

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
LUCAS BRITO SILVA

**INFLUÊNCIA DOS MODELOS DE MOTORES DE INDUÇÃO PARA O
CÁLCULO DE CURVAS PV'S EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

FORMIGA - MG

2016

LUCAS BRITO SILVA

**INFLUÊNCIA DOS MODELOS DE MOTORES DE INDUÇÃO PARA O
CÁLCULO DE CURVAS PV'S EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do IFMG-Formiga, como requisito obrigatório para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Renan Souza Moura.

FORMIGA - MG

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

LUCAS BRITO SILVA

**INFLUÊNCIA DOS MODELOS DE MOTORES DE INDUÇÃO PARA O
CÁLCULO DE CURVAS PV'S EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal Campus Formiga, como requisito obrigatório para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: 1 de dezembro de 2016.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renan Souza Moura - Orientador

Prof. Me. Mariana Guimarães dos Santos

Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio

Dedico este trabalho aos meus pais e familiares, por estarem sempre presentes ao meu lado. E à minha namorada, Priscilla, por sempre compartilhar dos momentos de alegria e dificuldades comigo. E ao meu padrinho Ronaldo (*in memorian*) por ter sempre me incentivado.

RESUMO

A modelagem da carga elétrica é algo essencial na área de estabilidade de sistemas elétricos de potência, pois uma descrição errada do tipo de carga pode afetar a tomada de decisão do operador do sistema e causar sérios danos ao sistema.

Assim, este trabalho de conclusão de curso busca descrever a influência de diferentes modelagens de motores de indução nas curvas PV's de sistemas elétricos de potência. Em outras palavras, é avaliado como o tipo de modelagem estática de motores de indução altera os valores das margens de carga de um sistema elétrico de potência.

Vários modelos de carga do tipo motor de indução são testados em um sistema elétrico de potência e os seus resultados estão devidamente indicados.

Palavras chave: Motores de Indução, Sistemas Elétricos de Potência, Fluxo de Potência.

ABSTRACT

The modeling of electric charge is really important when working in the power system stability area. An erroneous description of the type of load may affect the system operator's decision making, causing serious damage to the system.

Thus, this course conclusion work seeks to describe the influence of different modeling of induction motor in PV's curves of electric power system. In other words, it is evaluated how the type of motor's model load alters the values of load margin of an electric power system.

Several induction motor's models are tested in an electric power system and its results are properly indicated.

Keywords: Induction Motors, Electric Power Systems, Power Flow.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Exemplo de estator e rotor de um motor elétrico. | 16 |
| Figura 2 – Modelo de circuito equivalente convencional | 18 |
| Figura 3 - Fluxograma exemplificando um fluxo de potência básico | 22 |
| Figura 4 - Curva PV básica | 28 |
| Figura 5 - Exemplo de uma curva PV para um sistema com 14 barras | 28 |
| Figura 6 - Circuito equivalente de um motor de indução..... | 31 |
| Figura 7 - Circuito equivalente do motor de indução para o modelo 3 | 34 |
| Figura 8 - Circuito equivalente do motor de indução para o modelo 5 | 37 |
| Figura 9 - Sistema de teste com 10 barras..... | 38 |
| Figura 10 - Sistema com duas barras | 41 |
| Figura 11 - Curva PV para o modelo 1 | 42 |
| Figura 12 - Curva PV para o modelo 2 | 42 |
| Figura 13 - Curva PV para o modelo 3 | 43 |
| Figura 14 - Curva PV para o modelo 4 | 43 |
| Figura 15 - Curva PV para o modelo 5 | 44 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Características dos modelos de motores de indução..... | 31 |
| Tabela 2 - Parâmetros dos Transformadores em uma base de 100MVA..... | 39 |
| Tabela 3 - Parâmetros dos motores de indução em uma base de 100MVA..... | 39 |
| Tabela 4 - Resultados da rotina computacional para o Motor de Indução 1 | 40 |
| Tabela 5 - Resultados da rotina computacional para o Motor de Indução 2 | 40 |
| Tabela 6 - Resultados da rotina computacional para o Motor de Indução 3 | 40 |
| Tabela 7 - Parâmetros do motor do sistema com duas barras | 41 |
| Tabela 8 - Carga Máxima e Tensão Crítica para cada modelo..... | 44 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 VISÃO GERAL DO TRABALHO..... | 12 |
| 1.1 Introdução | 12 |
| 1.2 Objetivos..... | 14 |
| 1.3 Justificativa | 14 |
| 1.4 Estrutura do trabalho | 14 |
| 2 REVISÃO TEÓRICA SOBRE MOTORES | 15 |
| 2.1 Introdução | 15 |
| 2.2 Os motores elétricos de forma geral | 15 |
| 2.3 Os motores de Indução..... | 16 |
| 2.3.1 <i>Campo magnético girante e velocidade síncrona</i> | 16 |
| 2.3.2 <i>Escorregamento</i> | 17 |
| 2.3.3 <i>O circuito equivalente</i> | 18 |
| 3 O FLUXO DE POTÊNCIA E ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS | 20 |
| 3.1 Introdução | 20 |
| 3.2 Um pouco da história do Fluxo de Potência | 20 |
| 3.3 Equacionamento do Fluxo de Potência..... | 21 |
| 3.3 Processo de cálculo do Fluxo de Potência - Método de <i>Newton-Raphson</i> | 22 |
| 3.4 Conceitos básicos sobre estabilidade de sistemas elétricos | 24 |
| 3.5 Curvas PV's..... | 27 |
| 4. MODELOS DE UM MOTOR DE INDUÇÃO PARA O FLUXO DE POTÊNCIA | 30 |
| 4.1 Introdução | 30 |
| 4.2 Uma breve descrição sobre os modelos de motores de indução..... | 30 |
| 4.3 O circuito equivalente do motor de indução de indução trifásico | 31 |
| 4.4 Modelos de motores de indução trifásicos com potência constante..... | 32 |
| 4.4.1 <i>Modelo um - potência constante</i> | 32 |
| 4.4.2 <i>Modelo dois - potência constante</i> | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4.3 Modelo três - potência constante | 34 |
| 4.5 Modelos de motores de indução trifásicos com escorregamento constante..... | 35 |
| 4.5.1 Modelo quatro - escorregamento constante | 35 |
| 4.5.2 Modelo cinco - escorregamento constante..... | 37 |
| 5 ANÁLISE COMPUTACIONAL E SIMULAÇÕES DOS MODELOS | 38 |
| 5.1 Introdução | 38 |
| 5.2 O cálculo do fluxo de potência para cada modelo | 38 |
| 5.3 Levantamento das curvas PV's para cada modelo | 41 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 46 |
| REFERÊNCIAS..... | 48 |

1 VISÃO GERAL DO TRABALHO

1.1 Introdução

Os sistemas elétricos de potência têm evoluído rapidamente devido a grande demanda por energia elétrica, pois o conceito de uma única central geradora operando de forma isolada se transformou em um sistema altamente interconectado com tecnologias que beneficiam cada agente atuante (SAUER; PAI, 1997).

A dificuldade de operação e planejamento dos sistemas elétricos de potência se eleva conforme o crescimento da demanda por energia elétrica e o aumento das dimensões dos sistemas elétricos de potência, aumentando assim a necessidade de ferramentas capazes de guiar a operação e auxiliar o planejamento do sistema para assegurar o correto funcionamento e fornecimento de energia elétrica (ABRANTES, 2013).

Um dos principais componentes de um sistema elétrico são os motores de indução. Tais equipamentos estão presentes em diferentes tipos de plantas e participam de diferentes tipos de processos. Assim, as cargas de motores de indução devem ser sempre consideradas pelos estudos de sistema de potência (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010) e (WEG, 2016).

Elevações abruptas da carga com a partida de motores elétricos de grande porte podem reduzir o perfil de tensão do sistema elétrico de potência, afetando assim a capacidade do sistema de potência manter níveis aceitáveis de tensão (FRANCISCO, 2005). Além desta redução do perfil de tensão, motores elétricos de grande porte podem causar afundamentos de tensão. Estes são fenômenos eletromagnéticos de curta duração, caracterizados por uma redução no valor eficaz da tensão, tem duração entre 0,5 ciclos e 1 minuto e magnitude entre 0,1 e 0,9 p.u. (ANEEL, 2016).

A instabilidade de tensão é o estado de operação do sistema elétrico de potência onde a tensão reduz, e as ações automáticas de controle ou dos operadores não conseguem evitar essa redução (CONDEGA, 2013.). Estas análises têm sido uma das principais áreas de atração para engenheiros e pesquisadores na área de operações e planejamento de sistemas elétricos de potência nos últimos anos (AREE, 2005).

A instabilidade de tensão pode ocorrer devido a uma perturbação e elevação da carga ou alteração abrupta da carga, como foi supracitado no caso de motores grande porte. A instabilidade pode se manifestar de diversas maneiras, dependendo das características das cargas e do desempenho dos equipamentos de controle de tensão (MENDES, 2006).

Uma das principais contribuições do estudo de estabilidade de tensão é a obtenção do limite máximo de transferência de potência de um sistema. Para isso os métodos de fluxo de potência têm sido amplamente utilizados, como uma condição inicial para o estudo de estabilidade de sistemas elétricos. Além disso, estes estudos utilizando o fluxo de potência são de grande importância para o planejamento e expansão de sistemas elétricos de potência, além de auxiliar na localização no melhor ponto de operação de sistemas já existentes (ALVES *et al.*, 2003).

As informações principais obtidas ao final do cálculo de fluxo de potência são a magnitude da tensão e ângulo de fase de cada barramento e as potências ativas e reativas de cada linha (GRAINGER; STEVENSON, 1994). Atualmente, existem diversos métodos para o cálculo do fluxo de potência. Porém o método de *Newton-Raphson* é o mais utilizado devido a sua facilidade de convergência. A análise do fluxo de potência interessa-se em obter uma solução do sistema operando em regime permanente, portanto a modelagem do sistema é estática, ou seja, não há variação transitória (BORGES, 2005).

