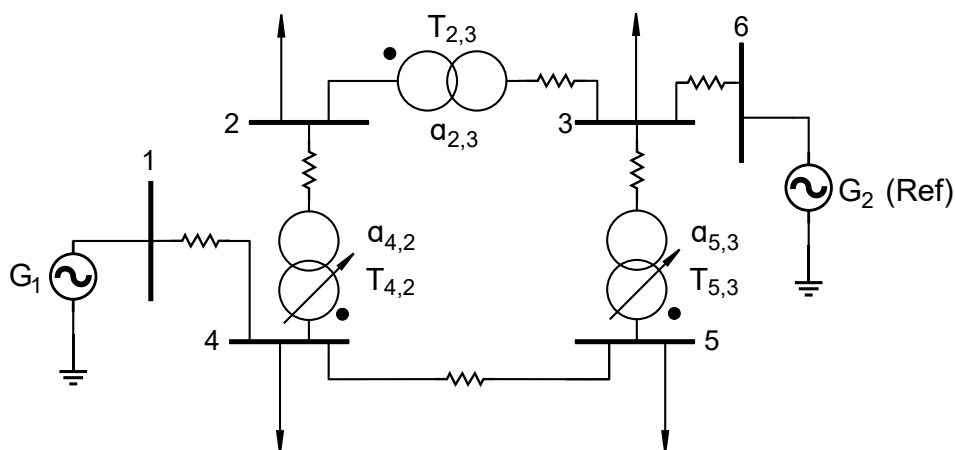


Figura 15: SEP proposto para análise computacional.

Na Tabela 1 são descritas as interligações entre as barras do SEP proposto, assim como as resistências, reatâncias e susceptâncias *shunt* das linhas de transmissão e dos transformadores do SEP, são especificados também os *taps* iniciais dos transformadores em fase e a defasagem angular inicial do transformador defasador.

Tabela 1: Dados de linha do SEP proposto

Barra Origem	Barra Destino	Resistência [p.u.]	Reatância [p.u.]	<i>Shunt</i> [p.u.]	<i>Tap</i> [p.u.]	Defasagem Angular [graus]
1	4	0,010	0,070	0,020	0,00	0,000
4	5	0,010	0,137	0,020	0,00	0,000
3	6	0,010	0,050	0,020	0,00	0,000
4	2	0,007	0,115	0,000	1,02	0,000
2	3	0,008	0,132	0,000	1,00	0,050
5	3	0,008	0,132	0,000	1,00	0,000

Na Tabela 2 são definidos o tipo de cada barramento e seus parâmetros iniciais, como tensão, ângulo e potência ativa e reativa líquida. Os dados apresentados para o SEP a ser analisado na Tabela 1 e 2 foram obtidos considerando valores próximos a um SEP real, baseados na literatura de análises de SEPs, considerando uma potência base de 100 MVA.

Tabela 2: Dados de barra do SEP proposto

Barra	Tipo	Tensão [p.u.]	Ângulo [graus]	Potência Ativa Gerada [p.u.]	Potência Reativa Gerada [p.u.]	Potência Ativa Consumida [p.u.]	Potência Reativa Consumida [p.u.]
1	PV	1,000	0,000	1,709	0,000	0,000	0,000
2	PQ	1,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,750
3	PQ	1,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,500
4	PQ	1,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,500
5	PQ	1,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,250
6	Ref.	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Partindo da topologia apresentada na Figura 15, foram inseridos os elementos do SEP proposto para análise na área de trabalho do ANAREDE, e foram utilizados os valores apresentados na Tabela 1 e 2 como o ponto de partida para executar a simulação do fluxo de potência. O SEP proposto simulado no ANAREDE pode ser observado na Figura 16.

