UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS DA SILVA TELES

INCORPORAÇÃO DA MODELAGEM DA REDE NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO PARA O FLUXO DE POTÊNCIA NÃO LINEAR DO PACOTE COMPUTACIONAL MATPOWER

CURITIBA

2018

MATHEUS DA SILVA TELES

IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM DA REDE NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO PARA O FLUXO DE POTÊNCIA NÃO LINEAR DO PACOTE COMPUTACIONAL MATPOWER

Projeto de Pesquisa apresentado à disciplina Relatórios Técnicos do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Elizete Maria Lourenço

CURITIBA

2018

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE QUADROS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PU	Unidade de medida para sistemas elétricos de potência
LT	Linha de Transmissão
IEEE	Instituo de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
MVA	Unidade de medida para potência aparente ou potência de base
MW	Unidade de medida para potência ativa
MVAr	Unidade de medida para potência reativa
%	Unidade de medida para percentual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência se caracteriza por ser um conjunto definido de linhas de transmissão e subestações que proporcionam a transmissão e distribuição de energia elétrica entre cidades, estados e regiões. O conhecimento acerca das condições de operação e segurança do sistema está intimamente ligado com a análise do fluxo de potência, tema de muita relevância nas diversas bibliografias existentes no cenário de sistemas de potência. Utilizado em muitas concessionárias de energia elétrica, o problema do fluxo de potência é um aspecto imprescindível para estudo do sistema elétrico como um todo, bem como para a realização de sua modelagem.

A modelagem tradicional da rede elétrica é conhecida como modelagem barra-ramo e participa da maioria dos métodos e algoritmos utilizados pelas concessionárias de energia. Nessa modelagem, os arranjos referentes às subestações são previamente conhecidos e as seções de barras são agrupadas formando uma única barra. Como consequência, são gerados problemas numéricos pela representação das impedâncias de chaves e disjuntores (denominados ramos chaveáveis). Dessa forma, todas as informações que dizem respeito às subestações não são incluídas na análise, tornando necessária a modelagem manual desse sistema. Tal processo demanda tempo dos operadores do sistema, além de se tornar dispendioso e custoso.

As extensões da formulação convencional do fluxo de potência para processar o nível de subestações já foram exploradas anteriormente em Ribeiro (2005) e se caracterizaram como base para o desenvolvimento teórico deste projeto. Partindo desse viés, as consequentes modificações internas ao método não linear de resolução do fluxo de potência, mais especificamente ao método de Newton Rapshon, às quais são abordadas em Lourenço (2017), Ribeiro (2005) e Borges Junior (2009), foram largamente exploradas para serem contempladas no desenvolvimento deste trabalho. O pacote computacional MATPOWER, desenvolvido por pesquisadores da PSERC (Power Systems Engineering Research Center) Zimmerman (2016), realiza soluções de problemas de fluxo de potência. Os resultados são obtidos de forma rápida e eficaz. Além disso, o programa é dotado de uma linguagem de programação simples e possível de ser manipulada. Concebendo a união entre o estudo do sistema elétrico de potência com o problema da sua modelagem no nível de subestação, este trabalho tornou possível a criação de uma ferramenta computacional de análise do método não linear de fluxo de potência, mais especificamente do método de Newton-Raphson, incluindo, dentro da sua modelagem, a representação dos equipamentos de uma subestação, que são chaves e disjuntores.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estudo e extensão das rotinas de fluxo de potência não linear do pacote computacional MATPOWER, de forma a torná-lo capaz de processar redes elétricas no nível de subestação, permitindo assim a representação de elementos internos a estas.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

a) Identificar as rotinas de fluxo de potência não linear do pacote computacional MATPOWER, garantindo o entendimento e domínio do seu funcionamento;
b) Realizar modificações nos algoritmos para implementar a modelagem de subestações;
    c) Obtenção e levantamento de resultados através de casos da plataforma IEEE, para sistemas de 14 Barras e 30 Barras.

1.2 JUSTIFICATIVA

A modelagem tradicional da rede elétrica é conhecida como modelagem barra-ramo e participa da maioria dos métodos e algoritmos utilizados pelas concessionárias de energia elétrica. Contudo, para simplificar a análise, os arranjos referentes às subestações são previamente processados a partir do conhecimento do status atual dos disjuntores e as seções de barra são agrupadas, formando uma única barra. Como consequência dessa simplificação, são evitados problemas numéricos que resultariam da representação das impedâncias atípicas de chaves e disjuntores (denominados ramos chaveáveis). Dessa forma, todas as informações que dizem respeito às subestações não são incluídas na análise, tornando necessária a adoção de procedimentos manuais sempre que essas informações forem requeridas pelo operador.

Assim, a modelagem barra-ramo impossibilita aos operadores do sistema elétrico de potência a obtenção de uma análise simultânea entre as condições de operação do sistema em nível barra-ramo e em nível de subestações.

Nessa perspectiva, a proposta deste trabalho de capacitar um simulador de fluxo de potência de código aberto ao processamento de redes modeladas no nível de subestações, é capaz de solucionar esse problema dentro da velocidade de processamento do *software*, que é da ordem de segundos.

Considerando o fato de o pacote computacional MATPOWER possuir uma linguagem de codificação possível de ser modificada, este projeto concebeu a união entre o estudo da modelagem do sistema elétrico no nível de subestação e a criação de uma ferramenta computacional de simulação de fluxo de potência. Portanto, existe uma importância significativa na utilização dos insumos gerados por esse trabalho dentro do ambiente das concessionárias de energia, institutos e grupos de pesquisa de sistemas elétricos de potência e, também, do próprio Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FLUXO DE POTÊNCIA

Os primeiros estudos e investigações sobre o problema de fluxo de potência em sistemas elétricos ocorreram por volta da década de 50, segundo Ribeiro (2005). Desde então, esse tema vem sendo alvo de novas contribuições por profissionais e pesquisadores em concessionárias de Energia, Universidades e Centros de pesquisa. Atualmente, essa ferramenta é repassada e ensinada nos cursos de graduação em Engenharia Elétrica, pois se trata de um tema imprescindível para o analista do sistema elétrico de potência.

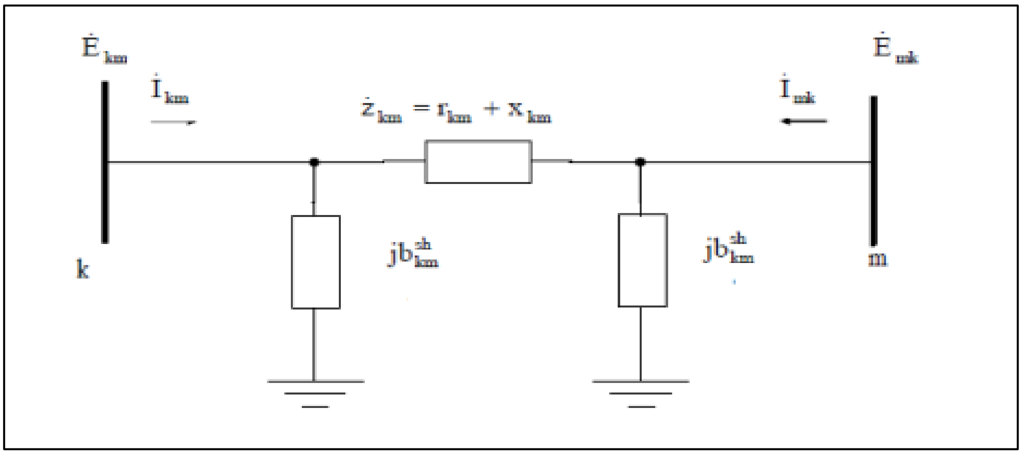
A formulação convencional de uma rede elétrica é conhecida como modelagem barra-ramo. Essa modelagem consiste no nível de barramentos e ramos, onde as subestações são representadas por barras, enquanto as linhas de transmissão e os transformadores são representados por ramos que interligam as barras do sistema.

O equacionamento e as expressões matemáticas correspondentes ao problema de fluxo de potência estão moldados nas leis de Kirchhoff. Entende-se a primeira lei para a conservação de potências ativas e reativas em cada barra do sistema, na qual a potência que entra em uma barra do sistema tem que ser equivalente à potência que sai desta mesma barra, considerando a barra como um nó em um circuito elétrico. A segunda lei de Kirchhoff diz respeito à expressão do fluxo de potência em função das tensões. Sendo assim, para poder determinar a potência que flui de uma barra do sistema para outra, através de uma linha de transmissão, torna-se necessário modelar uma linha de transmissão com elementos conhecidos em circuitos elétricos para que seja possível aplicar as leis de Kirchhoff.

2.1.1 Modelagem de uma linha de transmissão

Uma linha de transmissão tem como principal função o transporte de energia elétrica, desde uma fonte geradora até as cargas de um sistema. O modelo clássico de uma LT para o cálculo do fluxo de potência é chamado de modelo π.

Figura 01 – Modelo π de uma linha de transmissão



Fonte: Ribeiro (2005).

A partir dessa representação, deduz-se a expressão do fluxo de potência complexa de acordo com as leis de Kirchhoff, considerando a corrente que flui de uma barra k para uma barra m e a potência complexa, Skm em função da tensão e corrente Ek e Ikm.

$$Skm = Ek * Ikm^{*} \tag{1.0}$$

Substituindo Ikm em função da admitância da linha Ykm, das tensões Ek e $\dot{E}m$, além do elemento shunt da linha jb^{sh}:

$$I\dot{k}m = Y\dot{k}m\left(\dot{E}k - E\dot{m}\right) + jb^{sh}\dot{E}k$$

$$S\dot{k}m = \dot{E}k\left[Y\dot{k}m\left(\dot{E}k - E\dot{m}\right) + jb^{sh}\dot{E}k\right]^{*}$$

$$S\dot{k}m = \dot{E}k^{2}Y\dot{k}m^{*} - Y\dot{k}m^{*}\,\dot{E}k\,E\dot{m}^{*} - jb^{sh}\dot{E}k^{2}$$

Utilizando a relação dos fasores de tensão Ek e Em nas barras do sistema e o conceito de admitância complexa para Ykm:

$$\dot{E}k = Vk\,e^{j\theta k}$$

$$E\dot{m} = Vm\,e^{j\theta m}$$

$$Y\dot{k}m = gkm + jbkm$$

$$Skm = Vk^{2}gkm - VkVm\cos\theta km\,gkm - VkVmsen\theta kmbkm - jVk^{2}\left(bkm + bkm^{sh}\right) + jVkVm\,cos\theta km\,bkm - jVkVm\,sen\theta km\,gkm$$

A potência complexa, por sua vez, pode ser representada através da equação retangular. $S = P + jQ$. Logo, os fluxos de potência ativa e reativa numa linha de transmissão podem ser descritos a partir das seguintes expressões, de acordo com Ribeiro (2005) e Monticelli (2003):

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m \cos\theta_{km} g_{km} - V_k V_m \sin\theta_{km} b_{km} \tag{1.1}$$

$$Q_{km} = -V_k^2\left(b_{km} + b_{km}^{sh}\right) + V_k V_m \cos\theta_{km} b_{km} - V_k V_m \sin\theta_{km} g_{km} \tag{1.2}$$

2.1.1.1 Cálculo das perdas na linha de transmissão

As perdas de uma linha de transmissão são calculadas de forma generalizada a partir da soma de duas parcelas: O fluxo de potência que sai da barra k em direção à barra m e o fluxo de potência que sai da barra m em direção à barra k. Desse modo, a soma dessas parcelas, que idealmente deveriam ser iguais, configura as perdas em uma linha de transmissão. Representando em equações, conforme Borges Junior (2009):

PERDAS ATIVAS = Pkm + Pmk.