Todo o sistema elétrico de potência está susceptível à ocorrência de faltas e instabilidade de tensão durante a operação, e como ultimamente os sistemas elétricos têm trabalhado muito próximos de seus limites de carregamento, novas questões relacionadas à instabilidade estão surgindo. Problemas advindos da instabilidade de tensão podem contemplar fenômenos de curtíssima duração até fenômenos de horizontes de minutos e horas, tornando assim a análise complexa (ALMEIDA, 2010). E de acordo com (REIS, 2005) “A estabilidade de tensão é a capacidade de se manter os níveis de tensão dentro de limites aceitáveis, em todos os barramentos do SEP, quer sob condições normais de exploração ou após a ocorrência de perturbação”.

Durante a operação de um sistema elétrico de potência um dos principais objetivos é manter todo o sistema estável. Deste modo, é necessário um profundo conhecimento da forma de operação e desempenho de cada componente presente no sistema elétrico. Portanto, a correta representação destes componentes em um sistema elétrico de potência é um fator decisivo para a confiabilidade e precisão dos resultados. Assim, este trabalho visa demonstrar como os modelos de motores de indução propostos por (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010) podem influenciar os valores de margem de carga de curvas PV's. A margem de carga é definida como a distância entre o ponto operativo e o ponto de máximo carregamento em um sistema elétrico de potência. Os gráficos que indicam os pontos de máximos carregamentos são conhecidos como curvas PV's, estas curvas serão explicadas futuramente ao longo deste trabalho.

1.2 Objetivos

Estudar o comportamento das curvas PV's para diferentes modelos de motores de indução. Como um objetivo secundário, pretende-se demonstrar porque é tão importante modelar corretamente este tipo de carga em sistemas elétricos de potência.

1.3 Justificativa

Como os motores de indução são amplamente utilizados atualmente devido a sua robustez e confiabilidade, a sua correta modelagem torna-se um ponto fundamental. Como esta modelagem pode variar as margens de carga e o suporte de potência reativa de um sistema, o operador de um sistema deve ficar atento a esta questão quando precisar executar uma ação de controle.

1.4 Estrutura do trabalho

Além do atual capítulo introdutório, que aborda os conceitos iniciais, este trabalho contém mais cinco capítulos, e terá a seguinte estrutura:

- No capítulo dois será apresentada uma revisão de fundamentos teóricos sobre motores elétricos.
- O equacionamento do fluxo de potência e alguns conceitos sobre estabilidade de tensão serão apresentados no capítulo três.
- O capítulo quatro irá apresentar o equacionamento de cada modelo de motor de indução.
- As simulações dos modelos serão feitas no capítulo cinco, onde serão apresentadas as suas respectivas curvas PV's.
- No capítulo seis são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA SOBRE MOTORES

2.1 Introdução

Este capítulo irá apresentar uma breve revisão bibliográfica de alguns aspectos teóricos sobre motores elétricos. O correto entendimento deste capítulo é necessário para uma melhor compreensão dos próximos capítulos, que irão enfatizar os diferentes modelos de motores de indução na modelagem de um fluxo de potência.

2.2 Os motores elétricos de forma geral

Os motores elétricos estão presentes na maioria dos equipamentos industriais, hospitalares e até em simples eletrodomésticos, devido a sua simplicidade, robustez e baixo custo. Segundo a (WEG, 2016) motores elétricos são máquinas destinadas a transformar energia elétrica em energia mecânica. Estes são amplamente usados atualmente, pois apresentam baixo custo, alto rendimento, grande versatilidade de adaptação à diferentes tipos de cargas. E de acordo com a (ELETROBRÁS, 2009) cerca de 60% a 70% da energia elétrica produzida no mundo é utilizada unicamente para acionar motores elétricos. Os tipos mais comuns de motores elétricos são (WEG, 2016):

- Motores de corrente contínua: apresentam um custo mais elevado e precisam de uma fonte de corrente ou de um dispositivo que possa converter a corrente alternada em contínua. Funcionam com velocidade ajustável, e são usados para controles de grande flexibilidade e precisão.
- Motores de corrente alternada: São os mais utilizados devido a distribuição elétrica que é feita em corrente alternada, ou seja, não necessitam de nenhum dispositivo de conversão. Existem dois tipos de motores de corrente alternada. O motor síncrono é um deles, funciona com velocidade fixa, sem interferência do escorregamento. O outro tipo de motor de corrente alternada é o motor de indução ou motor assíncrono, funciona normalmente com velocidade constante, variando ligeiramente com a carga que é aplicada ao eixo.

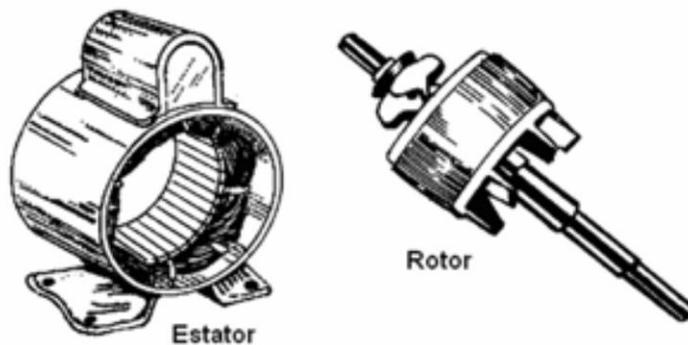
O presente trabalho tem como foco os motores de indução trifásicos e os seus modelos de circuitos equivalentes, portanto quando se refere à motores, está fazendo menção a motores de indução trifásicos.

2.3 Os motores de Indução

Uma característica que distingue os motores de indução dos outros tipos de motores é que os motores de indução são máquinas que possuem excitação única. Muito embora os motores de indução sejam munidos com um enrolamento de campo e com um enrolamento de armadura, em condições normais de funcionamento é utilizado apenas um enrolamento, o enrolamento de armadura (TORO, 2009).

No enrolamento de armadura as correntes circulam por indução, criando assim uma distribuição ampère-condutor que irá interagir com a distribuição de campo, produzindo assim um torque unidirecional. Já a relação entre a velocidade do rotor e a frequência da corrente de armadura resulta em outra distribuição ampère-condutor que é estacionária em relação à distribuição de armadura (TORO, 2009) e (KOSOW, 2008).

Figura 1 - Exemplo de estator e rotor de um motor elétrico.



Fonte: Eletrobrás, 2009

2.3.1 Campo magnético girante e velocidade síncrona

Ao se aplicar uma corrente elétrica a uma bobina é criado um campo magnético orientado de acordo com o eixo da bobina e de valor proporcional à corrente aplicada. Assim, fazendo uma analogia a bobina, quando a corrente alternada é aplicada ao enrolamento do estator do motor de indução é percorrido por uma tensão e produz-se um campo magnético girante (WEG, 2016).

O campo girante criado pelo enrolamento do estator induz tensões no rotor, e, portanto é gerado um campo no rotor, de polaridade oposta à do campo girante do estator. Logo, o

rotor gira no sentido deste fluxo, para reduzir a intensidade da indução acionando assim a carga através do conjugado motor que é desenvolvido no rotor (WEG, 2016) e (TORO, 2009).

Quando um motor opera a vazio, existem poucas forças de resistência que se opõe ao movimento deste, e a velocidade desenvolvida pelo motor é próxima da velocidade síncrona. Entretanto, a velocidade desenvolvida pelo rotor não pode ser nunca igual à velocidade síncrona. A rotação do campo girante está diretamente ligada à velocidade síncrona do motor. Esta depende do número de polos do motor e da frequência da rede em que o motor opera (WEG, 2016).

Os enrolamentos dos motores de indução são construídos com um ou mais pares de polos, e o campo girante percorrerá um par de polos a cada ciclo. Portanto, para uma máquina que possui dois polos, cada ciclo de variação da corrente produzirá uma rotação completa do campo do fluxo, já para uma máquina que possui quatro polos será necessário dois ciclos de variação da corrente para produzir uma rotação completa do fluxo (TORO, 2009).

2.3.2 Escorregamento

A relação na qual o campo do estator “corta” as bobinas do rotor diminui de acordo com que o rotor aumenta sua velocidade. Isso diminuirá as correntes induzidas, reduzindo assim o torque fornecido. Isto ocorre até que o rotor atinja uma velocidade para produzir apenas a corrente necessária para desenvolver um torque igual ao torque contrário que resulta das perdas por atrito (TORO, 2009). Ou seja, se a velocidade desenvolvida pelo motor é diferente da velocidade síncrona, correntes induzidas circularão pelo motor, portanto quanto maior carga, maior deverá ser o torque necessário para acioná-la (WEG, 2016).

Essa diferença entre a velocidade desenvolvida pelo motor e a velocidade síncrona é chamada de escorregamento, e de acordo com (TORO, 2009) “Escorregamento é usado porque descreve o que um observador acavalado no campo do estator vê olhando para o rotor – ele parece ter escorregado para trás”. O escorregamento é dado pela seguinte equação:

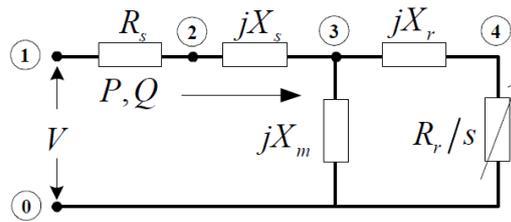
$$s = \frac{n_s - n}{n}$$

Onde n_s é a velocidade síncrona e n é a velocidade desenvolvida pelo rotor do motor. Pode ser expresso em rotações por minuto. O valor do escorregamento vai variar então de acordo com a carga que é aplicada ao eixo do motor.

2.3.3 O circuito equivalente

Ao longo deste trabalho serão utilizados diferentes modelos de motores de indução. Como exemplo, um dos modelos proposto por (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010), está representado na Figura 2, este modelo foi obtido através de análise feita em espaço de estados.

Figura 2 – Modelo de circuito equivalente convencional



Fonte: Carmona-Sánchez; Ruiz-Vega, 2010

O modelo supracitado possui as seguintes características:

Como parâmetros:

- R_s, X_s = Resistência e reatância do enrolamento do estator.
- R_r, X_r = Resistência e reatância do enrolamento do rotor.
- X_m = Reatância de magnetização.

Como variáveis:

- V = Tensão terminal.
- P = Potência Ativa.
- Q = Potência Reativa.
- s = Escorregamento do rotor.

As potências ativa e reativa podem ser encontradas respectivamente através das seguintes equações, em termos das variáveis e parâmetros citados acima:

$$P = \frac{|V|^2 \left\{ \left(\frac{R_r}{s} \right) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] + K_1 \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2} \quad (1)$$

$$Q = \frac{-|V|^2 \left\{ (K_1) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] + \left(\frac{R_r}{s} \right) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2} \quad (2)$$

Onde $K_1 = X_r + X_m$.