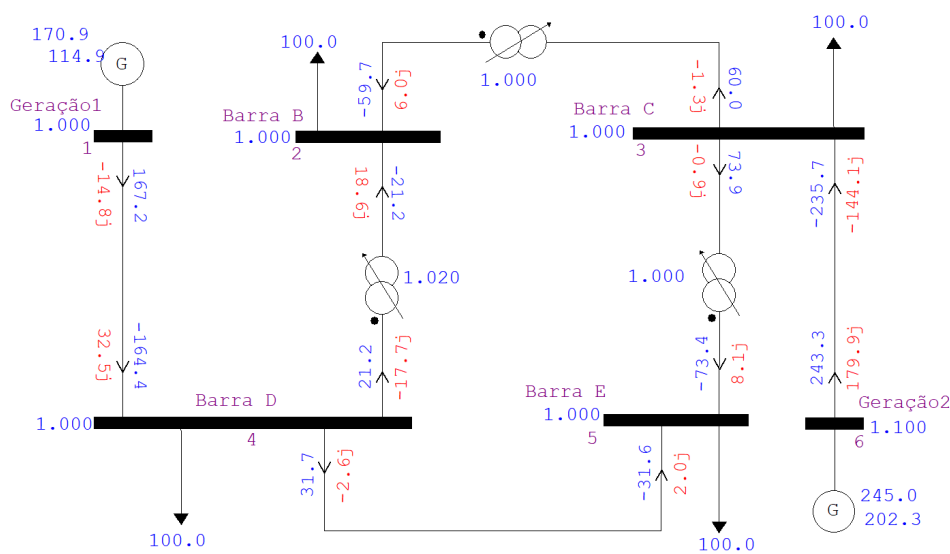


Figura 16: SEP proposto simulado no software ANAREDE <sup>1</sup>.  
Fonte: Autoria própria.

Após a simulação sem nenhum controle no ANAREDE, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

<sup>1</sup>Fonte: ANAREDE Versão 11.03.01 licensed to UTFPR - PATO BRANCO.

**Tabela 3: Resultados do fluxo de potência do SEP proposto simulado no ANAREDE.**

Barra	Tipo	Tensão [p.u.]	Ângulo [graus]	Potência Ativa Gerada [p.u.]	Potência Reativa Gerada [p.u.]	Potência Ativa Consumida [p.u.]	Potência Reativa Consumida [p.u.]
1	PV	1,000	-0,920	1,709	0,839	0,000	0,000
2	PQ	0,890	-11,00	0,000	0,000	1,000	0,750
3	PQ	0,990	-5,300	0,000	0,000	1,000	0,500
4	PQ	0,930	-7,800	0,000	0,000	1,000	0,500
5	PQ	0,936	-11,00	0,000	0,000	1,000	0,250
6	Ref.	1,100	0,000	2,425	2,025	0,000	0,000

#### 4.2 SIMULAÇÃO DO SEP PROPOSTO COM CONTROLE DE TENSÃO NO ANAREDE

Tomando como base os resultados do fluxo de potência, contidos na Tabela 3, do SEP proposto sem a atuação dos controles, observou-se problemas de sub-tensões em algumas barras do sistema. Portanto, os transformadores em fase entre as barras 4 e 2 e entre as barras 5 e 3, serão utilizados para regular as tensões destas barras para valores próximos a 1 p.u. Considerando que a barra 2 apresentou a menor tensão após o fluxo de potência, ela terá sua tensão controlada pelo transformador em fase entre a barra 4 e 2. A Figura 17 mostra a janela "DLIN" do transformador  $T_{4,2}$  com o ajuste de controle para a barra 2.

**Dados de Circuito CA (DLIN)**

**Circuito**

Barra De: 4 Nome: Barra D  Ligado

Barra Para: 2 Nome: Barra B  Ligado

Número: 24  Circuitos existentes

**Barra Proprietária**

De

Para

**Barra Controlada**

2

Direção De

Direção Para

Ligado

**Capacidade**

Normal: 9999 MVA

Emergência: 9999 MVA

Equipamento: 9999 MVA

Resistência: .7 %

Reatância: 11.5 %

Susceptância: Mvar

**Tap**

Especificado: 1.02

Mínimo: .6

Máximo: 1.4

Defasamento: graus

Steps: 9

Controle Congelado

**Agregadores**

**Tensão Barra**

1000 p.u.

**Tensão Especificada**

1000

**Shunt Equivalente**

Injeção De: Mvar

Injeção Para: Mvar

**Shunt Individualizado (DBSH)**

Injeção De: Mvar

Injeção Para: Mvar

Inserir Alterar Remover Limpar Fechar

Figura 17: Janela "DLIN" do transformador em fase entre as barras 4 e 2 no ANAREDE <sup>1</sup>.

O transformador em fase entre as barras 5 e 3 foi designado para o controle de tensão da barra 5, tendo em vista que é uma barra que está eletricamente longe das barras de geração e apresentou uma das menores tensões após o fluxo de potência. A Figura 18 mostra a janela "DLIN" do transformador  $T_{5,3}$  com o ajuste de controle para a barra 5.