PERDAS REATIVAS = Qkm + Qmk.

CASO 1: Qkm > 0 e Qmk > 0 = A LT “exige” potência reativa (indutiva) do sistema.

CASO 2: Qkm < 0 e Qmk < 0 = A LT “fornece” potência reativa (capacitiva) para o sistema.

Para a situação ideal, em que não existe perda ativa na linha considerada, os fluxos de potência Pmk e Pkm se igualam. Para essa situação não existe resistência na linha de transmissão, portanto o parâmetro $G_{km} = 0$ e a potência ativa transmitida passa a ser definida por:

$$Pkm = \frac{Vk\,Vm}{Xkm}\, sen\,(\theta\mathrm{k} - \theta\mathrm{m}) \tag{1.3}$$

2.1.2 Modelagem barra-ramo

A formulação convencional do fluxo de potência contém a modelagem da rede elétrica no nível de barramentos e ramos, mais conhecidos como modelagem barra-ramo. As subestações, por sua vez, são representadas por barras ou nós e os transformadores são representados por linhas ou ramos que interligam estas barras.

As equações básicas do fluxo de carga são encontradas a partir da conservação de potências ativa e reativa em cada nó da rede, ou até mesmo barra do sistema. Sendo assim, a potência líquida injetada em cada nó da rede deve ser a soma das potências que fluem pelos componentes internos que possuam este nó como um de seus terminais. Isto é, aplicar o equivalente teórico da aplicação da primeira lei de Kirchhoff para análise de circuitos elétricos. A segunda lei de Kirchhoff é então utilizada para expressar os fluxos de potência em função das tensões de estado em seus terminais.

Na formulação simplificada do problema de fluxo de potência, chamada formulação básica, para cada barra da rede elétrica são associadas quatro variáveis. Destas variávies, duas entram como dados e duas entram como incógnitas. As variáveis são:

- Vk – magnitude da tensão na barra k;
- Θk – ângulo da tensão na barra k;
- Pk – geração líquida de potência ativa na barra k;
- Qk – injeção liquida de potência reativa na barra k.

Desse modo, é possível definir três tipos de barras, que são comumente utilizados na formulação básica, mais especificamente na análise dos métodos de resolução do fluxo de potência não linear:

- PQ - barras de carga;
- PV - barras de geração;
- Vθ - barras de referência.

Esses tipos de barra são os mais importantes e mais frequentes, de acordo com Lourenço (2017) e Borges Junior (2009).

Tabela 01 – Tipos de barras da modelagem barra-ramo

TIPO DE BARRA	ESPECIFICADO	CALCULADO	DESCRIÇÃO
PQ	Pk e Qk	Vk e θk	Barra de Carga
PV	Pk e Vk	Qk e θk	Barra de Geração
Vθ	Vk e θk	Pk e Qk	Referência

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em alguns casos específicos, existem barras como PQV, onde são especificadas tanto as potências ativa e reativa quanto a tensão da barra. Além de barras P e V, onde são especificadas apenas a potência ativa e a tensão na barra, separadamente. Porém, para esses casos, não é considerada a formulação convencional de resolução do problema de fluxo de potência, bem como na modelagem de subestações que é a formulação principal deste trabalho.

Desse modo, são apresentadas duas equações para cada barra, e, a partir dos valores especificados, calculam-se as incógnitas do sistema de equações. Os transformadores e linhas de transmissão são incluídos, por sua vez, dentro dos ramos nessa modelagem. A representação matemática da aplicação da primeira lei de Kirchhoff para o problema de fluxo de potência é vista como se segue:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(\theta_k, \theta_m, V_k, V_m) \tag{2.1}$$

$$Q_k = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(\theta_k, \theta_m, V_k, V_m) \tag{2.2}$$

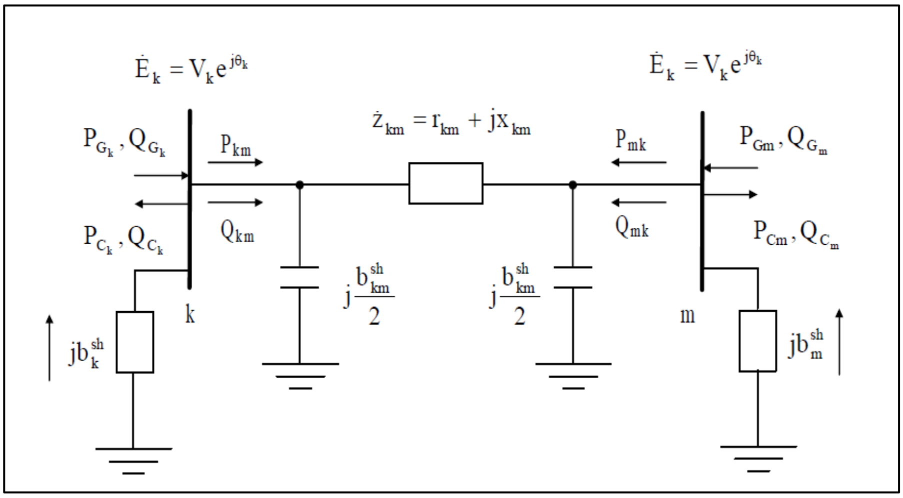
Desse modo, Pkm e Qkm representam os fluxos de potência ativa e reativa que interligam o ramo k-m.

2.1.3 Fluxo de potência não linear

A formulação não linear do problema de fluxo de carga inclui a parte reativa do sistema e leva em consideração as perdas de potência ativa nas linhas de transmissão, restrições operacionais de tensão nas barras e as limitações de geração de potência reativa.

Sendo assim, a figura 02 representa um SEP de duas barras onde estão indicadas as variáveis envolvidas no problema de fluxo de potência.

Figura 02 – Representação de duas barras com variáveis envolvidas



Fonte: Borges Junior (2009).

As equações de fluxo de potência em uma linha de transmissão demonstradas na seção 2.2 resultam na representação das equações de injeção de potência ativa e reativa em uma barra qualquer. São estas as seguintes equações, de acordo com Ribeiro, 2005,:

$$P_k^{calc} = V_k \{\sum_{m \varepsilon K} [V_m (G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} \operatorname{sen}\theta_{km})]\} \tag{2.3}$$

$$Q_k^{calc} = V_k \{\sum_{m \varepsilon K} [V_m (G_{km} \operatorname{sen}\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km})]\} \tag{2.4}$$

Com base na figura 02, define-se P_G e Q_G como representação das potências ativa e reativa geradas nas barras. Além disso, P_C e Q_C como representação das potências ativa e reativa consumida nas barras. Por fim, para representação do fluxo de potência nas linhas, P_{km} representa o fluxo de potência ativa da barra k para barra m e Q_{km}o fluxo de potência reativa da barra k para barra m.

Verifica-se novamente na figura 02 que cada barra está associada a 6 variáveis V, θ, P_C, Q_C, P_G, Q_G. Dentre estas variáveis, são conhecidas as informações referentes às potências ativa e reativa consumidas em cada barra, P_C e Q_C. Para que se torne possível a resolução do problema com as equações 1.3 e 1.4, é necessário que sejam especificadas 2 variáives, pois existem 4 variáveis sobrando. Somente assim será possível aplicar as duas equações para obtenção das duas incógnitas faltantes do problema.

Em função da síntese anterior, definem-se os tipos de barra do sistema. Em cada tipo de barra, 2 variáives são especificadas e as outras duas, portanto, calculadas.

Barras do tipo PQ – São barras nas quais as potências P_G e Q_G são especificadas e o módulo e ângulo de tensão V e θ da barra são calculados consequentemente.

Barras do tipo PV – São barras nas quais a potência P_G e a tensão V da barra são especificadas, sendo então calculados o ângulo θ e a potência reativa Q_G da barra.

Barras do tipo Vθ – São as chamadas barras de referência, nas quais o módulo e o ângulo de tensão são especificados e as potências P_G e Q_G da barra são calculadas, consequentemente.

2.1.4 Modelagem do gerador e carga

Em problemas de cálculo de fluxo de potência, são especificadas as tensões e potência ativa, juntamente com os limites máximos e mínimos estabelecidos para operação no caso de um gerador. Desse modo, são calculadas as injeções de potência reativa.

A carga é difícil de ser representada para a modelagem convencional de fluxo de potência e, desse modo, é representada apenas como uma injeção de potência ativa ou reativa, na barra estudada.

Diante desse cenário, o conceito de injeção de potência líquida surge como o balanço entre a geração e a carga em uma barra. Desse modo, uma injeção de potência líquida positiva significa que a geração é maior do que a carga para a barra adotada. Uma injeção de potência líquida negativa, por sua vez, demonstra que a carga é maior que a geração na barra adotada e, portanto, se trata de uma barra de carga. Além disso, a injeção de potência líquida ainda pode ser nula, quando não há nenhuma geração e nem carga conectadas na barra.

2.2 REDE ELÉTRICA E FLUXO DE POTÊNCIA NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

A modelagem da rede elétrica no nível de subestação implica na representação explícita de chaves e disjuntores. Porém esses elementos se diferem dos demais ramos da rede, pois eles representam situações em que a impedância pode ser nula ou infinita.

A modelagem barra-ramo exigiria valores de impedância muito elevados ou muito baixos para representar esses ramos chaveáveis. Nesse caso, a geração de problemas numéricos decorrentes destes valores impossibilita a representação de chaves e disjuntores na modelagem referida.

Como frente de contribuição a essa problemática, a extensão da formulação convencional de fluxo de potência defendida em Ribeiro (2005) possibilita o processamento de sistemas modelados no nível de seção de barras (nível de subestação), da mesma forma que evita problemas numéricos que seriam gerados pela representação explícita da impedância dos elementos chaveáveis. Esta resolução se baseia na modelagem de ramos de impedância nula na estimação de estados em Lourenço (2001) e Lourenço (2004). A primeira modificação proposta em Ribeiro (2005), a ser introduzida na formulação simplificada (ou básica) de resolução do fluxo de carga, foi considerar os fluxos de potência ativa e reativa nos elementos internos à subestação como novas variáveis de estado, somando-se às variáveis de estado da formulação convencional, que são estas: módulo e ângulo das tensões nas barras da rede elétrica modelada.

A partir dessa modificação, o fluxo de potência nestes ramos passa a ser calculado diretamente pela variável de estado associada e não mais como função das tensões complexas e impedâncias associadas a esses ramos. Com isso, a representação dos valores da impedância passa a ser evitada. Contudo, para efetivação e extensão dessa formulação defendida em Ribeiro (2005), torna-se necessário à existência das informações provenientes do status de todos os elementos internos, ou seja, de todas as chaves estudadas na modelagem de subestação. A partir desse arranjo de informações, é possível determinar as novas equações referentes às condições do disjuntor. Essas equações dizem respeito à diferença angular (ou abertura angular) e de tensão entre as barras terminais k e m de um disjuntor fechado que esteja inserido em um ramo k-m.