Os demais modelos de motores de indução propostos por (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010) serão apresentados no capítulo quatro, pois é necessário que o leitor tenha entendido os conceitos envolvendo fluxo de potência.

3 O FLUXO DE POTÊNCIA E ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS

3.1 Introdução

Para que o leitor familiarize com a proposta deste trabalho, faça-se necessário o conhecimento dos temas fluxo de potência e estabilidade de sistemas elétricos de potência. Assim, este capítulo inicia-se com o tema de fluxo de potência ao realizar um levantamento bibliográfico sobre este tema, além de demonstrar quais são as equações envolvidas e como o processo de cálculo é realizado. Em relação ao tema estabilidade de tensão, também será efetuado um levantamento bibliográfico na área de estabilidade de sistemas elétricos, com foco na análise de pequenos sinais, onde as curvas PV's estão inseridas. Análises de pequenos sinais envolvem variações incrementais do parâmetro que altera o ponto de equilíbrio do sistema elétrico de potência. Como exemplo de parâmetro deste tipo, segue a alteração de carga elétrica ao longo do dia.

3.2 Um pouco da história do Fluxo de Potência

Os métodos de solução utilizando o fluxo de potência até os meados de 1961 eram todos iterativos e se fundamentavam na sua maioria em métodos de deslocamento sucessivos, como o método de *Gauss-Seidel*. Nesta mesma época já haviam notado que o método de *Gauss-Seidel* apresentava sérios problemas de convergência quando o sistema elétrico apresentava reatâncias series negativas não compensadas ou quando ocorriam impedâncias com grande variação terminando nas mesmas barras (BARBOSA, 1995). Em contrapartida, quase na mesma época, o método de *Newton-Raphson* aplicado ao fluxo de potência, mostrou ser altamente eficiente, possuindo um alto poder de convergência, além de conseguir resolver os problemas que não apresentavam solução no método de *Gauss-Seidel* (BARBOSA, 1995).

Planejamento do sistema elétrico de potência, planejamento operacional, e controle do sistema elétrico são algumas aplicações para o fluxo de potência. Além dessas aplicações o fluxo de potência tem sido cada vez mais utilizado em grandes sistemas para resolver uma vasta gama de casos de otimização e estabilidade. Atualmente, existem diversos métodos para o cálculo do fluxo de potência, cada um com diferentes abrangências e peculiaridades (STOTT, 1974). Contudo, neste trabalho adotou-se o método de *Newton Raphson* para programar a rotina computacional do cálculo do fluxo de potência.

3.3 Equacionamento do Fluxo de Potência

O cálculo do fluxo de potência consiste basicamente na determinação do estado da rede, da distribuição dos fluxos, das tensões nas barras e das correntes nos elementos. Nesta análise é obtida uma solução para o sistema operando em regime permanente, portanto a modelagem do sistema é estática, não havendo variação transitória (BORGES, 2005).

Os cálculos referentes ao fluxo de potência exigem a solução de um sistema de duas equações algébricas não lineares para cada barra do sistema. É possível expressar essas equações com o auxílio da primeira lei de *Kirchhoff* que trata da conservação das potências ativas e reativas em cada barra do sistema, e com a utilização da segunda lei de *Kirchhoff*, que descreve a possibilidade de expressar os fluxos de potência nos componentes internos em função das tensões dos nós terminais (STOTT, 1974). Essas equações serão ilustradas a seguir.

Para cada barra do sistema elétrico analisado são associadas seis incógnitas:

- Potência ativa e reativa gerada.
- Potência ativa e reativa consumida.
- Tensão e ângulo.

Porém, o valor de potência consumida pela carga é conhecido em todas as barras, reduzindo assim o número de incógnitas para quatro incógnitas, e duas delas irão entrar no cálculo do fluxo de potência como dados de entradas, ou seja, são conhecidas, restando assim apenas duas incógnitas. Para auxiliar no cálculo do fluxo de potência os tipos de barras podem ser definidos a partir das incógnitas nodais conhecidas (BORGES, 2005) e (MONTICELLI, 1983). Portanto, existem três tipos de barras, sendo elas:

- Barras PQ ou barras de carga:
 - Potência ativa e reativa injetada na barra são conhecidas
 - Não existe geração de nenhum tipo.
 - Calcula-se a magnitude da tensão e o ângulo da tensão na barra.
- Barras PV ou barras de geração ou barras de tensão controlada.
 - Potência ativa injetada e magnitude da tensão na barra são conhecidas.
 - Calcula-se a potência reativa gerada e o ângulo da tensão na barra.
- Barra $V\theta$ ou barras de referência ou *swing* ou *slack*:
 - Magnitude da tensão e o ângulo da tensão na barra são conhecidos.
 - Calcula-se a potência ativa e reativa injetadas na barra.

O conjunto de equações é obtido através da análise feita para cada tipo de barra utilizando as leis de Kirchhoff, estas equações de injeções de potência são expressas por:

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

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

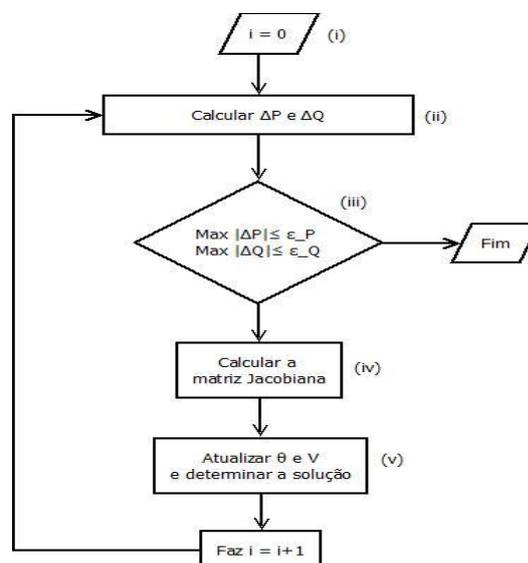
Onde:

- V_k, V_m são as magnitudes das tensões das barras terminais do ramo km .
- θ_{km} são os ângulos das tensões das barras terminais do ramo km .
- P_k é a potência ativa líquida na barra k .
- Q_k é a Potência reativa líquida na barra k .
- G_{km}, B_{km} são os valores referentes a matriz de admitância nodal.

3.3 Processo de cálculo do Fluxo de Potência - Método de *Newton-Raphson*

Para o cálculo do fluxo de potência será utilizado o método de *Newton-Raphson* para sistemas elétricos, este será descrito a seguir em forma de fluxograma e será dada uma breve explicação de cada etapa para um melhor entendimento. Foi apresentada então até o presente momento a formulação básica para o cálculo do fluxo de potência, como as equações básicas tratadas acima, a descrição e definição de cada tipo de barra presente em um sistema elétrico de potência.

Figura 3 - Fluxograma exemplificando um fluxo de potência básico



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para a etapa (i) as variáveis iniciais dos ângulos das tensões das barras PQ e PV e magnitude das tensões nas barras PQ são escolhidas, e o incremento i é iniciado como zero. Para a etapa (ii) é necessário calcular $P_K(V^i, \theta^i)$ para as barras PQ e PV, e calcular $Q_K(V^i, \theta^i)$ para as barras PQ, e determinar os resíduos ΔP_k^i e ΔQ_k^i . Para a etapa (iii) é testado a convergência do método, se $Max\{|\Delta P_k^i|\} \leq \varepsilon_P$ e $Max\{|\Delta Q_k^i|\} \leq \varepsilon_Q$ o processo iterativo convergiu para a solução (V^i, θ^i) ; caso contrário é necessário ir para a etapa (iv), que diz respeito ao cálculo da matriz Jacobiana representada abaixo, e deve ser calculada da seguinte forma:

$$J = \begin{pmatrix} H & N \\ M & L \end{pmatrix}$$

Onde as componentes H, N, M, L são dadas por:

$$H \begin{cases} H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -Q_k - V_k^2 B_{kk} \end{cases}$$

$$N \begin{cases} N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k^{-1} (P_k + V_k^2 G_{kk}) \end{cases}$$

$$M \begin{cases} M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = P_k - V_k^2 G_{kk} \end{cases}$$

$$L \begin{cases} L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = V_k^{-1} (Q_k - V_k^2 B_{kk}) \end{cases}$$

Para a etapa seguinte, etapa (v), é necessário a resolução do sistema linear a seguir:

$$\begin{pmatrix} \Delta \theta^i \\ \Delta V^i \end{pmatrix} = J(V^i, \theta^i)^{-1} \times \begin{pmatrix} \Delta P(V^i, \theta^i) \\ \Delta Q(V^i, \theta^i) \end{pmatrix}$$

E determinar a solução (V^{i+1}, θ^{i+1}) , onde:

$$\theta^{i+1} = \theta^i + \Delta \theta^i$$

$$V^{i+1} = V^i + \Delta V^i$$

Após a etapa descrita acima, a partir das tensões nas barras são calculadas as potências ativa e reativa e os resíduos de cada barra do sistema elétrico de potência. Caso estes resíduos estejam dentro de um valor de tolerância pré-determinado, o processo iterativo convergiu para

uma solução. Caso contrário, é feito um incremento no número de iterações, e o cálculo volta à etapa (ii) (PASSOS FILHO, 2000).

A dificuldade do cálculo do fluxo de potência aumenta de acordo com o número de barras dos sistemas elétricos de potência. Sistemas de grande porte, por exemplo, necessitam de um número maior de iterações e conseqüentemente maior poder computacional, portanto dificultando a convergência rápida deste método (BORGES, 2005). O cálculo do fluxo de potência como descrito pelo fluxograma acima é considerado uma condição inicial para os estudos de estabilidade de tensão, onde se busca uma condição operativa para um certo ponto, e a matriz Jacobiana, J , é uma linearização em torno deste ponto de equilíbrio.

As análises utilizando o fluxo de potência devem ser feitas em regime permanente, e se baseiam nas equações do fluxo de potência apresentadas, estas análises são para pequenos sinais devido à limitação das equações algébricas que compõem este cálculo do fluxo de potência (MACIEL FILHO, 2006). A seguir será descrito alguns conceitos importantes e relevantes sobre os estudos de estabilidade de tensão.