**Figura 18: Janela "DLIN" do transformador em fase entre as barras 5 e 3 no ANAREDE. <sup>1</sup>**

Subsequentemente após a definição dos parâmetros de controle dos transformadores em fase, para uma primeira simulação utilizando os controles no fluxo de potência, o transformador defasador foi modelado como uma linha de transmissão, não sendo utilizado o controle de potência ativa feito por ele (controle congelado).

Logo, foi simulado o fluxo de potência com os controles dos transformadores em fase habilitados pela opção "Tap dos Transformadores (CTAP)" na janela "Cálculo do Fluxo de Potência (EXLF)", exemplificado anteriormente na Figura 14, e os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 4.

**Tabela 4: Resultados do fluxo de potência do SEP proposto simulado no ANAREDE utilizando o controle de tensão pela variação do *tap* dos transformadores em fase  $T_{4,2}$  e  $T_{5,3}$ .**

Barra	Tipo	Tensão [p.u.]	Ângulo [graus]	Potência Ativa Gerada [p.u.]	Potência Reativa Gerada [p.u.]	Potência Ativa Consumida [p.u.]	Potência Reativa Consumida [p.u.]
1	PV	1,000	-1,600	1,709	1,151	0,000	0,000
2	PQ	1,000	-10,00	0,000	0,000	1,000	0,750
3	PQ	0,990	-5,400	0,000	0,000	1,000	0,500
4	PQ	0,908	-8,500	0,000	0,000	1,000	0,500
5	PQ	1,000	-11,00	0,000	0,000	1,000	0,250
6	Ref.	1,100	0,000	2,449	2,017	0,000	0,000

Os resultados das variações dos *taps* dos transformadores em fase após a simulação do fluxo de potência podem ser observados na Tabela 5.

**Tabela 5: Resultados das variações dos *taps* dos transformadores em fase  $T_{4,2}$  e  $T_{5,3}$  após o fluxo de potência do SEP proposto simulado no ANAREDE utilizando o controle de tensão**

Barra Origem	Barra Destino	Resistência [p.u.]	Reatância [p.u.]	<i>Shunt</i> [p.u.]	<i>Tap</i> [p.u.]	Defasagem Angular [graus]
1	4	0,010	0,070	0,020	0,00	0,000
4	5	0,010	0,137	0,020	0,00	0,000
3	6	0,010	0,050	0,020	0,00	0,000
4	2	0,007	0,115	0,000	0,8212	0,000
2	3	0,008	0,132	0,000	1,000	0,050
5	3	0,008	0,132	0,000	1,2090	0,000

Analisando os dados das Tabelas 4 e 5, pode ser observado que os controles de tensão dos transformadores em fase  $T_{4,2}$  e  $T_{5,3}$  foram efetivos e elevaram as tensões das barras 2 e 5 para 1 p.u. A variação dos *taps* provocou um aumento na geração de potência reativa do gerador 1 situado na barra 1, e essa potência reativa pôde ser transferida para sistema e direcionada pela variação das admitâncias dos transformadores em fase de forma a aumentar a tensão nas barras controladas. Entretanto, a tensão da barra 4 reduziu com relação ao fluxo de potência sem controles, porém para este caso não seria possível controlar efetivamente a tensão dos lados do transformador em fase, pois ele apenas deslocar a potência reativa na direção da barra escolhida para ter a tensão controlada, nesse caso a barra 2. Uma alternativa seria aumentar a tensão na barra 1, pelo controle local de geração, visto que a barra

4 está próxima eletricamente da barra de geração 1.

Portanto pode-se considerar o controle dos transformadores em fase, nesse caso, uma boa solução para esse SEP, porque as tensões das barras escolhidas para regulação atingiram a tensão desejada de 1 p.u. após a atuação dos controles, e os limites de posição dos *taps* não foram atingidos.

#### 4.3 CONTROLE DE FLUXO DE POTÊNCIA ATIVA PELO TRANSFORMADOR DEFASADOR ANAREDE

Devido a necessidade da sociedade por energia elétrica, as cargas do SEP são constantemente conectadas e desconectadas variando a demanda drasticamente durante o dia. Cada variação de potência ativa em um ponto do SEP resulta uma variação de frequência ao longo deste SEP, conseqüentemente tentando reestabelecer o equilíbrio provocado pela redução ou aumento de carga.