Quando um disjuntor está fechado, é sabido que a diferença angular e a diferença de potencial entre as barras que conectam os seus terminais são nulas. Dessa forma, para um disjuntor fechado conectado a um ramo k-m:

$$\theta_k - \theta_m = 0$$
$$V_k - V_m = 0$$

Quando um disjuntor está aberto, os fluxos de potência ativa e reativa sobre o ramo em que o disjuntor está inserido são nulos. Dessa forma, para um disjuntor aberto conectado a um ramo k-m, o fluxo de potência ativa tkm e reativa ukm são dados desta maneira:

$$t_{km} = 0$$
$$u_{km} = 0$$

Essas novas equações são incluídas na modelagem de fluxo de carga referida, sem considerar então a modelagem a partir da representação das impedâncias desses elementos. Para prosseguir com a nova modelagem apresentada em Ribeiro (2005), o próximo passo necessário é incluir o fluxo de potência nos ramos que possuam disjuntores como composições da injeção de potência líquida total em uma barra. Desse modo, são apresentadas duas situações para realização desse cálculo, conforme tabela:

Tabela 02 – Ramo Convencional x Ramo com disjuntores

LINHA DE TRANSMISSÃO OU RAMO CONVENCIONAL	**LINHA DE TRANSMISSÃO OU RAMO COM DISJUNTORES**
Calcula-se o Fluxo de Potência no ramo de maneira convencional	Obtém-se o Fluxo de Potência no ramo a partir da resposta do vetor de estados.

Utilização dos valores de resistência e reatância.	Elimina a utilização dos valores de resistência e reatância.
Modelagem barra-ramo	Modelagem no nível de subestação
Expressos em função do ângulo e magnitude das tensões	Expressos diretamente a partir das novas variáveis de estado

Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, as novas injeções líquidas de potência irão englobar também os fluxos de potência dos ramos chaveáveis. Portanto, a potência líquida injetada em uma barra qualquer irá ser igual ao somatório não apenas dos ramos convencionais, mas também dos ramos com disjuntores que tenham essa barra como um dos seus terminais de ligação. Sendo assim:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(\theta_k, \theta_m, V_k, V_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \qquad (3.1)$$

$$Q_k = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(\theta_k, \theta_m, V_k, V_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} u_{kl} \qquad (3.2)$$

Deste modo, com relação às equações (2.1) e (2.2), os fluxos de potência nos ramos chaveáveis passam a ser incluídos na injeção líquida de potência, configurando assim o balanço final de equações da modelagem no nível de subestação, conforme Ribeiro (2005) e Borges Junior (2009), onde:

P_{km}, Q_{km}: Representam os fluxos de potência ativa e reativa no ramo k-m.

t_{kl}, u_{kl}: Representam os fluxos de potência ativa e reativa dos elementos chaveáveis pertencentes ao ramo k-l.

A representação dos elementos de chaveamento como linhas de transmissão diferentes das dos ramos convencionais indica que não é possível existir uma linha de transmissão que possua um disjuntor e seja modelada da forma convencional, realçando novamente a proposta estudada e formulada em Ribeiro (2005).

2.2.1 Fluxo de carga linearizado para modelagaem no nível de subestação

O estudo e metodologia proposto na seção anterior se desdobra para os diversos métodos de resolução de fluxo de potência, sejam eles: Fluxo de Carga Linearizado, Método de Newton-Raphson, Desacoplado, Desacoplado Rápido, etc. A resolução pelo método de fluxo de carga linearizado incorporando a modelagem de subestações, conforme Ribeiro (2005) e Borges Junior (2009), será apresentada nesta seção.

Inicialmente, estende-se o vetor de estados para incorporar os novos fluxos de potência ativa nos disjuntores. Estas novas variáveis de estado, conforme a metodologia estendida do fluxo de carga linearizado em Ribeiro (2005) e Borges Junior (2009), é apresentada a seguir a partir do novo vetor de estados definido como:

$$\theta_{mod} = \begin{bmatrix} \theta \\ t \end{bmatrix}$$

Sendo θ o vetor dos ângulos nas barras do método linearizado convencional e t o vetor referente à representação dos fluxos nos ramos chaveáveis. Para o método linear, as informações referentes às tensões nas barras são generalizadas para valores de um pu, devido à aproximação de tornar a condutância da LT modelada como sendo nula, $gkm = 0$.

Dessa forma, para representar o status de um disjuntor fechado, leva-se apenas em consideração a abertura angular:

$$\theta_k - \theta_m = 0$$

Para finalizar, se o disjuntor estiver aberto, leva-se apenas em consideração o fluxo de potência ativa, pois o fluxo de potência reativa é desconsiderado na formulação convencional para o método linearizado. Portanto, para disjuntores abertos:

$$tkm = 0$$

As injeções de potência líquida nas barras são então expressas de forma simplificada da equação (3.1) por:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(\theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \qquad (3.1)$$

Finalmente, a representação matricial do problema do fluxo de potência estendido para nível de subestação conforme Ribeiro (2005) e Borges Junior (2009) passa a ser:

$$Pmod = Bmod * \theta\mathrm{mod}$$

Sendo Pmod o vetor de potências de cada barra do sistema e Bmod a matriz de coeficientes do problema estendido para modelagem de fluxo de carga linearizado em nível de subestação. Com relação à formulação convencional, o vetor $Pmod$ é estendido de modo a acrescentar o vetor de zeros referente às equações de diferença angular nos disjuntores fechados e fluxo de potência nos disjuntores abertos. Dessa forma:

$$Pmod = \begin{bmatrix} P \\ 0r \end{bmatrix}$$

Onde P representa o vetor de potências injetadas líquidas da formulação convencional e $0r$ o vetor de zeros associados às equações referidas anteriormente. A matriz de coeficientes é igualmente estendida para também incorporar as novas equações envolvendo elementos internos das subestações (ou ramos chaveáveis).

$$Bmod = \begin{bmatrix} B & T \\ \theta\mathrm{r} & 01 \\ 02 & T1 \end{bmatrix}$$

Onde:

- Bmod – Matriz modificada ou estendida;
- B – Submatriz que representa a matriz susceptância do método linearizado convencional;
- T – Submatriz que representa as equações dos fluxos em disjuntores abertos;
- Θr – Submatriz que representa as equações angulares em disjuntores fechados;

- 01 e 02 – Matrizes com todos os elementos nulos.

A extensão de um *software* de simulação de resolução de fluxo de carga no nível de subestação, proposta em Ribeiro (2005), foi realizado e incorporado ao pacote computacional MATPOWER em Teles (2016). A contribuição desse estudo é de importância direta para a realização do presente trabalho, levando em consideração que se trata da implementação da metodologia de resolução do fluxo de carga não no mesmo pacote computacional referido anteriormente.

2.2.2 Fluxo de carga não linear para o nível de subestação

Nesta seção, serão apresentadas as modificações necessárias para realizar o fluxo de carga não linear para o nível de subestação a partir do método Newton-Raphson, de acordo com a elaboração desenvolvida em Ribeiro (2005) e demonstrada em Borges Junior (2009).

Inicialmente realiza-se a extensão do vetor associado às variáveis de estado para incorporar os fluxos de potência ativa e reativa dos ramos chaveáveis. Dessa maneira, o novo vetor de estados passa a ser definido para a resolução do método de Newton-Raphson, dessa maneira:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \underline{\theta} \\ \underline{V} \\ \underline{t} \\ \underline{u} \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

Onde:

- θ – Vetor do ângulo das tensões de todas as barras do sistema;
- V – Vetor da magnitude das tensões de todas as barras do sistema;
- t – Vetor relativo aos fluxos de potência ativa em todos os ramos chaveáveis;
- u – Vetor relativo aos fluxos de potência reativa em todos os ramos chaveáveis;

Consideram-se também as equações de abertura angular em disjuntores fechados:

$$\theta_k - \theta_m = 0$$

E as equações de diferença de potencial em disjuntores fechados:

$$V_k - V_m = 0$$

Além das equações de fluxo de potência ativa e reativa em disjuntores abertos:

$$tkm = 0;\ ukm = 0$$

A partir dessas considerações, a matriz Jacobiana estendida começa a ser formada a partir das submatrizes que representam as equações de abertura angular e de tensão, de fluxos de potência nos ramos que possuam disjuntores abertos e matrizes de todos os seus elementos nulos. Portanto, a cada iteração do método de Newton, a composição de todas estas submatrizes formará a matriz Jacobiana estendida.

Essas informações são incluídas na formulação convencional de resolução do fluxo de carga pelo método de Newton. Dessa maneira, o vetor que representava incialmente as equações (2.3) e (2.4) da formulação convencional passa a ser estendido para o novo vetor:

$$F(x) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta t \\ \Delta u \end{bmatrix}$$

Onde:

- ΔP e ΔQ: Vetores das equações de desvio de potência ativa e reativa;

- $\Delta\theta$ e ΔV: Vetores das equações operacionais de abertura angular e diferença de potencial em disjuntores fechados, com todos os seus elementos nulos e dimensão (número de disjuntores fechados x 1);
- Δt e Δu: Vetores que representam as equações operacionais de fluxo de potência em disjuntores abertos, com todos os seus elementos nulos e dimensão (número de disjuntores abertos x 1).

Para finalizar, conforme as equações (3.1) e (3.2) as injeções de potência ativa e reativa devem ser modificadas, de modo a incluir os fluxos nos ramos chaveáveis. Desse modo, ocorrerão mudanças nos vetores de desvio de potência ΔP e ΔQ. As equações de desvio de potência desses vetores são representadas a partir de:

$$\Delta \mathrm{P} = P_{especificado} - P_{calculado}$$

$$\Delta \mathrm{Q} = Q_{especificado} - Q_{calculado}$$

Além disso, o fluxo de potência ativa e reativa passa a ser calculado da seguinte maneira:

$$P_k^{calc} = \sum_{m\in\Omega_k} t_{km}(V,\theta) + \sum_{m\in\Omega_k} t_{km_D} \tag{4.2}$$

$$Q_k^{calc} = \sum_{m\in\Omega} u_{km}(V,\theta) + \sum_{m\in\Omega_k} u_{km_D} \tag{4.3}$$

Com relação à equação (4.2), o somatório referente à tkm_d corresponde à composição de todos os fluxos de potência ativa que tenham ramos com disjuntores interligados à barra k. O somatório referente à tkm correposponde, por sua vez, à composição de todos os fluxos de potência ativa que tenham ramos convencionais (sem disjuntores) interligados a barra k.

O procedimento é semelhante para a equação (4.3), com a diferença de que, nesta vez, os somatórios envolvem a composição de potências reativas. O conjunto referente ao símbolo Ω significa o conjunto das linhas de transmissão (ou ramos) vizinhas a k, ou seja, linhas que possuam algum de seus terminais conectados à barra k.

Desse modo, o próximo passo para construção dessa modelagem, conforme estudado em Ribeiro (2005) e Borges Junior (2009), é a modificação da matriz jacobiana, de modo a incrementá-la na solução do sistema linear a seguir, a cada iteração:

$$F(x) = J_{mod}\, X \tag{4.4}$$

Onde:

- F – Vetor que representa as equações de desvio de potência e operacionais dos disjuntores apresentado anteriormente,
- X – Vetor resposta conforme equação (4.1),
- Jmod – Matriz Jacobiana modificada, que será apresentada a seguir.

Antes de apresentar elemento por elemento que compõe a matriz jacobiana estendida, é importante ressaltar que cada elemento que compõe a matriz jacobiana é uma matriz, ou seja, uma submatriz da matriz jacobiana modificada. Por conta disso, serão necessárias matrizes de elementos nulos para tornar a matriz jacobiana modificada uma matriz inversível e não singular. Possibilitando, assim, a resolução do sistema linear apresentado em (4.4) em todo o processo interativo do método de Newton-Raphson.

Quadro 01 – Matriz jacobiana estendida para modelagem no nível de subestação

H	**N**	**T**	**0**
M	**L**	**0**	**U**
ϴ	**0**	**0**	**0**
0	**V**	**0**	**0**
0	**0**	**T1**	**0**
0	**0**	**0**	**U1**

Fonte: Ribeiro (2005).