3.4 Conceitos básicos sobre estabilidade de sistemas elétricos

A estabilidade é uma condição de equilíbrio entre forças opostas. A estabilidade de um sistema de potência é a “habilidade” que um sistema elétrico de potência tem em manter um ponto de equilíbrio sob condições normais de operação e permanecer em um estado aceitável depois de ter sofrido algum distúrbio (KUNDUR, 1994).

Portanto, a estabilidade de tensão é a capacidade de um sistema elétrico de potência manter as tensões em regime permanente em níveis aceitáveis para todas as barras do sistema durante condições normais de operação ou depois de um distúrbio (KUNDUR, 1994). Quando ocorre uma perturbação ou crescimento na demanda da carga ou uma mudança abrupta nas condições um sistema elétrico de potência pode sofrer instabilidade de tensão, causando uma progressiva e incontrolável queda ou elevação da tensão (MACIEL FILHO, 2006).

Já a estabilidade angular está ligada diretamente à capacidade dos geradores síncronos interligados de permanecerem em equilíbrio (sincronismo) em regime normal de operação e após a ocorrência de um distúrbio. Este equilíbrio está ligado à capacidade de manter ou restaurar o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o mecânico de cada máquina. Do contrário, ocorrerá um aumento das oscilações angulares de uma das máquinas geradoras, levando a perda de sincronismo com as outras máquinas geradoras, levando a instabilidade do sistema elétrico (MACIEL FILHO, 2006).

Além da carência de investimento em sistemas elétricos e o já citado crescimento da carga/demanda, os principais fatores que contribuem com problemas relacionados à falta de estabilidade são: elevado valor de geração de potência reativa, características inerentes às cargas, como as características dos motores de indução de uma indústria, características dos dispositivos compensadores de reativos, e a ação de dispositivos de controles de tensão (KUNDUR, 1994).

Existe uma distinção entre instabilidade de tensão e colapso de tensão. A instabilidade de tensão pode provocar elevação ou redução dos níveis de tensão, já o colapso de tensão está ligado diretamente a sequência de acontecimentos que acompanham a instabilidade de tensão, por exemplo, a queda a níveis inaceitáveis de tensão de operação. O colapso de tensão pode estar associado tanto com a instabilidade de tensão como com a instabilidade angular (TAYLOR, 1997) e (KUNDUR; MORISON, 1997).

Muitos sistemas elétricos de potência já passaram ou estão passando por problemas de instabilidade de tensão e estes problemas são muitas vezes responsáveis por colapsos e muitos destes fenômenos são resultados de pequenas perturbações (SOUZA, 1998) e (KUNDUR, 1994). As linhas de transmissão com excesso de carregamento, fontes de potência reativa insuficientes e transmissão de potência por longas distâncias são fatores que também contribuem e estão associados a problemas de estabilidade de tensão e colapso de tensão (KUNDUR; MORISON, 1997).

A incapacidade de um sistema de potência em manter um adequado balanço de potência reativa e prover um suporte apropriado de tensão são os principais fatores responsáveis pela instabilidade de um sistema elétrico de potência. São delineadas a seguir algumas características referentes aos elementos presentes em um sistema elétrico de potência que serão de interesse para a compreensão destes fatores que contribuem para a instabilidade de tensão (KUNDUR, 1994).

A capacidade de fornecimento de potência reativa dos geradores é restringida pelas correntes de campo e armadura. Mesmo que transitoriamente alguns geradores fornecem potência reativa além destas restrições, porém as atuações dos reguladores de tensão provocam uma redução desta potência (MACIEL FILHO, 2006).

O desempenho de uma linha de transmissão é condicionado ao carregamento. As linhas de transmissão produzem potência reativa proporcional ao quadrado da tensão e consomem potência ativa e reativa proporcional ao quadrado da corrente. Desta maneira, a potência reativa líquida de uma linha de transmissão altera com o ciclo de carga, sendo as

condições de sobrecarga as mais críticas em relação à estabilidade de tensão, podendo as perdas elétricas e quedas de tensão de tensão tornarem-se elevadas (MACIEL FILHO, 2006).

Os bancos de capacitores *shunt* são de longe as formas mais comuns de obter potência reativa. Entretanto, apesar deste suporte local de potência reativa, existe o inconveniente fornecimento desta potência em função do quadrado da tensão, podendo não produzir resultados satisfatórios em condições de operação com tensões baixas. Os compensadores estáticos apresentam uma maior flexibilidade, contudo, ao atingirem seus limites de geração de potência reativas estes se tornam capacitores *shunt* (KUNDUR, 1994) e (MACIEL FILHO, 2006).

Os capacitores em série têm sido aplicados às linhas curtas com intuito de melhorar a estabilidade de tensão, além de inicialmente trazer benefícios para estabilidade angular. Isso advém das características de auto regulação inerente aos capacitores em série, que produzem potência reativa proporcional ao quadrado da corrente e não depende da tensão nas barras, permitindo assim reduzir a queda de tensão resultante da reatância da linha. Contudo, a aplicação destes capacitores podem contribuir para o aparecimento de ressonância sub síncrona, sendo necessária a utilização de dispositivos especiais para mitigar uma provável sobretensão (MACIEL FILHO, 2006).

Um modelo de carga é a representação matemática da relação entre as potências ativa e reativa e a tensão com sua frequência e amplitude em uma barra, ou corrente fluindo para uma carga (IEEE, 1993). Os modelos que representam o comportamento da carga com a tensão são geralmente classificados em modelos estáticos e modelos dinâmicos. Nos próximos parágrafos serão apresentadas descrições referentes a estes modelos.

Os modelos estáticos de carga expressam as potências ativa e reativa de um barramento em um determinado instante de tempo como função da magnitude da tensão nesse barramento para este instante de tempo. Estes modelos são comumente usados para representar dispositivos com cargas estáticas, por exemplo, cargas resistivas e iluminação. Estes modelos são utilizados também como uma aproximação para componentes com cargas dinâmicas, por exemplo, cargas acionadas por motores elétricos (IEEE, 1993). Um modelo estático muito empregado é o modelo polinomial ou modelo “ZIP” de cargas, e é representado pelas seguintes equações:

$$P = P_o \left[a_1 \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + a_2 \left(\frac{V}{V_o} \right) + a_3 \right]$$

$$Q = Q_o \left[a_4 \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + a_5 \left(\frac{V}{V_o} \right) + a_6 \right]$$

Nas equações citadas na página anterior P e Q são as potências ativa e reativa da carga respectivamente, V é a tensão no barramento, e V_0 é a tensão inicial ou nominal do barramento, os parâmetros a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 e a_6 definem as magnitudes das parcelas de carga que se comportam como impedância constante (a_1 e a_4), corrente constante (a_2 e a_5) e potência constante (a_3 e a_6). Este modelo é mencionado como modelo “ZIP” porque consiste na soma da impedância constante (Z), corrente constante (I) e potência constante (P) (MACIEL FILHO, 2006) e (IEEE, 1993).

Os modelos dinâmicos de carga são representados por equações diferenciais, e devido ao seu elevado detalhamento podem reproduzir o comportamento da carga durante transitórios elétricos, bem como o comportamento em regime permanente. Uma grande variedade de equações diferenciais pode ser utilizada neste modelo. Contudo, os programas de análise de estabilidade só usam a representação por modelos dinâmicos quando existe uma parcela considerável da carga com comportamento dinâmico (MACIEL FILHO, 2006).

Os modelos dinâmicos de carga expressam as potências ativa e reativa de um barramento em um dado instante de tempo como função da magnitude da tensão nesse barramento em um instante que já passou, alguns levam em consideração o instante presente. Cargas onde a resposta a um distúrbio não é instantânea, como os motores elétricos, podem requerer esse tipo de modelo para melhorar a precisão e acurácia dos cálculos (IEEE, 1993).

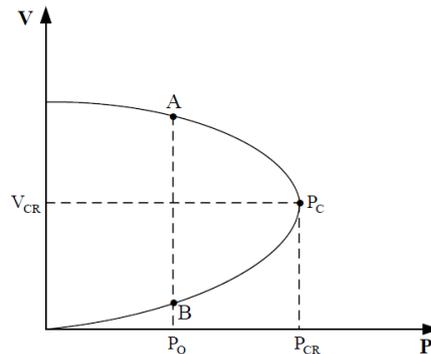
O próximo item irá descrever uma importante ferramenta para análise de estabilidade tensão. As curvas PV's permitem a fácil compreensão das condições de operação de um sistema elétrico de potência e tem sido amplamente utilizadas nos estudos de operação e planejamento de sistemas. Portanto, através destas curvas é possível extrair informações importantes sobre a estabilidade de tensão de sistemas elétricos de potências.

3.5 Curvas PV's

Como já citado as curvas PV's são ferramentas amplamente utilizadas nas análises de estabilidade. Estas curvas representam o relacionamento entre a magnitude da tensão em um barramento e o crescimento da carga. Elas são feitas para as barras de carga e são obtidas realizando um incremento contínuo da carga nessas barras. Essas curvas são realizadas através de sucessivos fluxos de potência. Assim, as curvas PV's indicam o acréscimo máximo de carga que um sistema elétrico de potência pode sustentar (MOURA *et al.*, 2016) e (CONDEGA, 2013.).

A curva PV possui pontos em que o funcionamento do sistema é estável, porém ao atingir a carga máxima, esse ponto operativo do sistema é perdido, ou seja, ao atingir a carga máxima não existe ponto operativo. A distância entre o ponto de funcionamento e a carga máxima é conhecida como margem de carga (REIS, 2005). A figura a seguir mostra a forma padrão de uma curva PV.

Figura 4 - Curva PV básica

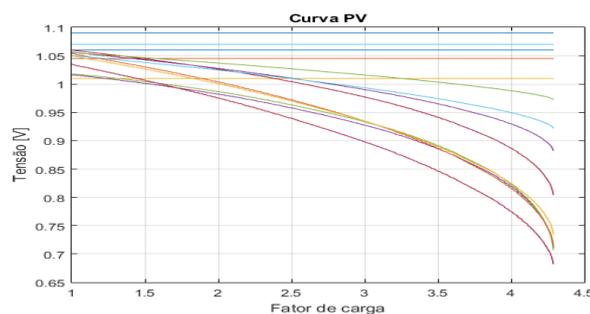


Fonte: Reis, 2005

O ponto P_C da Figura 4 ilustra a ocorrência da carga máxima que o sistema elétrico consegue atingir, ou seja, é ponto de limite máximo de transferência de potência. Outro ponto importante é a tensão crítica, V_{CR} , que corresponde à tensão correspondente à potência máxima transmissível. Para potências menores que P_{CR} existe sempre dois valores de tensão, os pontos com funcionamento estáveis que estão na parte superior e os pontos instáveis na que estão na parte inferior da curva, descritos pelos pontos A e B respectivamente, e pela potência P_O .