O transformador defasador é capaz de controlar o fluxo de potência ativa que passa através dele introduzindo uma defasagem angular entre seus terminais (primário - secundário), esse controle é um exemplo de ajuste de critério único, ou seja, uma variável controlável é ajustada de forma a manter uma outra função ou variável dependente dela em um valor específico (PETERSON; MEYER, 1971). Considerando o caso onde é necessário manter suprimento de potência ativa constante em um barramento do SEP, o transformador defasador pode ser um dispositivo regulador capaz de executar o controle de potência ativa de forma efetiva. Contudo, em casos onde a potência fornecida à barra não precisa ser necessariamente constante, outras formas de controle podem ser aplicadas mais eficientemente.

Para fins deste trabalho, as barras de carga do SEP proposto para análise em *software* são do tipo PQ, onde a potência ativa e reativa demandadas por elas são constantes. Portanto a caracterização do controle do fluxo de potência ativa foi modelada de forma a demonstrar como o deslocamento de potência ativa feita pelo transformador defasador afeta a barra controlada por ele e o restante do SEP.

Utilizando o SEP proposto com o controle dos transformadores em fase ativados, o transformador defasador teve seu controle de potência ativa habilitado no ANAREDE através da janela "Dados de Transformador Defasador com Defasamento Variável (DCTR)", como é exibido na Figura 19.

Dados de Transformador Defasador com Defasamento Variável (DCTR)

Circuito

Barra De: 2 Nome: Barra B

Barra Para: 3 Nome: Barra C

Número: 23

Defasamento

Atual: .05 Mínimo: 0.

Steps: 99 Máximo: 30.

Barra de Medição

3

Tipo de Controle: Potência Valor Especificado: 100. MW

Inserir Alterar Remover Limpar Fechar

**Figura 19: Janela "DCTR" com ajustes para controle de potência ativa do transformador defasador entre as barras 2 e 3 no ANAREDE. <sup>1</sup>**

Como pode ser observado na Figura 19, o transformador defasador controlará o fluxo de potência ativa em direção a barra 3, enquanto que o transformador em fase  $T_{4,2}$  controla a tensão na barra 2 e o transformador em fase  $T_{5,3}$  controla a tensão na barra 5. O ângulo de defasagem máxima que o transformador defasador poderá acrescentar é de 30 graus e o valor de potência especificado no controle é o mesmo da demanda de potência ativa da barra 3, 100 MW.

Os resultados do fluxo de potência obtidos com a simulação no ANAREDE utilizando o controle de tensão dos transformadores em fase e o controle de potência ativa do transformador defasador, estão exibidos na Tabela 6, e os valores dos *taps* dos transformadores em fase e da defasagem introduzida pelo transformador defasador estão mostrados na Tabela 7.



**Tabela 6: Resultados do fluxo de potência do SEP proposto simulado no ANAREDE utilizando o controle de tensão pela variação dos *taps* dos transformadores em fase  $T_{4,2}$  e  $T_{5,3}$  e o controle de fluxo de potência ativa pelo transformador defasador.**

Barra	Tipo	Tensão [p.u.]	Ângulo [graus]	Potência Ativa Gerada [p.u.]	Potência Reativa Gerada [p.u.]	Potência Ativa Consumida [p.u.]	Potência Reativa Consumida [p.u.]
1	PV	1,000	-12,00	1,709	1,270	0,000	0,000
2	PQ	1,000	-24,00	0,000	0,000	1,000	0,750
3	PQ	0,977	-5,400	0,000	0,000	1,000	0,500
4	PQ	0,900	-19,00	0,000	0,000	1,000	0,500
5	PQ	1,001	-17,00	0,000	0,000	1,000	0,250
6	Ref.	1,100	0,000	2,482	2,286	0,000	0,000

**Tabela 7: Resultados das variações dos *taps* dos transformadores em fase  $T_{4,2}$  e  $T_{5,3}$  e da variação do ângulo de defasagem do transformador defasador após o fluxo de potência do SEP proposto simulado no ANAREDE utilizando o controle de tensão e controle de fluxo de potência ativa.**