A matriz jacobiana por sua vez é composta das seguintes submatrizes:

a) Submatrizes H, M, N, L – São similares as da matriz jacobiana da formulação convencional, com a diferença de que as equações são realizadas para todas as barras do sistema;

b) Sumatriz T – resulta da representação dos fluxos de potência ativa através dos ramos chaveáveis e tem como dimensão (número de disjuntores modelados x número de barras do sistema);

c) Submatriz U – resulta da representação dos fluxos de potência reativa através dos ramos chaveáveis e tem como dimensão (número de disjuntores modelados x número de barras do sistema);

d) Submatriz Θ - resulta da inclusão das equações de diferença angular nula em disjuntores fechados e tem como dimensão (número de disjuntores fechados x número de barras do sistema);

e) Submatriz V – resulta da inclusão das equações de diferença de potencial nula em disjuntores fechados e tem como dimensão (número de disjuntores fechados x número de barras do sistema);

f) Submatriz T1 – resultada inclusão das equações de fluxo de potência ativa em ramos que possuam disjuntores abertos, tendo como dimensão (número de disjuntores abertos x número de disjuntores modelados);

g) Submatriz U1- resulta da inclusão das equações de fluxo de potência reativa em ramos que possuam disjuntores abertos, tendo como dimensão (número de disjuntores abertos x número de disjuntores modelados).

Para finalizar, as submatrizes faltantes têm todos os seus elementos nulos e, para representá-las, deve-se levar em consideração que possuem o mesmo número de linhas do vetor F correspondente e o mesmo número de colunas do vetor X correspondente para que a matriz seja uma matriz inversível. Dessa forma, o sistema linear a ser resolvido durante cada iteração do método referido passa a ser:

ΔP		H	N	T	0	
ΔQ		M	L	0	U	$\Delta \Theta$
ΔOp	=	Θ	0	0	0	ΔV
ΔVop		0	V	0	0	t
Top		0	0	T1	0	u
Uop		0	0	0	U1	

(4.5)

A metodologia de fluxo de carga não linear apresentada nesta seção é fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, pois está diretamente associada ao objetivo deste trabalho de incorporação desta modelagem dentro de um pacote computacional de código aberto. Trata-se do MATPOWER, um simulador o qual está apresentado e descrito na seção seguinte.

2.3 SIMULADOR DE FLUXO DE POTÊNCIA MATPOWER

O simulador MATPOWER é um pacote computacional de código aberto com uma série de arquivos de extensão ou tipo m, que são arquivos próprios para execução no MATLAB a partir da versão 7 ou GNU OCTAVE a partir da versão 3.4, ambos os *softwares* de grande porte e escala dentro da área de engenharia elétrica e das engenharias em geral.

O objetivo principal da construção deste pacote computacional foi a programação de uma ferramenta capaz de resolver problemas de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo conforme Zimmerman (2016), ambos os problemas importantíssimos em estudos e pesquisas na área de sistemas de potência em todo o cenário global.

A vantagem principal do pacote computacional MATPOWER e que tornou possível a realização deste trabalho, é a possibilidade de alteração do conjunto de código-fonte dos arquivos de extensão m dentro do pacote. Portanto, possuindo uma linguagem simples e possível de ser modificada, a ferramenta computacional possibilitou a criação de um aditivo, ou mais especificamente um “*plug-in”* para este pacote computacional, que após o desenvolvimento deste trabalho, passou a incorporar também a ferramenta de simulação de fluxo de potência dentro do nível de seções de barras e subestações.

2.3.1 Tutorial Básico de Simulação

O escopo de simulação a ser estudado neste *software* para o desenvolvimento do presente trabalho está delimitado apenas nas simulações de fluxo de potência. Portanto, a realização de simulações de problemas de otimização de fluxo de potência não será explicitada nesta seção.

Para realizar uma simulação na ferramenta, é preciso preparar o arquivo de dados de entrada com todos os parâmetros relevantes de sistemas de potência, como, por exemplo: dados de carga, geração, resistência, reatância e susceptância das linhas de transmissão, determinação dos tipos de barra, ângulos e tensões de referência, dentre outros parâmetros.

Após a construção do arquivo de entrada para realizar uma simulação de fluxo de carga não linear, é necessário, dentro da linha de comando do MATLAB ou OCTAVE, escrever o seguinte comando:

$$runpf('casoExemplo')$$

O argumento incluído dentro da função diz respeito ao arquivo de dados de entrada e pode ter o nome que o usuário desejar, desde que seja salvo com este nome. De maneira geral, o arquivo de dados do pacote computacional é dividido em três grandes partes: Dados de barra, dados de linha e dados de geração. Conforme o quadro abaixo para exemplo:

Quadro 02 – Representação dos dados de barra no MATPOWER

```
%% bus data
%   bus_i   type    Pd  Qd  Gs  Bs  area    Vm  Va  baseKV  zone    Vmax    Vmin
mpc.bus = [
    1   3   0   0   0   0   1   1   0   230 1   1.1 0.9;
    2   1   100 100 0   0   1   1   0   230 1   1.1 0.9;
    3   1   50  50  0   0   1   1   0   230 1   1.1 0.9;
    4   2   50  50  0   0   1   1   0   230 1   1.1 0.9;
    5   2   50  50  0   0   1   1   0   230 1   1.1 0.9;
];
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a quadro 02, é possível notar que se trata de uma modelagem de um sistema de 5 barras, onde cada parâmetro em verde é uma exigência do software para gerar uma simulação. Os parâmetros são:

a) Bus_i - Representa o índice da barra;
b) Type - Representa o tipo da barra. O índice 1 indica uma barra de carga (ou PQ), o índice 2 indica uma barra de geração (ou PV) e o índice 3 indica uma barra de referência (ou $V\theta$);
c) Pd – Indica à injeção de potência ativa de uma carga conectada a barra;
d) Qd – Indica à injeção de potência reativa de uma carga conectada a barra;
e) Vm – Magnitude de tensão de referência na barra;
f) Va - Ângulo de tensão de referência na barra;
g) BaseKV – Tensão de Base em quilovolts;
h) Vmax e Vmin – Limites de tensão em PU.

Os parâmetros Gs, Bs, area e Zone somente possuem alterações em situações específicas. Por conta disso, para efeitos de simulação deste trabalho, estes parâmetros não foram alterados, sendo iguais aos parâmetros de referências trazidos pelo próprio pacote computacional.

Para inicialização e atribuição dos dados de linha conforme a modelagem no pacote computacional, deve-se levar em consideração a construção da seguinte matriz:

Quadro 03 – Representação dos dados das linhas de transmissão

```
%% branch data
%   fbus    tbus    r   x   b    rateA    rateB    rateC    ratio    angle
%   status  angmin  angmax Disjuntores Disjuntores Abertos Disjuntores Fechados
mpc.branch = [
    1   4   0.01008 0.0504  0.1025  250 250 250 0   0   1   -360    360  0   0   0 ;
    1   5   0.00744 0.0372  0.0775  250 250 250 0   0   1   -360    360  0   0   0;
    2   4   0.00744 0.0372  0.0775  250 250 250 0   0   1   -360    360  1   0   1;
    2   5   0.00744 0.0372  0.0775  250 250 250 0   0   1   -360    360  1   1   0;
    3   4   0.01272 0.0636  0.1275  250 250 250 0   0   1   -360    360  1   1   0;
    3   5   0.01272 0.0636  0.1275  250 250 250 0   0   1   -360    360  1   0   1;
];
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o quadro 03 e o esqueleto do programa, o MATPOWER necessita da atribuição dos seguintes parâmetros.

Considerando o ramo k-m:

a) Fbus – Barra terminal k;
b) Tbus – Barra terminal m;
c) r – resistência modelada do ramo k-m;
d) x – reatância modelada do ramo k-m;
e) b – susceptância modelada do ramo k-m.

Os parâmetros rateA, rateB, rateC, ratio e angle são parâmetros específicos e não terão seus valores alterados na construção deste trabalho. Finalmente, modelam-se os valores de geração do sistema elétrico a ser representado na construção do arquivo de dados de entrada do pacote computacional MATPOWER. Além disso, os parâmetros referentes aos disjuntores fazem parte da nova criação do programa e serão explicados nas seções a seguir.