Portanto, o ponto A corresponde às condições normais de funcionamento, onde o aumento da carga está associado à queda de tensão, o que é esperado para condições normais de operação, e o ponto B , ocorre quando a tensão é mais baixa e a corrente é elevada (REIS, 2005). A Figura 5 demonstra uma curva PV de um sistema com 14 barras.

Figura 5 - Exemplo de uma curva PV para um sistema com 14 barras



Fonte: Elaborado pelo Autor

Este capítulo apresentou elementos sobre fluxo de potência e estabilidade de sistemas elétricos. Foi feito inicialmente um levantamento bibliográfico sobre fluxo de potência, e logo após foi apresentado alguns tópicos importantes da área de estabilidade de sistemas elétricos. Dentro destes tópicos da área de estabilidade foram explorados alguns conceitos iniciais sobre os modelos de carga. Estes conceitos sobre os modelos de carga serão utilizados novamente no próximo capítulo. Portanto no próximo capítulo irão ser apresentados a seguir com maior ênfase os modelos propostos por (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010) para os motores de indução.

4. MODELOS DE UM MOTOR DE INDUÇÃO PARA O FLUXO DE POTÊNCIA

4.1 Introdução

No capítulo de revisão teórica sobre motores foi feito um breve levantamento bibliográfico de alguns aspectos teóricos sobre motores elétricos, já neste capítulo será novamente introduzido o modelo estático de um motor de indução e serão apresentados os modelos complementares propostos por (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010). O correto entendimento deste capítulo é essencial para uma melhor compreensão dos resultados que irão ser apresentados para cada um destes modelos propostos.

4.2 Uma breve descrição sobre os modelos de motores de indução

Os modelos de motores de indução proposto por (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010) podem ser divididos em duas categorias principais: modelos de potência constante e modelos de escorregamento constante.

Os modelos de motores de potência constante são os modelos um, dois e três. O modelo um é o mais simples e o mais utilizado entre os programas de simulação comerciais. O modelo dois se assemelha bastante ao modelo um, porém é feita uma modificação na matriz Jacobiana, melhorando a precisão deste modelo. O modelo três mantém a potência constante ao longo do cálculo do fluxo de potência e executa uma modificação do circuito equivalente do motor.

Os modelos quatro e cinco são modelos que possuem escorregamento constante. O modelo quatro também modifica a matriz Jacobiana como o modelo dois, porém o escorregamento é mantido constante ao longo do cálculo do fluxo de potência. O modelo cinco mantém o valor do escorregamento igual ao valor inicial, deste modo a resistência do rotor é considerada constante, este modelo também pode ser facilmente inserido em programas de simulação comerciais, pois este modelo não modifica a matriz Jacobiana.

A tabela a seguir apresenta de forma simplificada algumas características dos modelos supracitados:

Tabela 1 - Características dos modelos de motores de indução

| Modelo | Potência Constante | Escorregamento Constante | Modifica a Matriz Jacobiana | Modifica o Circuito Equivalente |
|--------|--------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | X | | | |
| 2 | X | | X | |
| 3 | X | | | X |
| 4 | | X | X | |
| 5 | | X | | X |

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3 O circuito equivalente do motor de indução de indução trifásico

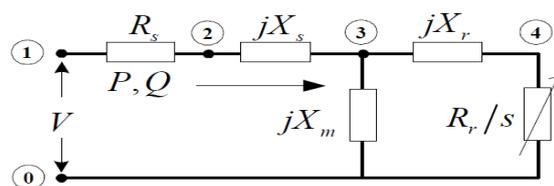
Para o modelamento de motores de indução trifásicos, é utilizado o circuito representado pela Figura 2, o circuito equivalente do motor de indução já citado no capítulo de revisão teórica sobre motores. As equações a seguir representam as potências ativa e reativa consumidas em um motor.

$$P = \frac{|V|^2 \left\{ \left(\frac{R_r}{s} \right) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] + K_1 \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2} \quad (1)$$

$$Q = \frac{-|V|^2 \left\{ (K_1) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] + \left(\frac{R_r}{s} \right) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2} \quad (2)$$

Onde $K_1 = X_r + X_m$.

Figura 6 - Circuito equivalente de um motor de indução



Fonte: Carmona-Sánchez; Ruiz-Vega, 2010

Pode ser analisado a partir destas equações e do circuito representado pela Figura 2. Este circuito equivalente possui quatro variáveis e apenas duas equações. Como a tensão terminal, V , é sempre fornecida pelo cálculo do fluxo de potência, as variáveis serão reduzidas a três variáveis. Assim, para realizar a resolução deste modelo é necessário que uma variável seja fixada. Como a potência reativa, Q , deve ser sempre calculada em função da tensão terminal, V , deste modo restam apenas as variáveis de potência ativa, P , e escorregamento, s , para serem escolhidas como a variável a ser fixada, ambas as escolhas produzem resultados corretos (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010).

4.4 Modelos de motores de indução trifásicos com potência constante

Em sistemas de geração e transmissão, as cargas são normalmente balanceadas e existe transposição de linhas de transmissão. Tais fatos permitem que a modelagem de motores de indução seja realizada por meio de diagramas unifilares. Desta maneira, esta parte deste capítulo tratará dos modelos que utilizam potência constante, porém cada um possui uma particularidade que melhora a precisão do modelo.

4.4.1 Modelo um - potência constante

O primeiro modelo é o mais simples será tratado neste trabalho como modelo um. Este modelo apresenta potência constante e é calculado com o auxílio da tensão terminal obtida através do fluxo de potência e a partir das equações um e dois descritas no item 4.3 deste capítulo, neste modelo não é feita nenhuma modificação na rotina computacional (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010).

4.4.2 Modelo dois - potência constante

Neste modelo a potência ativa é mantida constante durante todo o cálculo do fluxo de potência e os valores de potência reativa e escorregamento são atualizados a cada iteração. Deste modo, a potência ativa, P , é constante e a equação um pode ser modificada da seguinte forma (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010):

$$\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 A + \left(\frac{R_r}{s}\right) B + C = 0 \quad (5)$$

Onde:

$$A = P(R_s^2 + K_3^2) - |V|^2 R_s \quad (6)$$

$$B = 2P(R_s K_2 + K_3 K_4) - |V|^2 (K_2 + K_1 K_3) \quad (7)$$

$$C = P(K_2^2 + K_4^2) - |V|^2 K_1 K_4 \quad (8)$$

$$K_2 = -X_s K_1 - X_r X_m \quad (9)$$

$$K_3 = X_m + X_s \quad (10)$$

$$K_4 = R_s K_1 \quad (11)$$

$$K_1 = X_r + X_m \quad (12)$$

Este modelo é incluído da seguinte forma no cálculo do fluxo de potência da seguinte maneira (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010):

- As constantes K_1, K_2, K_3 e K_4 são calculadas utilizando as equações nove, dez, onze e doze.
- A cada nova iteração os coeficientes A, B e C são calculados empregando as equações seis, sete e oito.
- A equação cinco é resolvida e dois valores referentes ao escorregamento, s , é encontrado. O maior valor é selecionado, uma vez que este se encontra na região estável.
- Usando o valor selecionado de $\frac{R_r}{s}$, o novo valor referente a potência reativa, Q , é calculado empregando a equação dois. Este valor é então adicionado à equação de erro do terminal do motor.
- Depois que a matriz Jacobiana do sistema é construída da forma convencional, é então feito o cálculo da primeira derivada parcial da equação em relação à tensão, esta derivada, $\frac{\partial Q}{\partial V}$, é então inserida na matriz Jacobiana na submatriz L.

A derivada, $\frac{\partial Q}{\partial V}$, é dada por:

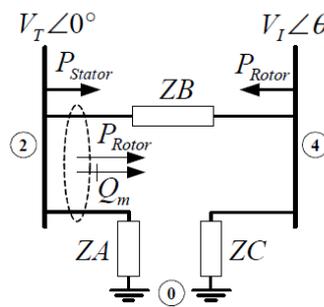
$$\frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{-2|V| \left\{ (K_1) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] + \left(\frac{R_r}{s} \right) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2}$$

- Os passos b) e e) são repetidos até o estudo convergir.

4.4.3 Modelo três - potência constante

Este modelo de motor de indução se baseia no circuito representado pela Figura 2, onde as potências do estator e do rotor se mantêm constantes. Entretanto, para incluir este modelo no fluxo de potência é necessário modificar o circuito equivalente Figura 2, transformando o circuito de impedância estrela entre os nós zero, dois e quatro em um circuito de impedância delta como ilustrado na figura a seguir (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010).

Figura 7 - Circuito equivalente do motor de indução para o modelo 3



Fonte: Carmona-Sánchez; Ruiz-Vega, 2010

Onde as novas impedâncias Z_A , Z_B e Z_C são:

$$Z_A = j \left(X_s + X_m + \frac{X_s X_m}{X_r} \right) \quad (13)$$

$$Z_B = j \left(X_s + X_r + \frac{X_s X_r}{X_m} \right) \quad (14)$$

$$Z_C = j \left(X_m + X_r + \frac{X_m X_r}{X_s} \right) \quad (15)$$

Como mostrado na Figura 7 as resistências do estator e do rotor são substituídas por cargas de potência constante cujos valores são calculados utilizando os parâmetros iniciais do motor de indução. Portanto, para as equações a seguir são utilizados os valores iniciais da tensão V_{T0} e o do escorregamento s_0 (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010):

$$P_{rotor} = |V_{I0}|^2 \left(\frac{s_0}{R_r} \right) \quad (16)$$

$$P_{stator} = P_{total} - P_{rotor} \quad (17)$$

Onde:

$$a = ZB + R_s \left(1 + \frac{ZB}{ZA} \right) \quad (18)$$

$$b = 1 + \frac{(ZB + R_s)}{ZC} \quad (19)$$

$$c = R_r(ZC + ZB) \quad (20)$$

$$V_{Io} = \frac{(V_{To})(R_r)}{(s_o)(a) + (R_r)(b) + \frac{R_s}{(ZA)(ZC)}(c)} \quad (21)$$

Para acrescentar este modelo a um programa para cálculo de fluxo de potência é necessário incluir uma linha de transmissão equivalente adicional que alimenta uma carga de potência ativa constante, P_{rotor} . Deste modo, este modelo pode ser incluído a qualquer programa para cálculo de fluxo de potência. Durante o cálculo do fluxo de potência, os barramentos dois e quatro são do tipo PQ (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010).