Barra Origem	Barra Destino	Resistência [p.u.]	Reatância [p.u.]	Shunt [p.u.]	Tap [p.u.]	Defasagem Angular [graus]
1	4	0,010	0,070	0,020	0,00	0,000
4	5	0,010	0,137	0,020	0,00	0,000
3	6	0,010	0,050	0,020	0,00	0,000
4	2	0,007	0,115	0,000	0,8052	0,000
2	3	0,008	0,132	0,000	1,00	17,860
5	3	0,008	0,132	0,000	1,2830	0,050

Observando os resultados da Tabela 6, é possível notar que a atuação do controle de fluxo de potência ativa feito pelo transformador defasador aumentou a diferença angular entre as barras, como era esperado, uma vez que o fluxo de potência ativa está diretamente relacionado à diferença angular entre as barras. É interessante notar que o ângulo da barra controlada (barra 3) pelo transformador defasador permaneceu o mesmo, do mesmo modo que geração de potência ativa pelos geradores ficou praticamente constante, indicando que o transformador defasador atuou de forma a deslocar o fluxo de potência ativa do SEP para a barra controlada, sem precisar que os geradores entregassem mais potência ativa ao sistema. Por outro lado, a geração de potência reativa dos geradores aumentou, indicando que houve uma maior queda de tensão ao longo do SEP, o que de fato é visto comparando as tensões da Tabela 4 com as da Tabela 6.

Os resultados da Tabela 7 apresentam as variações dos *taps* dos transformadores em fase, e a defasagem angular que o transformador defasador inseriu para controlar o fluxo de potência ativa. Pode-se observar que devido a maior queda de tensão no SEP os *taps* dos transformadores em fase variaram mais quando comparados com a variações obtidas da Tabela 5, e a defasagem que o transformador defasador acrescentou foi de 17,86 graus, correspondendo aproximadamente ao valor da nova diferença angular entre as barras 2 e 3, apresentada na Tabela 6.

#### 4.4 FLUXO DE POTÊNCIA COM O TRANSFORMADOR EM FASE PARA CONTROLE DE TENSÃO MATLAB

A modelagem do SEP proposto no MATLAB foi realizada de forma a introduzir os dados de barras em uma matriz "dbar" com seis linhas e oito colunas e os dados das linhas em uma matriz "dlins" com seis linhas e oito colunas. As informações contidas na matriz "dbar" são as mesmas apresentadas na Tabela 1, e os valores da matriz "dlins" são equivalentes aos da Tabela 2.

Utilizando as informações das matrizes "dbar" e "dlins", foram desenvolvidos *scripts* para a formação da matriz de admitâncias, dos resíduos e da matriz jacobiana do SEP.

##### 4.4.1 MODIFICAÇÃO DO ALGORITMO DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA INCLUSÃO DO *TAP* DO TRANSFORMADOR EM FASE

A matriz de admitâncias foi modelada a partir da representação  $\pi$  da sequência positiva com reatâncias *shunt* das linhas de transmissão utilizando as Equações (6) e (7) e laços do tipo *for* no *script* desenvolvido no MATLAB. As representações dos transformadores na matriz de admitâncias foram elaboradas da mesma forma, exceto que o *tap* dos transformadores em fase foi introduzido, modificando as admitâncias do transformador em fase conforme as Equações (2), (3) e (4). Essa modificação na Matriz de Admitâncias indica que a cada nova interação do algoritmo de *Newton-Raphson*, ela precisa ser recalculada com os novos valores dos *taps* dos transformadores.

Os resíduos de potência ativa e reativa foram programados no MATLAB utilizando as equações (15) e (16), respectivamente. Devido as características do SEP proposto, a barra 6, por ser a barra de referência, não teve resíduos de potência ativa ou reativa associados a ela, os resultados de potências obtidos para a barra 6

são constituídos das perdas do sistema e a potência necessária para igualar o balanço de potência ativa e reativa presente no SEP. No entanto, a barra 1, por ser do tipo PV, não tem geração de reativos especificada, conseqüentemente não possui resíduos de potência reativa e pôde gerar a quantidade de reativos necessários para igualar o balanço de potência reativa do sistema.

A modificação da matriz de admitâncias feita pelas variações dos *taps* também interfere na composição dos resíduos, uma vez que estes são obtidos a partir das Equações 11 e 12, que são funções das condutâncias e susceptâncias provenientes da matriz de admitâncias. Do mesmo modo, a Matriz Jacobiana também sofre alterações por ser composta pelas derivadas parciais das Equações 11 e 12 em relação as variáveis de interesse.