Quadro 04 – Representação dos dados de geração

```
%% generator data
%   bus Pg   Qg   Qmax    Qmin     Vg   mBase    status   Pmax     Pmin
mpc.gen = [

    1    100 100 100 -100     1.02     100 1     318 0     0     0     0     0


];
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Novamente, os valores necessários para modelagem neste trabalho são:

a) Bus – Número ou índice da barra de geração;
b) Pg – Potência Ativa de Geração;
c) Qg – Potência Reativa de Geração;
d) Qmax, Qmin, Pmax, Pmin – Limites de valores em PU;
e) Vg – Módulo da tensão de geração.

Após a construção do arquivo de dados ilustrado anteriormente, torna-se necessário salvar o arquivo dentro da pasta que contém todo o pacote do programa. Dessa forma, para realizar a simulação do fluxo de potência, basta digitar os seguintes comandos no *prompt* do software MATLAB ou OCTAVE, conforme tabela.

Tabela 03 – Execução de arquivos no MATPOWER

Runpf (‘caso’)	Execução da simulação de fluxo de potência não linear para o arquivo de entrada ‘caso. m’
Rundcpf (‘caso’)	Execução da simulação de fluxo de potência linearizado para o arquivo de entrada ‘caso. m’

Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante fazer uma ressalva de que esta seção apresenta um tutorial simplificado. Um maior nível de detalhamento é descrito conforme o manual do MATPOWER, obtido em Zimmerman (2016).

3 METODOLOGIA

Esse capítulio apresenta todas as etapas realizadas na incorporação da modelagem de fluxo de carga não linear, defendida em Ribeiro (2005), dentro do simulador MATPOWER, de modo a torná-lo capaz de processar redes elétricas no nível de subestação. Será apresentado o caminho do algoritmo convencional já existente, bem como a apresentação do esqueleto principal do caminho percorrido pelo novo algoritmo desenvoldido. Por sua vez, o algoritmo permitiu a inserção da modelagem no nível de subestações para o MATPOWER.

Inicialmente, foi realizado um estudo detalhado da modelagem de fluxo de carga para o método de Newton-Raphson, bem como das suas extensões para a área de sistemas de potência. Após essa etapa, um segundo estudo foi realizado para melhor compreensão das rotinas de fluxo de potência não linear do pacote computacional. O desenvolvimento do algoritmo proposto neste trabalho pode ser exemplificado a partir de uma sequência de passos:

a) Passo 1: Estudo da modelagem de fluxo de carga não linearizado, proposta em Ribeiro (2005);
b) Passo 2: Estudo das rotinas de fluxo de potência não linear do MATPOWER para obter total entendimento do caminho percorrido pelo alrogitmo;
c) Passo 3: Criação de 3 novas colunas no arquivo de entrada indicado no quadro 01 para indicar quais os ramos possuem disjuntores, quais os ramos possuem disjuntores abertos e quais os ramos possuem disjuntores fechados;
d) Passo 4: Criação de uma nova rotina que permitiu a leitura destes novos dados de entrada e a transmissão deles para o arquivo correspondente ao método de Newton. Tudo isto através da utilização de funções com a linguagem de programação do MATLAB;
e) Passo 5: Criação das novas submatrizes para estender a matriz jacobiana conforme exemplificado na seção 2.2.2.
f) Passo 6: Modificar as matrizes convencionais H,M,N,L do método de Newton para resolução do fluxo de potência não linear conforme visto em seção 2.2.2;

g) Passo 7: Criar um algoritmo capaz de identificar as barras de referência do sistema e implementar a equação de referência angular e de tensão na matriz jacobiana estendida;
h) Passo 8: Modificar os resultados de fluxo de potência emitidos pelo MATPOWER de acordo com a nova modelagem conforme as equações (4.2) e (4.3);
i) Passo 9: Implementar todas essas modificações a partir do caminho natural percorrido pelo algoritmo já existente do pacote computacional.

A aplicação dessa sequência de passos só foi possível devido ao conhecimento do caminho percorrido pelo algoritmo convencional para simular uma modelagem de fluxo de potência não linear.

Voltando novamente ao passo 3, a execução do mesmo agora será exemplificada conforme o quadro 03. As três últimas colunas dos dados de linha de transmissão informam os ramos que possuem disjuntores, dentre estes, quais estão abertos e quais estão fechados. Essas colunas não existiam no programa convencional, elas foram criadas para permitir a leitura dos dados que possibilitaram a modelagem de subestações. Consequentemente, conforme o quadro 03, tem-se a seguinte tabela:

Tabela 04 – Leitura do novo arquivo de entrada do MATPOWER

RAMOS COM DISJUNTORES	**RAMOS COM DISJUNTORES ABERTOS**	**RAMOS COM DISJUNTORES FECHADOS**
2-4	-	FECHADO
2-5	ABERTO	-
3-4	ABERTO	-
3-5	-	FECHADO

Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo a tabela 04 e o quadro 03, é possível concluir que a extensão realizada para o novo arquivo de dados possui três colunas, todas elas preenchidas com os valores 0 ou 1. Sendo assim, na primeira coluna criada referente aos disjuntores conforme quadro 03, as posições que possuírem os valores 1 indicarão que naqueles ramos específicos possuem disjuntores. Na segunda coluna criada, conforme o mesmo quadro, os valores do número 1 indicarão que naqueles ramos específicos os disjuntores estarão abertos. Na terceira e última coluna criada, os valores do número 1 indicarão que naqueles ramos específicos os disjuntores estarão fechados.

Para finalizar, é possível resumir e interpretar as novas informações contidas no quadro 03 da seguinte maneira:

Tabela 05 – Nova modelagem do arquivo de entrada – MATPOWER

LINHAS DE TRANSMISSÃO	**SITUAÇÃO**
1-4	Convencional
1-5	Convencional
2-4	Disjuntor fechado
2-5	Disjuntor aberto
3-4	Disjuntor aberto
3-5	Disjuntor fechado

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com a tabela 05, para as linhas onde a situação é convencional, significa que se trata de um ramo que não possui nenhum disjuntor conectado a ela, e a resolução do cálculo de fluxo será feito da maneira convencional. Para ramos com disjuntor fechado e aberto, já entrará a nova incorporação da modelagem de chaves e disjuntores no nível de seção de barras.

3.1 CAMINHO PERCORRIDO PELO ALGORITMO JÁ EXISTENTE NO PACOTE MATPOWER

A compreensão do caminho percorrido pelo algoritmo já existente se restringe e se aplica deste caminho para realizar a simulação do fluxo de potência não linear, mais especificamente do método de Newton-Raphson. O caminho percorrido pelo algoritmo, portanto, pode ser exemplificado a seguir.

Tabela 06 – Caminho percorrido pelo algoritmo do MATPOWER

COMANDO RUNPF (‘CASOENTRADA’)
1. FUNÇÃO RUNPF CHAMA A FUNÇÃO NEWTONPF
2. DETERMINAÇÃO DA TOLERÊNCIA
3. DETERMINAÇÃO DO NÚMERO MÁXIMO DE ITERAÇÕES
4. CONSTRUÇÃO DA MATRIZ JACOBIANA
5. RESOLUÇÃO DO SISTEMA LINEAR
6. VOLTAR PARA FUNÇÃO RUNPF ENVIANDO OS RESULTADOS
7. ENVIAR OS RESULTADOS À FUNÇÃO PSOLN QUE MOSTRARÁ NO PROMPT DO MATLAB

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com a Tabela 06, nota-se que a maioria das alterações propostas na seção atual será realizada dentro da função newtonpf, que pertence originalmente ao pacote computacional proposto na realização deste trabalho.

3.1.1 Incorporação dos passos 4, 5 e 6 conforme seção 3.1

A realização do passo 4 não teve elevado nível de complexidade: Apenas conteve a utilização da linguagem de programação do matlab para criar um código-fonte dentro do algoritmo “newtonpf.m”, responsável por acessar os dados de linha (mais conhecido como mpc.branch, conforme quadro 03) e extrair todos os vetores de status, que são responsáveis por indicar quais linhas possuíam disjuntores, em quais linhas eles estavam abertos e em quais linhas estavam fechados. Logo, após esse processo, já se tornou possível a utilização desses dados para modificação do algoritmo convencional.

Conforme a seção 2.2.2 e o quadro 01, foram construídas as matrizes T,U, ϴ e V dentro do algoritmo “newtonpf.m” e incorporadas à nova matriz jacobiana. Além disso, as matrizes de zeros também foram feitas com o mesmo procedimento.

3.1.2 Incorporação dos resultados do MATPOWER

Uma das dificuldades encontradas foi à realização prévia do cálculo de fluxo de potência em todos os ramos ou linhas de transmissão, de acordo com o método convencional, através da utilização das impedâncias, conforme as equações:

$$P_{km} = V_k\, V_m(G_{km}\ Cos\ \theta_{km} + B_{km}\ sen\ \theta_{km})$$

$$Q_{km} = V_k\, V_m(G_{km}\ Cos\ \theta_{km} - B_{km}\ sen\ \theta_{km})$$

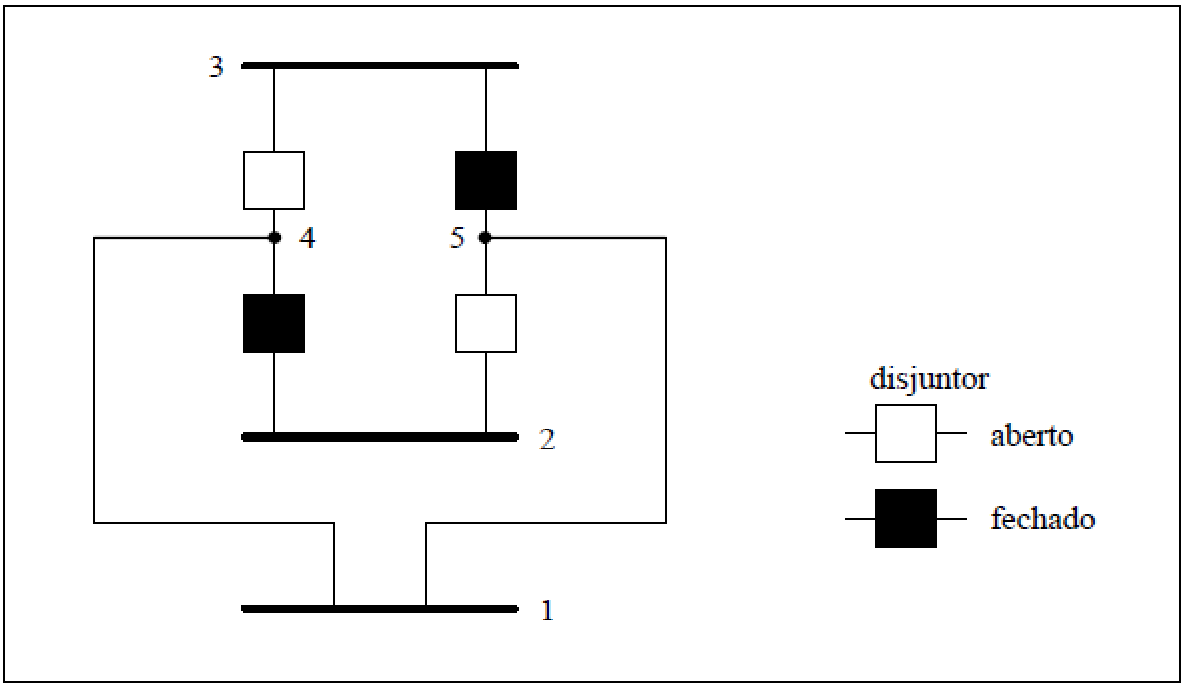
Dessa maneira, todos os ramos que possuíam disjuntores já estavam sendo calculados conforme a formulação convencional, contida no programa computacional MATPOWER. Portanto, foi necessário fazer um aditivo no código fonte de incorporação dos resultados “Psoln.m” para tornar o programa capaz de interpretar os ramos que possuem disjuntores na construção dos resultados e realizar o cálculo corretamente, a partir das variáveis de estado contidas na seção 2.2.2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse capítulo apresentará os resultados obtidos com o desenvolvimento da ferramenta que permite a extensão do MATPOWER, de modo a incorporar os elementos de subestações. Sendo assim, foram obtidos resultados para dois sistemas: Um sistema teste de 5 barras estendido em nível de subestação conforme Figura 03, e um sistema da plataforma IEEE, originalmente de 14 barras na modelagem barra-ramo, porém com 65 barras estendido para modelagem de subestação.

Inicialmente os resultados foram obitidos para o sistema teste de 5 barras. O sistema é exemplificado conforme figura a seguir.

Figura 03 – Sistema Elétrico de Potência com 5 barras e disjuntores



Fonte: Ribeiro (2005)

Para este sistema foram feitas diversas simulações, com valores de geração e carga diferentes. Para todas essas simulações, os valores foram condizentes e as equações foram satisfeitas, conforme discutido a seguir.

4.1 CASO 1 – RESULTADOS SISTEMA 5 BARRAS

Dados:

a) Tolerância – 0,01 PU;
b) Número de Iterações atingidas – 5;
c) Tempo de Convergência – 0,62s;
d) Barra de Referência – 1;
e) Número de Barras – 5.

Para este caso, os valores de geração e carga são aqueles apresentados na Tabela 07. As barras de referência estão sendo explicitadas como REF. Além disso, para todos os casos seguintes, foi considerada a barra 1 como referência e as demais barras de carga. Como consequência, a potência líquida injetada é sempre negativa nas demais barras.

Tabela 07 – Caso 1: Valores especificados de potência líquida ativa e reativa

BARRA	**POTÊNCIA ATIVA LÍQUDIA**	**POTÊNCIA REATIVA LÍQUIDA**
1	REF	REF
2	-100	-100
3	-50	-50
4	-50	-50
5	-50	-50

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados da simulação do algoritmo criado neste trabalho de modelagem de subestações para o pacote computacional MATPOWER, juntamente com a representação do status dos disjuntores, conforme quadro 05, são expressos a seguir:

Quadro 05 – Resultados do MATPOWER estendido para o caso 1

Branch Data

Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus Injection P (MW)	From Bus Injection Q (MVAr)	To Bus Injection P (MW)	To Bus Injection Q (MVAr)
1	1	4	148.58	149.28	-143.95	-135.50
2	1	5	101.47	100.95	-99.88	-100.44
3	2	4	-99.09	-99.48	99.09	99.48
4	2	5	0.00	0.00	-0.00	0.00
5	3	4	0.00	0.00	-0.00	0.00
6	3	5	-50.55	-50.37	50.55	50.37

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a quadro 05, nota-se que os resultados foram coerentes. Nas linhas de transmissão com elementos de subestações modelados, os fluxos calculados pelo programa foram iguais a zero para os ramos com disjuntores abertos e apresentaram resultados coerentes para disjuntores fechados, conforme sistema modelado na figura 03.

Foi possível verificar também a coerência dos resultados aplicando as equações de injeção de potência líquida, ou seja, o balanço de potência líquida em cada barra do sistema (geração menos carga) deve ser igual à soma de todos os fluxos nos ramos que tem essa barra como um dos seus terminais. Logo, para a barra 3, a potência ativa líquida calculada pode ser obtida através de:

$$P3 = P34 + P35$$

$$P3 = 0 + -50{,}55 = -50{,}55\ MW$$

Desse modo, verifica-se que a potência ativa líquida calculada na barra 3 é negativa e vale 50 MW. O sinal negativo representa que a barra analisada é uma barra de carga. Repetindo essa mesma análise para a potência reativa na barra 3, obtem-se:

$$Q3 = Q34 + Q35$$

$$Q3 = 0 + -50{,}37 = -50{,}37\ MVAr$$

Para ambas as situações, o valor calculado de potência ativa e reativa chegou muito próximo do valor especificado, porém não foi exatamente o mesmo valor. Isso ocorre por conta da tolerência especificada no método de Newton, que é o critério de parada das iterações. Para esse caso em específico, a tolerância definida foi 0,01 PU e o sistema convergiu em 5 iterações e 0,62 segundos para convergir. Com a tolerância definida em 0,01 PU e a potência de base definida como 100 MVA, aplicando a seguinte equação têm-se:

$$Tolerância = 0{,}01\ PU\ X\ 100\ MVA = 1\ MVA$$

Desse modo, o desvio (ou erro) máximo permitido entre a potência calculada e a potência especificada é de 1MVA ou até mesmo 1%. Sendo assim, estendendo a análise anterior para todas as barras, foram obtidas todas as potências ativas e reativas nas barras do sistema analisado, conforme tabela a seguir:

Tabela 08 – Caso 1: Valores calculados de potência líquida ativa e reativa

BARRA	POTÊNCIA ATIVA LÍQUIDA	POTÊNCIA REATIVA LÍQUIDA
1	250,05	250,23
2	-99,09	-99,48
3	-50,55	-50,37
4	-49,49	-49,8
5	-50,92	-50,58

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após este cálculo, foi possível atribuir os desvios de potência conforme seção 2.2.2 e verificar se o cálculo dos desvios está abaixo ou acima da tolerância especificada para essa simulação. Logo, atribiuindo a análise:

Tabela 09 – Caso 1: Desvio ou erro de potência ativa

BARRA	POTÊNCIA ATIVA LÍQUIDA CALCULADA	POTÊNCIA ATIVA LÍQUIDA ESPECIFICADA	DESVIO DE POTÊNCIA ATIVA
1	250,05	250,05	0
2	-99,09	-100	-0,91
3	-50,55	-50	0,55
4	-49,49	-50	-0,51
5	-50,92	-50	0,92

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme Tabela 09, verifica-se que todos os erros não ultrapassaram a tolerância mínima de 0,01PU ou 1 MVA, sendo o maior erro obtido de 0,91 MVA ou 0,0091 PU. Logo, conclui-se que o algoritmo desenvolvido apresentou êxito. Realizando essa mesma análise para os erros de potência reativa, têm-se:

Tabela 10 – Caso 1: Desvio ou erro de potência reativa

BARRA	POTÊNCIA REATIVA LÍQUIDA CALCULADA	POTÊNCIA REATIVA LÍQUIDA ESPECIFICADA	DESVIO DE POTÊNCIA REATIVA
1	250,23	250,23	0
2	-99,48	-100	-0,52
3	-50,37	-50	0,37
4	-49,8	-50	-0,2
5	-50,58	-50	0,58

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme Tabela 10, verifica-se que todos os erros não ultrapassaram a tolerância mínima de 0,01PU ou 1 MVA, sendo o maior erro obtido de 0,52 MVA ou 0,0052 PU em módulo. Logo, conclui-se que o algoritmo desenvolvido apresentou êxito. Para ambos os casos, o erro obtido na barra 1 é justificado pelo fato dessa barra ter sido escolhida como barra de referência, portanto a potência calculada precisa ser igual à potência especificada, levando em consideração que na barra de referência, especifica-se apenas a tensão e o ângulo.

Ainda no sistema de 5 barras, outros 3 casos foram analisados com diferentes valores de tolerâncias e potências especificadas para validação do programa desenvolvido. E, por fim, a validação através do sistema teste de 14 barras estendida da plataforma IEEE. Os resultados das simulações seguintes para o caso de 5 barras são apresentados a seguir:

4.2 – CASO 2 – RESULTADOS SISTEMA 5 BARRAS

Dados:

Tolerância – 0,0001 PU
Número de Iterações atingidas – 7
Tempo de Convergência – 0,65s
Barra de Referência – 1
Número de Barras - 5

Para esta nova simulação, foi feita uma redução na tolerância, o que fez aumentar o número de iterações e, como consequência, chegar a um resultado mais preciso, com os desvios (ou erros) na casa de 0,0001 PU ou 0,01 MVA. Os resultados para este caso são demonstrados abaixo:

Quadro 06 – Resultados do MATPOWER estendido para o caso 2