4.5 Modelos de motores de indução trifásicos com escorregamento constante

Os modelos que serão tratados nesta seção deste capítulo utilizam escorregamento constante. A maior diferença entre eles está na maneira de como são incluídos no cálculo do fluxo de potência.

4.5.1 Modelo quatro - escorregamento constante

Este modelo tem como principal característica a modificação que é feita na matriz Jacobiana, o escorregamento, s , é mantido igual ao valor inicial do escorregamento durante o cálculo do fluxo de potência. Por conseguinte, as potências ativa e reativa irão depender somente da tensão terminal, V , para este modelo as equações serão (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010):

$$P = P_o |V|^2 \quad (22)$$

$$Q = Q_o |V|^2 \quad (23)$$

Onde:

$$P_o = \frac{\left(\frac{R_r}{S}\right) \left[\left(\frac{R_r}{S}\right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m\right] + K_1 \left[\left(\frac{R_r}{S}\right) (X_m + X_s) + R_s K_1\right]}{\left[\left(\frac{R_r}{S}\right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m\right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{S}\right) (X_m + X_s) + R_s K_1\right]^2} \quad (24)$$

$$Q_o = \frac{-\left\{K_1 \left[\left(\frac{R_r}{S}\right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m\right] + \left(\frac{R_r}{S}\right) \left[\left(\frac{R_r}{S}\right) (X_m + X_s) + R_s K_1\right]\right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{S}\right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m\right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{S}\right) (X_m + X_s) + R_s K_1\right]^2} \quad (25)$$

Este modelo é incluído da seguinte forma no cálculo do fluxo de potência da seguinte maneira (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010):

- As constantes K_1 , P_o e Q_o são inicialmente calculadas utilizando as equações doze, vinte e quatro e vinte e cinco. Os valores devem ser mantidos constantes durante todo o cálculo do fluxo de potência.
- A cada nova iteração, os novos valores das potências ativa e reativa, P e Q , são calculados utilizando as equações vinte e dois e vinte e três. Estes valores são adicionados à equação de erro do terminal do motor.
- Depois que a matriz Jacobiana do sistema é construída da forma convencional, é então feito os cálculos das primeiras derivadas parciais da equações vinte e dois e vinte e três em relação à tensão, esta derivada, $\frac{\partial P}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial V}$, é então inserida na matriz Jacobiana. A derivada, $\frac{\partial P}{\partial V}$, é dada por:

$$\frac{\partial P}{\partial V} = 2P_o |V|$$

Onde:

$$P_o = \frac{\left(\frac{R_r}{S}\right) \left[\left(\frac{R_r}{S}\right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m\right] + K_1 \left[\left(\frac{R_r}{S}\right) (X_m + X_s) + R_s K_1\right]}{\left[\left(\frac{R_r}{S}\right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m\right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{S}\right) (X_m + X_s) + R_s K_1\right]^2}$$

A derivada, $\frac{\partial Q}{\partial V}$, é dada por:

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = 2P_o |V|$$

Onde:

$$Q_o = \frac{-\left\{ (K_1) \left[\left(\frac{R_r}{S} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] + \left(\frac{R_r}{S} \right) \left[\left(\frac{R_r}{S} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{S} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{S} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2}$$

d) Os passos b) e c) são repetidos até o estudo convergir.

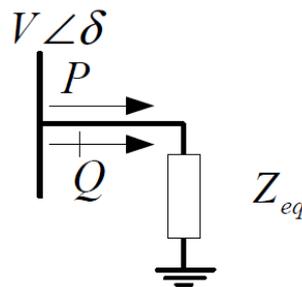
4.5.2 Modelo cinco - escorregamento constante

Neste modelo também é considerado o escorregamento constante, considera-se o valor do escorregamento igual ao valor inicial, s_o . Com isso, a resistência do rotor é considerada inicialmente constante. Desta forma, a impedância equivalente do motor pode ser calculada usando a equação a seguir (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010):

$$Z_{eq} = (R_s + jX_s) + \frac{jX_m \left(\frac{R_r}{s_o + jX_r} \right)}{R_r/s_o + j(X_r + X_m)} \quad (26)$$

Essa impedância equivalente é então incluída no cálculo do fluxo de potência, onde serão calculadas as potências ativa e reativa consumida pelo motor, como ilustrado pela figura a seguir:

Figura 8 - Circuito equivalente do motor de indução para o modelo 5



Fonte: Carmona-Sánchez; Ruiz-Vega, 2010

5 ANÁLISE COMPUTACIONAL E SIMULAÇÕES DOS MODELOS

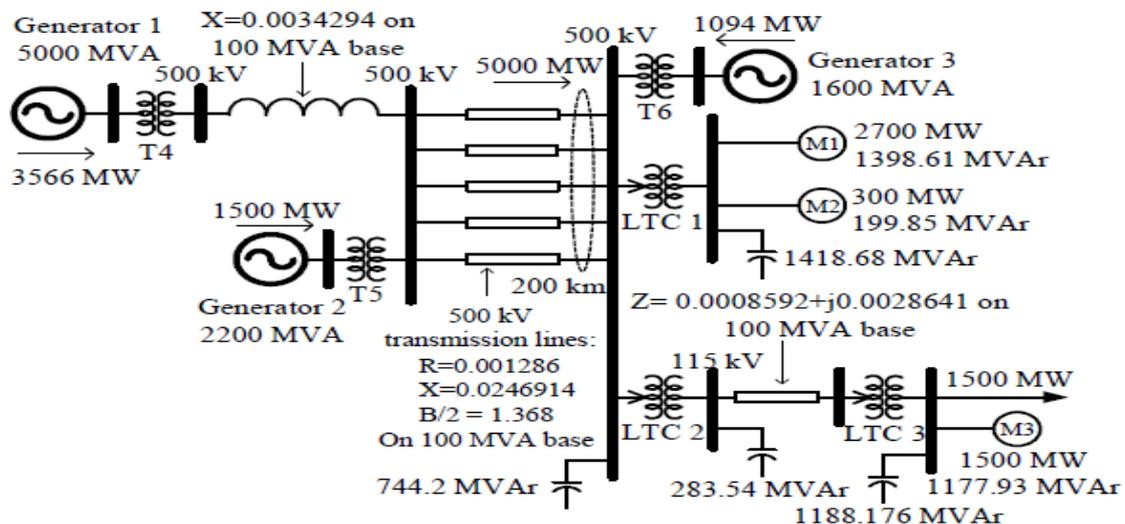
5.1 Introdução

No capítulo quatro foi descrito alguns modelos de motores de indução e suas equações. Neste capítulo será feita uma análise e validação destes modelos comparando o desempenho de cada um deles em um sistema elétrico de potência. Além dos conceitos presentes no capítulo quatro, este capítulo reunirá todos os conceitos apresentados até então. Portanto, através deste capítulo será possível avaliar as condições de operação de cada modelo em um sistema elétrico.

5.2 O cálculo do fluxo de potência para cada modelo

Antes que as curvas PV's fossem traçadas foi necessário validar se os modelos foram corretamente desenvolvidos. Assim, esta seção busca validar os modelos, reproduzindo os resultados obtidos por (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010). Para validar os modelos de motores proposto no capítulo quatro foi utilizado o sistema de dez barras representado na Figura 9, os parâmetros complementares deste sistema estão presentes nas Tabela 2 e Tabela 3. Este sistema é uma adaptação de um sistema proposto por (TAYLOR, 1994), essa adaptação é bastante conveniente para este trabalho, pois contém os motores M1 e M2 representam uma carga industrial e o motor M3 representa uma carga residencial.

Figura 9 - Sistema de teste com 10 barras



Fonte: Carmona-Sánchez; Ruiz-Vega, 2010

Com os conceitos e equações apresentados no capítulo três, e utilizando o software MATLAB, foi programada uma rotina computacional para cada um dos modelos utilizando o método de *Newton-Raphson* para sistemas elétricos. Com essa rotina computacional foi feito o cálculo do fluxo de potência para todos os modelos de motores de indução. Após o cálculo do fluxo de potência e com as equações e conceitos de cada um dos modelos de motores de indução os valores das tensões, e potências ativas e reativas consumidas pelos motores foram obtidos, este valores serão apresentados nas Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 2 - Parâmetros dos Transformadores em uma base de 100MVA

| Referência | Impedância [p.u.] | Tap |
|------------|-------------------|--------|
| LTC1 | 0,00292 | 0,9853 |
| LTC2 | 0,002889 | 0,9906 |
| LTC3 | 0,001 | 0,9744 |
| T4 | 0,002 | 0,9657 |
| T5 | 0,0045 | 0,9552 |
| T6 | 0,00602 | 0,9539 |

Fonte: Carmona-Sánchez; Ruiz-Vega, 2010

Tabela 3 - Parâmetros dos motores de indução em uma base de 100MVA

| Referencia | H | Rr | Rs | Xr | Xs | Xm | So |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| M1 | 50,62 | 0,0003 | 0,0004 | 0,05 | 0,002 | 0,1126 | 0,008811 |
| M2 | 3,5 | 0,0036 | 0,0062 | 0,036 | 0,02 | 0,64 | 0,011998 |
| M3 | 83,448 | 0,0024 | 0,0023 | 0,0031 | 0,0037 | 0,088 | 0,040063 |

Fonte: Carmona-Sánchez; Ruiz-Vega, 2010

Os resultados da rotina computacional implementada em MATLAB para os motores M1, M2 e M3 estão representados pelas Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 4 - Resultados da rotina computacional para o Motor de Indução 1

| Modelo | Tensão | Potência Ativa | Potência Reativa |
|--------|--------|----------------|------------------|
| 1 | 1,0851 | 28,122 | 14,577 |
| 2 | 1,0462 | 27,000 | 14,774 |
| 3 | 1,0406 | 27,000 | 15,384 |
| 4 | 1,0950 | 27,185 | 14,082 |
| 5 | 1,0960 | 27,571 | 14,282 |