Para desenvolver o algoritmo de *Newton-Raphson* no MATLAB, primeiramente foi definido um critério de convergência de 0,000001, então como se trata de um algoritmo iterativo foi utilizado um laço *while* que é quebrado quando a condição do critério de convergência é atendida, ou seja, quando o critério de convergência é maior que o valor máximo dos resíduos, exemplificado na Equação 19.

Em seguida para modificar o algoritmo visando que o valor dos *taps* dos transformadores em fase seja atualizado a cada iteração do algoritmo, foi utilizado a relação de sensibilidade, Equação (23), e os valores desejados das tensões de referência, Equação (24). Neste trabalho escolheu-se controlar as tensões das barras 2 e 5 do SEP proposto para 1 p.u. O controle da barra 2, que está no lado oposto aos *taps* do transformador em fase  $T_{4,2}$ , o parâmetro alfa ( $\alpha$ ) da Equação (23) foi definido como -1, entretanto para o controle da barra 5, que está no mesmo lado dos *taps* do transformador em fase  $T_{5,3}$ , o parâmetro alfa ( $\alpha$ ) da Equação (23) foi definido como 1.

Após definir as relações de sensibilidades para as barras controladas, os valores dos *taps* dos transformadores são atualizados dentro do algoritmo, logo são testadas as hipóteses de convergência resultando no valor das variáveis de interesse, ou prosseguindo com o algoritmo, como é exemplificado pelo fluxograma da Figura 7.

Finalmente, após o desenvolvimento do algoritmo de fluxo de potência e elaborada a simulação do SEP proposto para análise com o controle de tensão por comutação dos *taps* dos transformadores em fase no MATLAB, os resultados podem ser observados nas Tabelas 8 e 9, e o código implementado pode ser visto no Apêndice A.

**Tabela 8: Resultados da matriz "dbar" após a simulação do fluxo de potência com o controle de tensão por transformadores em fase do SEP proposto no MATLAB.**

Barra	Tipo	Tensão [p.u.]	Ângulo [graus]	Potência Ativa Gerada [p.u.]	Potência Reativa Gerada [p.u.]	Potência Ativa Consumida [p.u.]	Potência Reativa Consumida [p.u.]
1	PV	1,000	-1,6402	1,709	1,1506	0,000	0,000
2	PQ	1,000	-10,3165	0,000	0,000	1,000	0,750
3	PQ	0,9898	-5,3839	0,000	0,000	1,000	0,500
4	PQ	0,9081	-8,4719	0,000	0,000	1,000	0,500
5	PQ	1,000	-11,4234	0,000	0,000	1,000	0,250
6	Ref.	1,100	0,000	2,4492	2,0175	0,000	0,000

**Tabela 9: Resultados da matriz "dlins" após a simulação do fluxo de potência com o controle de tensão por transformadores em fase do SEP proposto no MATLAB**

Barra Origem	Barra Destino	Resistência [p.u.]	Reatância [p.u.]	Shunt [p.u.]	Tap [p.u.]	Defasagem Angular [graus]
1	4	0,010	0,070	0,020	0,00	0,000
4	5	0,010	0,137	0,020	0,00	0,000
3	6	0,010	0,050	0,020	0,00	0,000
4	2	0,007	0,115	0,000	0,8212	0,000
2	3	0,008	0,132	0,000	1,00	0,000
5	3	0,008	0,132	0,000	1,086	0,000

Os resultados obtidos simulando o fluxo de potência do SEP proposto no MATLAB, utilizando o algoritmo desenvolvido que inclui o controle de tensão dos transformadores em fase, mostram que é possível aprimorar o algoritmo de *Newton-Raphson* para incluir os dispositivos reguladores de tensão de forma efetiva. Contudo, essa modificação aumenta o número de iterações feitas pelo algoritmo, o que para um sistema maior, demandará mais tempo para obter resultados. Por outro lado, atualmente o poder de processamento dos computadores melhora a cada ano, tornando o desenvolvimento e a implementação de algoritmos, como o deste trabalho, uma forma mais viável para desenvolver estudos complexos de SEPs.

Contrastando os resultados da Tabela 4 com os da Tabela 8, é claro que os valores obtidos com o algoritmo desenvolvido estão extremamente próximos aos valores obtidos utilizando o ANAREDE. Comparando também os resultados da Tabela 5 com os resultados da Tabela 9, observa-se mais uma vez que os valores obtidos com o algoritmo desenvolvido são os mesmos aos obtidos com ANAREDE, considerando os valores dos *taps* dos transformadores em fase do MATLAB arredondados.