```
================================================================
|     Branch Data
================================================================
Brnch   From   To    From Bus Injection   To Bus Injection
  #     Bus    Bus    P (MW)   Q (MVAr)   P (MW)   Q (MVAr)
-----  -----  -----  --------  --------  --------  --------
   1      1      4    149.99    150.00   -145.29   -135.89
   2      1      5    100.01    100.00    -98.47    -99.67
   3      2      4    -99.99   -100.00     99.99    100.00
   4      2      5      0.00      0.00     -0.00      0.00
   5      3      4      0.00      0.00     -0.00      0.00
   6      3      5    -50.00    -50.00     50.00     50.00
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o quadro 06, nota-se que os resultados foram coerentes, pois nas linhas de transmissão com elementos de subestações modelados, os fluxos calculados pelo programa foram iguais a zero para os ramos com disjuntores abertos e apresentaram resultados coerentes para disjuntores fechados, conforme o sistema modelado na figura 03. É possível verificar a coerência dos resultados aplicando as equações de injeção de potência líquida e calculando o desvio correspondente (potência calculada menos potência especificada), que será apresentado nas tabelas seguintes.

Tabela 11 – Caso 2: Resultados potência ativa

BARRA	POTÊNCIA ATIVA LÍQUIDA CALCULADA	POTÊNCIA ATIVA LÍQUIDA ESPECIFICADA	DESVIO DE POTÊNCIA ATIVA
1	250	250	0
2	-99,99	-100	-0,01
3	-50	-50	0
4	-50	-50	0
5	-50,01	-50	0,01

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme tabela 11, verifica-se que todos os erros não ultrapassaram a tolerância mínima de 0,0001PU ou 0,01 MVA, sendo o maior erro obtido de 0,01 MVA ou 0,0001 PU em módulo. Logo, conclui-se que o algoritmo desenvolvido apresentou êxito. Para ambos os casos, o erro obtido na barra 1 é justificado pelo fato dessa barra ter sido escolhida como barra de referência.

Tabela 12 – Caso 2: Resultados potência reativa

BARRA	POTÊNCIA REATIVA LÍQUIDA CALCULADA	POTÊNCIA REATIVA LÍQUIDA ESPECIFICADA	DESVIO DE POTÊNCIA REATIVA
1	250	250	0
2	-100	-100	0
3	-50	-50	0
4	-50	-50	0
5	-50	-50	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme Tabela 12, verifica-se que todos os erros não ultrapassaram a tolerância mínima de 0,0001PU ou 0,01 MVA, pois todos os desvios calculados foram iguais a zero. Logo, conclui-se que o algoritmo desenvolvido apresentou êxito.

4.3 CASO 3 – RESULTADOS SISTEMA 5 BARRAS

Dados:

a) Tolerância – 0,000001 PU;
b) Número de Iterações atingidas – 8;
c) Tempo de Convergência – 0,75s
d) Barra de Referência – 1;
Número de Barras – 5.

Para esta nova simulação, foi feita uma redução na tolerância, o que fez aumentar o número de iterações e, como consequência, chegar a um resultado mais preciso, com os desvios (ou erros) na casa de 0,000001 PU ou 0,0001 MVA. Os resultados para esse caso são demonstrados abaixo:

Quadro 07 – Resultados do MATPOWER estendido para o caso 3

Branch Data						
Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus Injection P (MW)	From Bus Injection Q (MVAr)	To Bus Injection P (MW)	To Bus Injection Q (MVAr)
1	1	4	150.00	150.00	-145.31	-135.89
2	1	5	100.00	100.00	-98.45	-99.67
3	2	4	-100.00	-100.00	100.00	100.00
4	2	5	0.00	0.00	-0.00	0.00
5	3	4	0.00	0.00	-0.00	0.00
6	3	5	-50.00	-50.00	50.00	50.00

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o quadro 07, nota-se que os resultados foram coerentes, pois nas linhas de transmissão com elementos de subestações modelados, os fluxos calculados pelo programa foram iguais a zero para os ramos com disjuntores abertos e apresentaram resultados coerentes para disjuntores fechados, conforme sistema modelado na figura 03. É possível verificar a coerência dos resultados aplicando as equações de injeção de potência líquida que será demonstrada nas tabelas seguintes.

Tabela 13 – Caso 3: Resultados de potência ativa

BARRA	POTÊNCIA ATIVA LÍQUIDA CALCULADA	POTÊNCIA ATIVA LÍQUIDA ESPECIFICADA	DESVIO DE POTÊNCIA ATIVA
1	250	250	0
2	-100	-100	0
3	-50	-50	0
4	-50	-50	0
5	-50	-50	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme tabela 13, verifica-se que todos os erros não ultrapassaram a tolerância mínima de 0,000001PU ou 0,01 MVA, pois todos os desvios calculados foram iguais a zero. Logo, conclui-se que o algoritmo desenvolvido apresentou êxito.

Tabela 14 – Caso 3: Resultados potência reativa

BARRA	POTÊNCIA REATIVA LÍQUIDA CALCULADA	POTÊNCIA REATIVA LÍQUIDA ESPECIFICADA	DESVIO DE POTÊNCIA ATIVA
1	250	250	0
2	-100	-100	0
3	-50	-50	0
4	-50	-50	0
5	-50	-50	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme tabela 14, verifica-se que todos os erros não ultrapassaram a tolerância mínima de 0,000001PU ou 0,01 MVA, pois todos os desvios calculados foram iguais a zero. Logo, conclui-se que o algoritmo desenvolvido apresentou êxito.

Vale ressaltar que os desvios não foram exatamente iguais a zero, porém, a partir do limite de casas decimais estabelecidos pelo programa, pode-se considerar que todos os desvios foram nulos para o caso 3.

4.4 CASO 4 – RESULTADOS SISTEMA 5 BARRAS

Dados:

a) Tolerância – 0,001 PU OU 0,1 MVA;
b) Número de Iterações atingidas – 5;
c) Tempo de Convergência – 0,62s;
d) Barra de Referência – 1;
e) Número de Barras – 5.