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 5 - Resultados da rotina computacional para o Motor de Indução 2

| Modelo | Tensão | Potência Ativa | Potência Reativa |
|--------|--------|----------------|------------------|
| 1 | 1,0851 | 3,125 | 2,082 |
| 2 | 1,0460 | 3,000 | 2,208 |
| 3 | 1,0493 | 3,000 | 2,116 |
| 4 | 1,1013 | 3,096 | 2,063 |
| 5 | 1,0960 | 3,063 | 2,041 |

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 6 - Resultados da rotina computacional para o Motor de Indução 3

| Modelo | Tensão | Potência Ativa | Potência Reativa |
|--------|--------|----------------|------------------|
| 1 | 1,0078 | 15,890 | 12,442 |
| 2 | 1,0512 | 15,000 | 12,733 |
| 3 | 1,0536 | 15,000 | 12,173 |
| 4 | 1,1024 | 15,301 | 11,980 |
| 5 | 1,0511 | 15,297 | 11,977 |

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados apresentados nas Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 são diferentes para cada modelo de motor. Estas diferenças são maiores entres os resultados do modelo 1, que é amplamente utilizado nos programas comerciais, dos outros modelos de potência ativa constante e escorregamento constante. Os modelos que possuem a potência ativa constante,

modelo 2 e modelo 3, possuem resultados bem similares, e os resultados dos modelos que possuem escorregamento constante, modelo 4 e modelo 5, também são similares entre si.

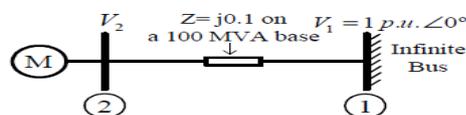
A maior diferença entre os modelos é a maneira como estes devem ser inseridos no fluxo de potência. Os modelos 2 e 4 modificam a matriz Jacobiana, modificando assim o cálculo do fluxo de potência. Os modelos 3 e 5 são facilmente incluídos em qualquer programa de fluxo, uma vez que não requerem que a matriz Jacobiana seja modificada. Portanto, uma característica importante dos modelos apresentados é que eles permitem a representação de um motor de indução com uma maior precisão, deste modo o comportamento de estado estacionário do motor é próximo ao real (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010).

Uma vez validada a modelagem dos motores, a próxima seção apresentará as curvas PV's para cada um dos modelos propostos por (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010) para motores de indução.

5.3 Levantamento das curvas PV's para cada modelo

A fim de encontrar o modelo que melhor representa um motor de indução para estudos de estabilidade de tensão foi feito um estudo utilizando as curvas PV's. Para obtenção destas curvas são feitos sucessivos cálculos do fluxo de potência e é efetuado um acréscimo contínuo da carga. Para diminuir o esforço computacional foi utilizado um sistema mais simples, com apenas duas barras, ilustrado pela Figura 10, e os parâmetros do motor M está representado na Tabela 7.

Figura 10 - Sistema com duas barras



Fonte: Carmona-Sánchez; Ruiz-Vega (2010)

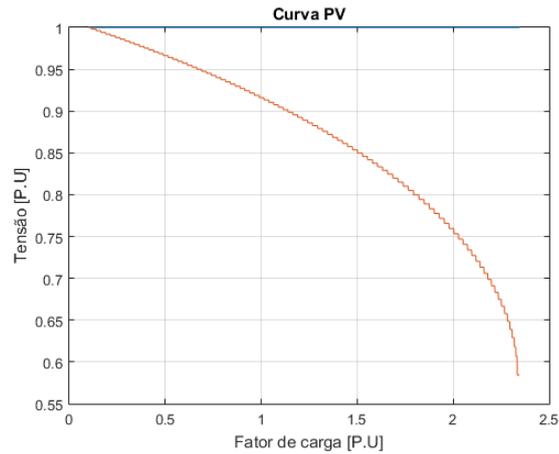
Tabela 7 - Parâmetros do motor do sistema com duas barras

| Referência | H | Rr | Rs | Xr | Xs | Xm | So |
|------------|--------|------|----|-------|-------|----|----------|
| M | 0,0062 | 2,25 | 7 | 157,5 | 0,633 | 7 | 0,009233 |

Fonte: Carmona-Sánchez; Ruiz-Vega (2010)

A Figura 11 representa a curva PV para o modelo 1, o limite máximo de transferência de potência para este modelo foi de 2,34 p.u., e a tensão crítica foi de 0,582 p.u. Ou seja, a carga máxima que o sistema com duas barras utilizando o modelo 1 consegue atingir é de 2,34 p.u. com uma tensão de 0,582 p.u.

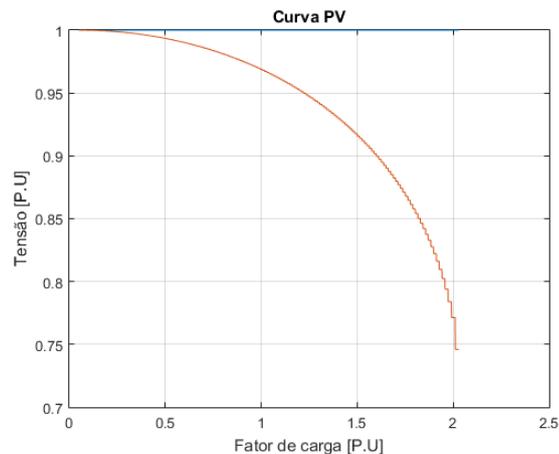
Figura 11 - Curva PV para o modelo 1



Fonte: Elaborado pelo Autor

É representado através da Figura 12 a curva PV para o modelo 2, o limite máximo de transferência de potência para este modelo foi de 2,03 p.u., e a tensão crítica foi de 0,746 p.u. Ou seja, a carga máxima que o sistema com duas barras utilizando o modelo 2 consegue atingir é de 2,03 p.u. com uma tensão de 0,746 p.u.

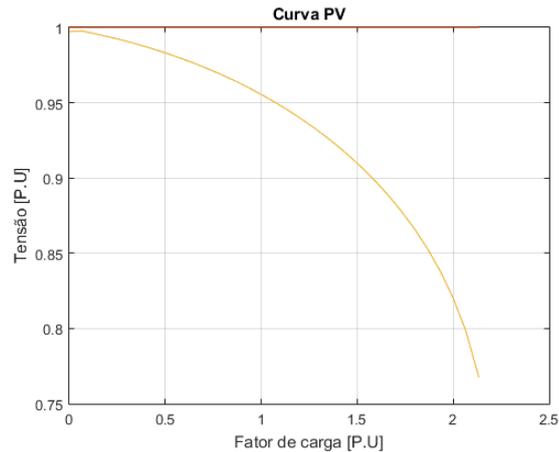
Figura 12 - Curva PV para o modelo 2



Fonte: Elaborado pelo Autor

Já a Figura 13 representa a curva PV para o modelo 3, o limite máximo de transferência de potência para este modelo foi de 2,13 p.u., e a tensão crítica foi de 0,767 p.u. Ou seja, a carga máxima que o sistema com duas barras utilizando o modelo 3 consegue atingir é de 2,13 p.u. com uma tensão de 0,767 p.u.

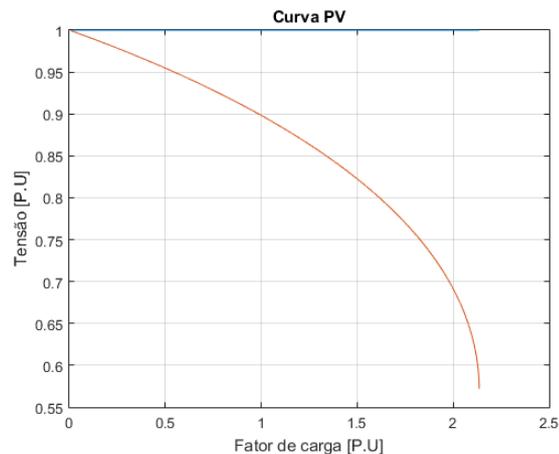
Figura 13 - Curva PV para o modelo 3



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Figura 14 representa a curva PV para o modelo 4, o limite máximo de transferência de potência para este modelo foi de 2,14 p.u., e a tensão crítica foi de 0,572 p.u. Ou seja, a carga máxima que o sistema com duas barras utilizando o modelo 4 consegue atingir é de 2,14 p.u. com uma tensão de 0,572 p.u.

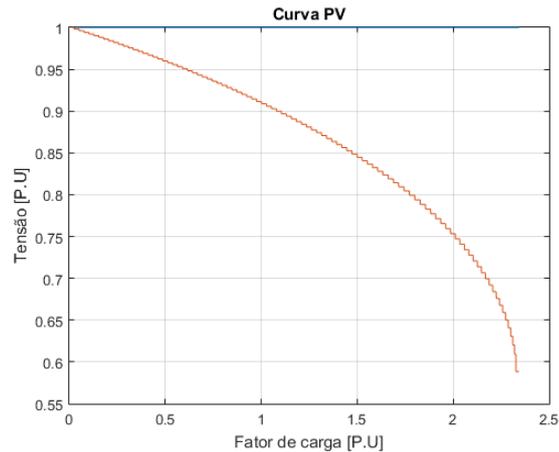
Figura 14 - Curva PV para o modelo 4



Fonte: Elaborado pelo Autor

A figura a seguir representa a curva PV para o modelo 5, o limite máximo de transferência de potência para este modelo foi de 2,34 p.u., e a tensão crítica foi de 0,588 p.u. Ou seja, a carga máxima que o sistema com duas barras utilizando o modelo 5 consegue atingir é de 2,34 p.u. com uma tensão de 0,588 p.u.

Figura 15 - Curva PV para o modelo 5



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Tabela 8, representada a seguir, sintetiza os resultados referentes às curvas PV's de todos os modelos simulados.