Portando é correto validar o algoritmo implementado no MATLAB através dos resultados atingidos, considerando que o ANAREDE já é uma ferramenta consolidada se tratando de estudos de fluxo de potência nos SEPs.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um programa no MATLAB incluindo o transformador em fase como dispositivo regulador de tensão no algoritmo de fluxo de potência utilizando o método de *Newton-Raphson*. Um SEP de pequeno porte com transformadores em fase foi escolhido como base para esta dissertação e ele foi implementado no ANAREDE a fim de obter os resultados para a posterior validação do algoritmo desenvolvido no MATLAB simulando o mesmo SEP. Além disso, foi caracterizado o controle fluxo de potência ativa efetuado pelo transformador defasador no SEP proposto, também simulado no ANAREDE.

O SEP proposto analisado neste trabalho foi retirado da referência (PETERSON; MEYER, 1971), no entanto a abordagem de controle e os valores utilizados como parâmetros para os elementos do SEP foram baseados em referências mais atuais e em valores encontrados em SEPs reais.

Devido a grande utilização do ANAREDE nos estudos e análises de SEP em regime permanente, o *software* serviu como referência e validação dos resultados obtidos com o algoritmo implementado no MATLAB, que por sua vez foram satisfatoriamente próximos aos valores de referência, validando este trabalho. Futuramente é interessante considerar a adição dos limites de operação presentes dos componentes do SEP, como a geração máxima de reativos pelos geradores e também situações onde é usado o despacho econômico e análises incluindo transformadores operando em paralelo, bem como situações limites como manutenções e atuações das proteções.

Portanto é possível salientar que o embasamento teórico presente neste trabalho pode ser útil para outras modelagens de SEP de porte maior, e com controles mais sofisticados, como o do transformador defasador, bem como para introduzir situações onde os limites dos equipamentos presentes no SEP desempenham um papel importante na operação do sistema.

## REFERÊNCIAS

AJJARAPU, Venkataramana. **Computational techniques for voltage stability assessment and control**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.

ANEEL. AID. disponível em: <http://www.aneel.gov.br/a-aneel>, 2021.

BONE, Gorazd; PANTOŠ, Miloš; MIHALIČ, Rafael. Applying transformer limits in power flow studies using unconstrained optimizations. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 33, n. 5, p. 5805–5807, 2018.

CAI, Niannian; KHATIB, Abdel Rahman; SAENZ, Albert; BOTTYAN, Janos. Real-time automation control of a phase-shifting transformer based on mission priorities. In: IEEE. **2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)**. [S.l.], 2018. p. 1–9.

CASTRO, Nivalde de; DANTAS, Guilherme. Experiências internacionais em geração distribuída: motivações, impactos e ajustes. **Rio de Janeiro: Publit Soluções Editoriais**, p. 1–442, 2018.

COSTA, AJAS; SILVA, AS. Controle e estabilidade de sistemas elétricos de potência. **Universidade Federal de Florianópolis**, 2000.

FONSÊCA, TQ; RIBEIRO, RLA; COSTA, FB; ROCHA, TOA. Enhanced power flow control of distributed generator units by using virtual impedance scheme. **2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)**, p. 1–5, 2017.

GÓMEZ-EXPÓSITO, Antonio; CONEJO, Antonio J; CAÑIZARES, Claudio. **Electric energy systems: analysis and operation**. [S.l.]: CRC press, 2018.

KHADKIKAR, Vinod; KIRTLEY, James L. Interline photovoltaic (I-PV) power system - a novel concept of power flow control and management. In: IEEE. **2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting**. [S.l.], 2011. p. 1–6.

KUNDUR, Prabha. Power system stability and control. McGraw-Hill, Palo Alto, California, 1994.

KUNDUR, Prabha; PASERBA, John; AJJARAPU, Venkat; ANDERSSON, Goran; BOSE, Anjan; CANIZARES, Claudio; HATZIARGYRIOU, Nikos; HILL, David; STANKOVIC, Alex; TAYLOR, Carson *et al.* IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions, definition and classification of power system stability. **IEEE transactions on power systems**, v. 19, n. 2, p. 1387–1401, 2004.