Este caso é semelhante ao caso 1, porém as entradas com os valores de geração e carga foram modificadas, resultado em diferentes potências líquidas especificadas. Os resultados, juntamente com a entrada de potência líquida modificada para este caso, são demonstrados abaixo:

Quadro 08 – Resultados do MATPOWER estendido para o caso 4

Branch Data						
Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus Injection P (MW)	From Bus Injection Q (MVAr)	To Bus Injection P (MW)	To Bus Injection Q (MVAr)
1	1	4	109.85	109.93	-107.30	-106.75
2	1	5	90.15	90.09	-88.89	-91.22
3	2	4	-79.90	-79.95	79.90	79.95
4	2	5	0.00	0.00	-0.00	0.00
5	3	4	0.00	0.00	-0.00	0.00
6	3	5	-40.06	-40.03	40.06	40.03

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Caso 4: Resultados potência ativa

BARRA	POTÊNCIA ATIVA LÍQUIDA CALCULADA	POTÊNCIA ATIVA LÍQUIDA ESPECIFICADA	DESVIO DE POTÊNCIA ATIVA
1	200	200	0
2	-79,9	-80	-0,1
3	-40,06	-40	0,06
4	-29,95	-30	-0,05
5	-50,1	-50	0,1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Caso 4: Resultados potência reativa

BARRA	POTÊNCIA REATIVA LÍQUIDA CALCULADA	POTÊNCIA REATIVA LÍQUIDA ESPECIFICADA	DESVIO DE POTÊNCIA REATIVA
1	200,01	200,01	0
2	-79,95	-80	-0,05
3	-40,03	-40	0,03
4	-29,98	-30	-0,02
5	-50,05	-50	0,05

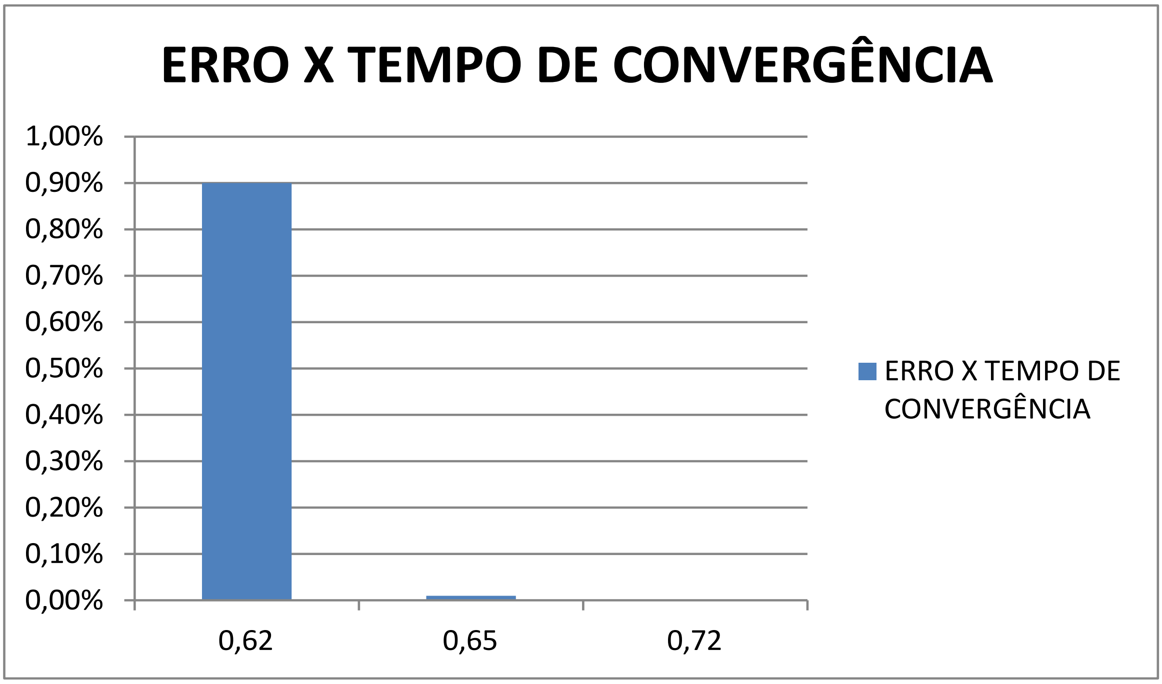
Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando todos os resultados apresentados para os casos anteriores, nota-se que a partir do momento em que se diminui a tolerância, aumentam-se o número de iterações para obter melhor precisão no resultado. Contudo, para uma precisão de 0,000001 o número de iterações foi 8 dentro da plataforma MATLAB, o que não acarretou um custo computacional de processamento bastante elevado, custando apenas 0,75 segundos.

Além disso, o algoritmo desenvolvido neste trabalho permite que o número máximo de iterações seja limitado. Sendo assim, conclui-se que em termos de custos computacionais, o novo pacote computacional a ser incorporado dentro do MATPOWER obteve êxito.

Um estudo da relação entre o tempo de convergência para atingir a tolerância especificada e o erro de potência em percentual, é demonstrado abaixo.

Gráfico 01 – Erro x número de iterações



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do gráfico 01, nota-se que o erro foi maior para 0,62 segundos de convergência, atingindo 0,9%. Para 0,72 segundos de convergência, os resultados apresentaram o menor erro de potência. Tal erro foi insignificante e precisaria de 6 casas decimais para expressá-lo, portanto foi considerado nulo.

Dessa forma, conclui-se a validação do algoritmo para este sistema modelado. Vale ressaltar que a tolerância e o número de iterações máximas são dados de entrada do programa que devem ser bem analisados na hora de realizar uma simulação de fluxo de potência em nível de subestação. Por fim, e para validar o trabalho desenvolvido, a simulação de dados da plataforma IEEE será abordada e quantificada na seção seguinte.

4.5 VALIDAÇÃO – SISTEMA DA PLATAFORMA IEEE

Para o sistema da plataforma IEEE é necessário fazer uma ressalva de que as 14 barras consideram o sistema no nível de seção de barras. Para estender esse mesmo sistema dentro do nível de subestação e modelar os ramos chaveáveis, foi necessária a modelagem de 65 barras e 92 ramos para representar todas as conexões. Portanto, foi construído esse novo caso dentro do MATPOWER para ser processado pelo novo algoritmo. Os dados de especificação de geração e carga, bem como os resultados angulares e de magnitude de tensão, seguem abaixo, de acordo com o MATPOWER:

Quadro 09 – Dados de carga e geração da barra 1 até 22

```
================================================================================
|     Bus Data                                                                 |
================================================================================
 Bus      Voltage          Generation             Load
  #   Mag(pu) Ang(deg)   P (MW)   Q (MVAr)   P (MW)   Q (MVAr)
----- ------- --------  --------  --------  --------  --------
    1  1.000    0.000*   219.07    -21.77       -         -
    2  0.977   -6.111     40.00     42.40       -         -
    3  0.940  -16.999      0.00     23.40     47.10      9.50
    4  0.929  -16.047       -         -         -         -
    5  0.969   -6.714       -         -         -         -
    6  1.022  -13.779      0.00     12.20       -         -
    7  0.914  -19.398       -         -         -         -
    8  0.947  -19.398      0.00     17.40       -         -
    9  0.886  -21.248       -         -         -         -
   10  0.875  -21.738       -         -         -         -
   11  0.934  -22.023       -         -        3.50      1.80
   12  1.007  -15.176       -         -        6.10      1.60
   13  0.998  -15.721       -         -       13.50      5.80
   14  0.867  -19.933       -         -         -         -
   15  1.000    0.000       -         -         -         -
   16  1.000    0.000       -         -         -         -
   17  1.000    0.000       -         -         -         -
   18  1.000    0.000       -         -         -         -
   19  1.000    0.000       -         -         -         -
   20  0.977   -6.111       -         -       21.70     12.70
   21  0.977   -6.111       -         -         -         -
   22  0.977   -6.111       -         -         -         -
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 10 – Dados de carga e geração da barra 22 até 49

22	0.977	-6.111	-	-	-	-
23	0.977	-6.111	-	-	-	-
24	0.940	-16.999	-	-	47.10	9.50
25	0.940	-16.999	-	-	-	-
26	0.940	-16.999	-	-	-	-
27	0.929	-16.047	-	-	-	-
28	0.929	-16.047	-	-	-	-
29	0.929	-16.047	-	-	-	-
30	0.929	-16.047	-	-	-	-
31	0.929	-16.047	-	-	-	-
32	0.929	-16.047	-	-	47.80	-4.00
33	0.929	-16.047	-	-	-	-
34	0.969	-6.714	-	-	7.60	1.60
35	0.968	-7.852	-	-	-	-
36	0.969	-6.714	-	-	-	-
37	0.969	-6.714	-	-	-	-
38	0.969	-6.714	-	-	-	-
39	0.929	-16.041	-	-	-	-
40	0.841	-21.962	-	-	-	-
41	1.022	-13.779	-	-	-	-
42	1.022	-13.779	-	-	11.20	7.50
43	1.022	-13.779	-	-	-	-
44	1.022	-13.779	-	-	-	-
45	1.022	-13.779	-	-	-	-
46	0.886	-21.248	-	-	-	-
47	0.886	-21.248	-	-	-	-
48	0.886	-21.248	-	-	-	-
49	0.886	-21.248	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 11 – Dados de carga e geração da barra 49 até 65

49	0.886	-21.248	-	-	-	-
50	0.886	-21.248	-	-	-	-
51	0.886	-21.248	-	-	29.50	16.60
52	0.875	-21.738	-	-	9.00	5.80
53	0.875	-21.738	-	-	-	-
54	0.875	-21.738	-	-	-	-
55	0.867	-19.933	-	-	14.90	5.00
56	0.867	-19.933	-	-	-	-
57	0.867	-19.933	-	-	-	-
58	0.934	-22.023	-	-	-	-
59	0.934	-22.023	-	-	-	-
60	0.934	-22.023	-	-	-	-
61	1.007	-15.176	-	-	-	-
62	1.007	-15.176	-	-	-	-
63	0.998	-15.721	-	-	-	-
64	0.998	-15.721	-	-	-	-
65	0.998	-15.721	-	-	-	-
			--------	--------	--------	--------
		Total:	259.07	73.63	259.00	73.40

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tolerância definida para essa simulação foi de 0,01PU ou 1%. Considerando a barra 1 como referência, os resultados de fluxo de potência ativa e reativa em todos os ramos do sistema seguem abaixo conforme MATPOWER.

Quadro 12 – Resultado de Fluxo de potência do ramo 1 até o 23º

| Branch Data |

Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus Injection P (MW)	Q (MVAr)	To Bus Injection P (MW)	Q (MVAr)	Loss (I^2 * Z) P (MW)	Q (MVAr)
1	1	15	167.26	-23.44	-167.26	23.44	0.000	0.00
2	1	18	51.81	1.67	-51.81	-1.67	0.000	0.00
3	2	19	-167.26	23.45	173.08	-10.84	5.818	12.60
4	2	20	207.26	18.95	-207.26	-18.95	0.000	0.00
5	2	21	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
6	3	25	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
7	3	26	-47.10	13.90	47.10	-13.90	0.000	0.00
8	4	28	-71.54	-2.23	71.54	2.23	0.000	0.00
9	4	30	23.74	6.23	-23.74	-6.23	0.000	0.00
10	4	32	47.80	-4.00	-47.80	4.00	0.000	0.00
11	5	34	7.60	1.60	-7.60	-1.60	0.000	0.00
12	5	35	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
13	5	36	-51.81	-1.68	51.81	1.68	0.000	0.00
14	5	37	50.61	0.53	-50.61	-0.53	0.000	0.00
15	5	38	-6.41	-0.46	6.41	0.46	0.000	0.00
16	6	40	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
17	6	41	11.32	7.47	-11.32	-7.47	0.000	0.00
18	6	42	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
19	6	43	10.34	1.11	-10.34	-1.11	0.000	0.00
20	6	44	-50.61	-0.55	50.61	0.55	0.000	0.00
21	6	45	28.62	4.12	-28.62	-4.12	0.000	0.00
22	7	8	-0.00	-17.40	0.00	18.04	0.000	0.64
23	7	30	-23.74	-6.23	23.74	7.74	0.000	1.51

Fonte: Elaborado pelo autor.

(Continua na próxima página.)

Quadro 13 – Resultado de fluxo de potência do ramo 23 até o 50º

24	7	50	23.74	23.63	-23.74	-22.15	0.000	1.48
25	9	47	3.02	-7.44	-3.02	7.44	0.000	0.00
26	9	49	-3.02	7.44	3.02	-7.44	0.000	0.00
27	9	51	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
28	10	52	8.67	5.89	-8.67	-5.89	0.000	0.00
29	10	54	-8.57	-5.91	8.57	5.91	0.000	0.00
30	10	57	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
31	11	58	-3.10	-1.94	3.10	1.94	0.000	0.00
32	11	60	-0.40	0.13	0.40	-0.13	0.000	0.00
33	12	61	4.24	-0.49	-4.24	0.49	0.000	0.00
34	12	62	-10.34	-1.11	10.34	1.11	0.000	0.00
35	13	63	19.36	-2.17	-19.36	2.17	0.000	0.00
36	13	64	-32.86	-3.63	32.86	3.63	0.000	0.00
37	14	53	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
38	14	55	15.24	4.93	-15.24	-4.93	0.000	0.00
39	14	56	-16.24	-5.29	16.24	5.29	0.000	0.00
40	15	16	167.26	-23.44	-167.26	23.44	0.000	0.00
41	16	17	167.26	-23.44	-167.26	23.44	0.000	0.00
42	17	19	167.26	-23.44	-167.26	23.44	0.000	0.00
43	18	19	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
44	18	36	51.81	1.67	-50.35	-0.42	1.460	1.25
45	20	23	185.56	6.25	-185.56	-6.25	0.000	0.00
46	21	22	-6.41	-0.45	6.41	0.45	0.000	0.00
47	21	38	6.41	0.45	-6.39	-3.65	0.027	-3.19
48	22	23	-96.66	-3.07	96.66	3.07	0.000	0.00
49	22	31	90.25	2.62	-85.28	9.37	4.971	11.99
50	23	25	88.90	3.18	-84.99	9.25	3.905	12.43

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 14 – Resultado de fluxo de potência do ramo 50 até o 77º

50	23	25	88.90	3.18	-84.99	9.25	3.905	12.43
51	24	25	-88.89	-3.17	88.89	3.17	0.000	0.00
52	24	26	41.79	-6.33	-41.79	6.33	0.000	0.00
53	26	33	-5.31	7.57	5.38	-8.51	0.072	-0.94
54	27	29	84.94	10.18	-84.94	-10.18	0.000	0.00
55	27	31	-90.24	-2.61	90.24	2.61	0.000	0.00
56	27	33	5.31	-7.57	-5.31	7.57	0.000	0.00
57	28	29	-84.95	-10.17	84.95	10.17	0.000	0.00
58	28	48	13.42	7.94	-13.42	-6.37	0.000	1.56
59	29	39	-0.02	0.01	0.02	-1.11	0.000	-1.11
60	30	31	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
61	32	33	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
62	34	35	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
63	35	36	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
64	35	37	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
65	35	38	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
66	35	39	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
67	37	44	50.61	0.54	-50.61	5.73	0.000	6.26
68	40	41	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
69	40	60	0.40	-0.13	-0.40	0.14	0.000	0.00
70	41	42	11.20	7.50	-11.20	-7.50	0.000	0.00
71	41	43	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
72	41	44	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
73	41	45	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
74	43	62	10.34	1.11	-10.21	-0.85	0.127	0.27
75	45	65	28.62	4.12	-28.09	-3.08	0.530	1.04
76	46	48	-5.76	7.03	5.76	-7.03	0.000	0.00
77	46	50	-23.74	-23.63	23.74	23.63	0.000	0.00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 15 – Resultado de fluxo de potência do ramo 77 até o 92º

77	46	50	-23.74	-23.63	23.74	23.63	0.000	0.00
78	46	51	29.50	16.60	-29.50	-16.60	0.000	0.00
79	47	48	-7.65	-14.96	7.65	14.96	0.000	0.00
80	47	54	10.68	7.52	-10.61	-7.33	0.069	0.18
81	49	50	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
82	49	57	-3.02	7.44	3.13	-7.21	0.104	0.22
83	52	55	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
84	53	54	-2.10	-1.60	2.10	1.60	0.000	0.00
85	53	58	3.10	1.93	-3.09	-1.91	0.012	0.03
86	56	57	3.12	-7.46	-3.12	7.46	0.000	0.00
87	56	63	-19.36	2.17	20.05	-0.76	0.691	1.41
88	58	59	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
89	59	60	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
90	61	64	4.24	-0.49	-4.20	0.52	0.040	0.04
91	63	65	0.00	0.00	-0.00	0.00	0.000	0.00
92	64	65	-28.62	-4.12	28.62	4.12	0.000	0.00
							--------	--------
						Total:	17.826	47.68

\>>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os desvios (ou erros) de potência conforme seções 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 em MVA são expressos a seguir com limite de 2 algarismos significativos:

Quadro 16 – Erros de potência em %

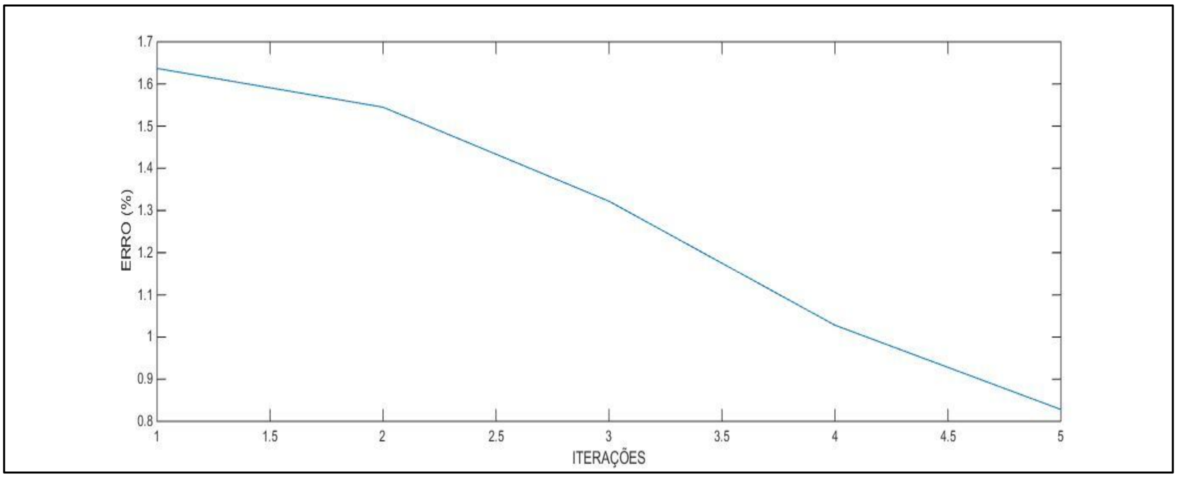
BARRA	DESVIO DE POTENCIA ATIVA	DESVIO DEPOTENCIA REATIVA
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	-0,01	0
6	-0,33	-0,04
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0,1	-0,03
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	-1	-0,36
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	0	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0
25	0	-0,01
26	0	0
27	0	0
28	0	0
29	0	0
30	0	0
31	0	-0,01
32	0	0
33	0	0
34	0	0
35	0	0
36	0	0,01
37	0	0
38	0	0
39	0,02	-0,01
40	0,4	-0,13
41	-0,12	0,03
42	0	0
43	0	0
44	0	0,01
45	0	0
46	0	0
47	0	0
48	0	0
49	0	0
50	0	0
51	0	0
52	0,33	-0,09
53	1	0,33
54	0	0
55	-0,34	0,07
56	0	0
57	-0,1	0,02
58	0	0
59	0	0
60	0	0
61	0	0
62	0	0
63	0	0
64	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que todos os desvios foram menores que 1% (ou 0,01 Pu) conforme tolerância definida no pacote computacional para essa simulação. Desse modo, concretiza-se a validação final do algoritmo desenvolvido para o sistema da plataforma IEEE. Portanto, o objetivo do presente trabalho foi concluído: O estudo e extensão das rotinas de fluxo de potência não linear do pacote computacional MATPOWER, de forma a torná-lo capaz de processar redes elétricas no nível de subestações, permitindo assim a representação de elementos internos a estas.

O algoritmo processou corretamente esse nível de tolerância e foram necessárias 5 iterações para atingir a precisão definida. Nesse caso, o perfil do erro durante o processamento em função das iterações ficou da seguinte forma:

Gráfico 02 – Comportamento do erro durante a simulação – Sistema IEE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme o gráfico 02 nota-se que houve uma queda significativa do erro a partir da segunda iteração. Após esse período de intervalo, o erro continuou a cair, porém com maior lentidão e suavização.

Além disso, foram feitas simulações com diferentes níveis de tolerância para elaboração de um estudo gráfico da relação entre o valor médio do erro máximo de potência em percentual e o número médio de iterações necessárias para atingir a convergência do método de Newton, após a realização de várias simulações de casos diferentes. Deste modo, conforme o gráfico a seguir:

Gráfico 03 – Erro x iterações atingidas – sistema IEEE

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o gráfico 03, nota-se que para uma tolerância de 0,01 PU, foram necessárias apenas oito iterações para convergência, porém, o erro máximo atingido foi próximo de 1%. Para tolerância de 0,001 PU, o erro máximo atingido foi de aproximadamente 0,01% e foram necessárias 10 iterações para convergência. Para tolerâncias a partir de 0,001 PU, foram necessárias 15 iterações e o erro máximo atingido foi de 0,0099%.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados e na validação da plataforma desenvolvida, os resultados atingiram o objetivo esperado e não foi necessária nenhuma alteração no plano de trabalho.

Por sua vez, a proposta de implementar a modelagem no nível de subestação para o pacote computacional MATPOWER obteve resultados satisfatórios e o objetivo deste trabalho foi alcançado.

A conclusão dos resultados destaca um processamento de menos de 1 segundo para convergência dos sistemas simulados, o que acarreta numa viabilidade computacional e diminuição dos custos computacionais de processamento de dados, fazendo com que a possibilidade da utilização deste software para sistemas de ordem cada vez maior seja alta. Porém, mesmo com êxito na convergência e no tempo de processamento, para realização de possíveis trabalhos futuros exigindo simulações de sistemas na ordem de 500 a 1000 barras e linhas de transmissão, é necessário avaliar a quantidade de iterações e o tempo de convergência, levando em consideração que a simulação de sistemas desta ordem não fez parte do escopo deste trabalho.

6 REFERÊNCIAS

BORGES JUNIOR, A. P. **Aplicação de fluxo de potência no nível de subestação à sistemas de potências reais.** Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 84 f. Curitiba 2009.

LOURENÇO, E. M. and Simões Costa, A. J. A. and Clements, K. A.. **Bayesian-based hypothesis testing for topological error identification in generalized state estimation**'. IEEE Trans. on Power System, 19(2), pp 1206 -1215, Maio 2004.

LOURENÇO, E. M. **Notas de aula da disciplina: análise e operação de sistemas elétricos de potência,** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

______. **Análise de observabilidade e identificação de erros de topologia na estimação de estados generalizada.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Santa Catarina, 147 f. Dezembro, 2001.

MONTICELLI, A. J.; GARCIA, A. **Introdução a sistemas de energia elétrica.** Campinas. Unicamp, 2003, VII, 25.

RIBEIRO, R. P.J. **fluxo de potência em redes modeladas no nível de subestação.** 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba 2005.

TELES M. S, **Fluxo linearizado no nível de subestação para o pacote computacional MATPOWER.** Trabalho de Iniciação Científica Publicado na SBPC (Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba 2009.

ZIMMERMAN, R. D. **Matpower 6.0 bl User’s Manual.** Artigo, Power Systems Engineering Research Center, Cornell University, Estados Unidos 2016.