Tabela 8 - Carga Máxima e Tensão Crítica para cada modelo

| Modelo | Carga Máxima | Tensão Crítica |
|--------|--------------|----------------|
| 1 | 2,34 | 0,582 |
| 2 | 2,03 | 0,746 |
| 3 | 2,13 | 0,767 |
| 4 | 2,14 | 0,572 |
| 5 | 2,34 | 0,588 |

Fonte: Elaborado pelo Autor

Como o sistema de teste se trata de um sistema mais simples, com apenas duas barras, os valores de Carga Máxima e Tensão Crítica foram bem similares. Entretanto, o modelo 3, modelo de potência ativa constante, oferece uma melhor estabilidade numérica em relação ao modelo 2, que também é um modelo de potência ativa constante. Entre os modelos que apresentam escorregamento constante, o modelo 5 apresentou um maior valor de Carga

Máxima e Tensão Crítica. Porém, os valores do modelo 5 são similares ao modelo 1, que se trata de uma representação imprecisa de um motor de indução trifásico.

Entre os modelos apresentados, para o sistema de 2 barras, o modelo que tem melhor convergência foi o modelo 3, o ponto de Tensão Crítica apresentado por este modelo foi o mais baixo. Além disso, o modelo 3 pode ser facilmente adicionado em outros programas para cálculo do fluxo de potência, pois este não modifica a matriz Jacobiana.

6 CONCLUSÃO

No capítulo um foi apresentada uma visão geral do trabalho, abordando os conceitos iniciais de sistemas elétricos de potência, motores de indução, fluxo de potência e estabilidade de tensão. Ainda no capítulo um foi estabelecido os objetivos e justificativas do trabalho, os objetivos foram consolidados nos capítulos seguintes.

No capítulo dois foi feita uma revisão de alguns aspectos teóricos sobre motores elétricos, foi dada uma visão geral sobre estes motores. Neste capítulo foi descrito os principais parâmetros dos motores de indução e sua representação através de um circuito equivalente.

O equacionamento do fluxo de potência e alguns aspectos sobre estabilidade de tensão foram descritos no capítulo três. Neste capítulo, foi apresentado o método utilizado para o cálculo do fluxo, e foi feito um estudo mais aprofundado sobre fluxo de potência e os conceitos de estabilidade de tensão.

O capítulo quatro apresentou os modelos de motores de indução proposto por (CARMONA-SÁNCHEZ; RUIZ-VEGA, 2010). Este capítulo trata dos modelos que utilizam potência constante, e escorregamento constante, e as características e equações de cada um dos modelos, é apresentada também a forma que estes modelos devem ser inseridos no fluxo de potência.

A análise computacional e as simulações dos modelos são feitas no capítulo cinco. Neste capítulo são avaliados os modelos de motores de indução propostos no capítulo quatro, os resultados são apresentados em forma de tabela para cada tipo de modelo, utilizando um sistema de 10 barras. É feito também um estudo de estabilidade de tensão em um sistema de 2 barras utilizando as curvas PV's para encontrar o modelo que melhor representa um motor de indução. O objetivo do trabalho é alcançado conforme pode ser observado neste capítulo.

Todos os modelos foram capazes de representar corretamente o motor de indução em estudos de fluxo de potência. Contudo, apesar dos modelos de potência ativa constante e escorregamento constante apresentarem resultados similares, é importante avaliar como estes modelos são inseridos no cálculo do fluxo de potência. Portanto, os modelos 3 e 5 apresentam uma vantagem maior em relação aos outros modelos, pois estes podem ser facilmente incorporado em qualquer programa de fluxo de potência. Além desta vantagem, o modelo 3 revelou melhores resultados nos estudos de estabilidade utilizando as curvas PV's, a tensão crítica deste modelo foi a maior entre todos os modelos.

É importante informar que não existe um modelo mais exato que representa o motor de indução, todos os modelos podem e devem sempre ser avaliados. Os modelos podem ter comportamentos distintos e apresentar diferentes níveis de tensão e carregamento para o mesmo sistema elétrico de potência de teste. Portanto, é necessário avaliar se o modelo em teste corresponde às características buscadas.

Como forma de continuação do trabalho, pode-se avaliar um modelo que associa a modificação da matriz Jacobiana com a modificação do circuito equivalente. Ainda para trabalhos futuros, buscando uma maior precisão dos resultados, uma análise utilizando as curvas QV's com a finalidade de buscar o modelo que melhor representa os motores de indução pode ser feita.

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, Adriano Lima. **Análise estática de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência via nomogramas e computação paralela**. 2013. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013. Disponível em: < http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-14012014-094750/publico/Abrantes_Adriano_Lima.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2016.
- ALMEIDA, Bruno de. **Modelagem do motor de indução em estudos em estabilidade de tensão**. 2010. 132 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010. Disponível em: < http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-17112011-100850/publico/Almeida_Bruno_de.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2016.
- ALVES, D. A. et al. Determinação do ponto de máximo carregamento de sistemas de potência utilizando o fluxo de carga desacoplado rápido parametrizado. **Revista Controle & Automação**, [S.l.], v. 14, n. 2, p. 151-165, jun. 2003. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/ca/v14n2/a07v14n2.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2016.
- AREE, Pichai. Load flow solution with induction motor. **Songklanakarin J. Sci. Technol**, [S.l.], v. 28, n. 1, p. 157-168, fev. 2006. Disponível em: < http://www.rdo.psu.ac.th/sjstweb/journal/28-1/15_loadflow.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2016.
- BARBOSA, Ailson de Souza. **Fluxo de potência em sistemas de distribuição**: aplicações práticas. 1995. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1995. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876412/Dissertacao_Ailson.pdf/0c3f1d3e-7b36-4006-86af-a7f467941aa5>. Acesso em: 15 out. 2016.
- BORGES, Carmen L. Tancredo. **Análise de sistemas de potência**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005. Disponível em: < <https://xa.yimg.com/kq/groups/22740087/675276628/name/Apostila+Completa+SEP.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2016.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional**: módulo 8 - qualidade da energia elétrica. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%c3%b3dulo8_Revis%c3%a3o_7.pdf>. Acesso em: 16 set. 2016.
- CARMONA-SÁNCHEZ, Jesús; RUIZ-VEJA, Daniel. **Review of static induction motor models**. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5619613/>>. Acesso em: 09 out. 2016.
- _____. et al. **Induction motor static models for power flow and voltage stability studies**. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6345618/>>. Acesso em: 15 out. 2016

CONDEGA, Sandro Y. Chavarria. **Metodologia para determinação da margem de estabilidade de tensão sob a perspectiva da expansão e da operação de sistemas de potência**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1028M.PDF>>. Acesso em: 17 set. 2016.

ELETROBRÁS et al. **Motor Elétrico: guia básico**. Brasília: IEL/NC, 2009. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/Motor_eletrico.pdf>. Acesso em: 19 out. 2016.

FRANCISCO, Gustavo de Souza. **Avaliação de Ferramentas de análise de estabilidade e tensão**. 2005. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2005. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0029648.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2016.

GRAINGER, John J; STEVENSON, William D. **Power system analysis**. New York: McGraw Hill, 1994.

IEEE. Load representation for dynamic performance analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 472-482, maio 1993.

KOSOW, Irving L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 14. ed. São Paulo: Globo, 2000.

KUNDUR, Prabha et al. Definition and classification of power system stability. **IEEE Transactions on Power Systems**, [S.l.], v. 19, n. 3, p. 1387-1401, ago. 2004. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1318675/>>. Acesso em: 22 out. 2016.

_____. **Power system stability and control**. New York: McGraw Hill, 1994.

MACIEL FILHO, José. **Aspectos práticos e teóricos na análise de estabilidade de tensão**. 2006. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2005. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0032102.pdf>>. Acesso em: 07 out. 2016.

MACIEL FILHO, José; MACEDO, Waldecy de; SOUZA, A. C. Zambroni. Aspectos práticos e teóricos na análise do fenômeno do colapso de tensão. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2001, São Paulo. **Anais...** São Carlos: EFEI, 2001.

MENDES, Pedro P. de Carvalho. **Estabilidade de sistemas elétricos**. [S.l.: s.n.], 2006.

MONTICELLI, Alcir José. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

MOREIRA, Pablo R. J. da Silva. **Impacto do afundamento de tensão em acionamentos a velocidade variável**. 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Pontifca Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <[http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngEletrica_Moreira PR_1.pdf](http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngEletrica_Moreira_PR_1.pdf)>. Acesso em: 10 nov. 2016.

MOURA, Renan S. et al. Effects of qv curves in the dynamic behaviour of power systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, [S.l.], v. 10, n. 12, p. 2861-2870, ago. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7551256/>>. Acesso em: 19 out. 2016.

PASSOS FILHO, João Alberto. **Representação e avaliação do desempenho de dispositivos de controle no problema de fluxo de potência**. 2005. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2005112251.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2016.

REIS, Claudia S. M. Machado dos. **Determinação de índices de estabilidade de tensão**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2005. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11901/2/Texto%20integral.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2016.

SARMIENTO, Hector G; ESTRADA, Eduardo. A voltage sag study in an industry with adjustable speed drives. **IEEE Industry Applications Magazine**, [S.l.], v. 2, n. 1, p. 16-19, jan./fev. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/476593/>>. Acesso em: 01 out. 2016.

SAUER, Peter W.; PAI, M. A. **Power system dynamics and stability**. [S.l.: s.n.], 1997.

SILVA, João L. Reis; MOURA, Luís C. de. **Alternativas tecnológicas para mitigação de afundamento e interrupção momentânea de tensão em cargas sensíveis do sistema elétrico de potência**. Disponível em: <<http://centralmat.com.br/Artigos/Mais/afundamentoTensao.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2016.

SOUZA, A. C. Zambroni de. Tangent vector applied to voltage collapse and loss sensitivity studies. **Electric Power Systems Research**, [S.l.], v. 47, p. 65-70, mar. 1998

STOTT, Brian. Review of load-flow calculation methods. **Proceedings of the IEEE**, [S.l.], v. 62, n. 7, p. 916-929, jul. 1974. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1451474/>>. Acesso em: 17 out. 2016.

TAYLOR, Carson W. **Power System Voltage Stability**. New York: McGraw-Hill, 1994. 273 p.

TORO, V. D. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 2009

WEG. **Motores:** aplicações comerciais e residenciais. Disponível em: < <http://www.weg.net/files/products/WEG-motores-aplicacoes-comerciais-e-residenciais-50041418-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2016.

WEG. **Motores elétricos:** guia de especificação. Disponível em: < <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2016.