MONTICELLI, Alcir José. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. [S.l.]: E. Blucher, 1983.

- PETERSON, Norris M; MEYER, W Scott. Automatic adjustment of transformer and phase-shifter taps in the newton power flow. **IEEE Transactions on power apparatus and systems**, IEEE, n. 1, p. 103–108, 1971.
- SIGA, Banco de Informações de Geração da ANEEL. Sistema de informações de geração da aneel (SIGA). disponível em: <http://bit.ly/39LK90S>, 2021.
- STAGG, Glenn; EL-ABIAD, Ahmed. **Computer Methods in Power Systems Analysis**. [S.l.]: McGraw-Hill, Kogakusha, 1968.
- STOTT, Brian. Review of load-flow calculation methods. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 62, n. 7, p. 916–929, 1974.
- VEDAM, R Sastry; SARMA, Mulukutla S. **Power quality: VAR compensation in power systems**. [S.l.]: CRC press, 2009.
- WEEDY, Birron Mathew; CORY, Brian John; JENKINS, Nick; EKANAYAKE, Janaka B; STRBAC, Goran. **Electric power systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- YANG, Jian; XU, Zheng; WANG, Weiyuan; CAI, Hui. Implementation of a novel unified power flow controller into newton-raphson load flow. In: IEEE. **2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting**. [S.l.], 2017. p. 1–5.
- ZHAN, Shi; XINZHAN, Liu; YU, Huang; YING, Wang. Real-time active power control method of regional power grid considering wind power fluctuations under cps framework. In: IEEE. **2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)**. [S.l.], 2018. p. 2979–2983.



## APÊNDICE A - ALGORITMO IMPLEMENTADO

```

1  clc; close; clear;
2
3  %      NB TipB   V    ang    Pg    Qg    PL    QL
4  dbar=[ 1  2  1.000  0.00  1.709  0.000  0.000  0.000;
5         2  3  1.000  0.00  0.000  0.000  1.000  0.750;
6         3  3  1.000  0.00  0.000  0.000  1.000  0.500;
7         4  3  1.000  0.00  0.000  0.000  1.000  0.500;
8         5  3  1.000  0.00  0.000  0.000  1.000  0.250;
9         6  1  1.100  0.00  0.000  0.000  0.000  0.000;];
10
11 %      busK   busM    r      x      bsh      Tap
12 dlins=[ 1      4      0.010      0.070      20e-3      0.000;
13         4      5      0.010      0.137      20e-3      0.000;
14         3      6      0.010      0.050      20e-3      0.000;
15         4      2      0.007      0.115      0.000      1.020;
16         2      3      0.008      0.132      0.000      1.000;
17         5      3      0.008      0.132      0.000      1.000;];
18
19 [lin, c] = size(dlins); %lin numero de conexoes
20 [NB, col] = size(dbar); %NB numero de barras
21 Tap = dlins(:,6); %valores dos taps em pu
22 ang = dbar(:,4); %angulos
23 tensao = dbar(:,3); %tensoes
24 K = dlins(:,1); %bus K controle
25 M = dlins(:,2); %bus M controlado
26
27 %% Metodo de Newton-Raphson
28 %x0=[te1 te2 te3 te4 te5 V2 V3 V4 V5]'
29 x0=[0 0 0 0 0 1 1 1 1]';
30 %valores controlados das tensoes
31 v2c=1.0; v3c=1.0; cont=1;
32 P=zeros(6,1);
33 Q=zeros(6,1);
34
35
36 while 1
37     yadm=madmitancia(dlins, lin, NB, Tap);

```

```
38     g = real(yadm); %condutancias
39     b = imag(yadm); %susceptancias
40     res=fresiduos(dbar, g, b, x0); %residuos
41
42     if norm(res,inf)<1e-6
43         break;
44     end
45
46     jacb=fjacobiano(dbar, g, b, x0); %jacobiano
47     Dx=jacb\res;
48     x0=x0+Dx; %resultados
49
50     DTap = [v2c; v3c] - [x0(6,1) ; x0(9,1)];
51     Tap(4,1)= Tap(4,1) - DTap(1,1);
52     Tap(6,1)= Tap(6,1) + DTap(2,1);
53
54     V = [dbar(1,3); x0(6:9,1) ; dbar(6,3)];
55     th = [x0(1:5); dbar(6,4)];
56     thg = th*180/pi;
57     cont=cont+1;
58 end
```