

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GÉREMI GILSON DRANKA

**ANÁLISE DE OSCILAÇÕES DE TENSÃO DEVIDO À PARTIDA DE
MOTORES ELÉTRICOS DE GRANDE PORTE EM REDES
ELÉTRICAS INDUSTRIAIS COM MULTIALIMENTADORES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2012

GÉREMI GILSON DRANKA

**ANÁLISE DE OSCILAÇÕES DE TENSÃO DEVIDO À PARTIDA DE
MOTORES ELÉTRICOS DE GRANDE PORTE EM REDES
ELÉTRICAS INDUSTRIAIS COM MULTIALIMENTADORES**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Ms. César A. Portolann.

PATO BRANCO

2012

RESUMO

DRANKA, G. Géremi. Análise de Oscilações de Tensão Devido à Partida de Motores Elétricos de Grande Porte em Redes Elétricas Industriais com Multialimentadores. 2012. 61 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2012.

Este trabalho apresenta uma análise das oscilações de tensão resultantes na partida de motores elétricos em plantas industriais típicas de médio e grande porte. No sentido de generalizar a avaliação de amplitudes de oscilações para todo tipo de rede, com qualquer quantidade de barras, como sistemas elétricos de potência interligados, redes elétricas radiais com vários alimentadores, ou mesmo um único alimentador, esse trabalho discute e formaliza dois métodos de análise. O primeiro utiliza-se de conceitos da teoria de fluxo de potência e o segundo envolve a teoria de curto circuito trifásico equilibrado. Pretende-se, desta forma, estabelecer as equações e procedimentos que caracterizem cada um dos métodos propostos, suas vantagens, desvantagens e limitações e aplicar ambos os métodos a um sistema com alimentador único e também realizar um estudo de caso de um britador composto por vários alimentadores onde localizam-se motores com potência na ordem de 200 CV.

Palavras-chave: Oscilações de tensão. Redes elétricas industriais. Motores elétricos. Acionamentos elétricos.

LISTA DE SIGLAS

IEEE *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

MIT Motor de Indução Trifásico

PCC *Point of Common Coupling* (Ponto comum de conexão)

RMS *Root Mean Square* (Valor Médio Quadrático)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de energia elétrica no Brasil em 2010.....	7
Figura 2 – Corrente de partida direta de um MIT ($V = 1$ pu).....	8
Figura 3 – Problemas na qualidade de energia.....	10
Figura 4 – Modelos de carga.....	13
Figura 5 – Alguns problemas na qualidade da tensão da rede elétrica.....	18
Figura 6 – Afundamentos de tensão devido à resposta dinâmica do motor.....	20
Figura 7 – Diagrama fasorial representando um afundamento de tensão.....	21
Figura 8 – Limites de tolerância das oscilações de tensão.	23
Figura 9 – Custo de melhorias na tolerância aos afundamentos.....	24
Figura 10 – Diagrama de força e comando para partida direta.....	27
Figura 11 – Diagrama de força multifilar para partida estrela-triângulo.....	28
Figura 12 – Diagrama de comando para partida estrela-triângulo.....	29
Figura 13 – Rede elétrica com um único alimentador.....	35
Figura 14 – Diagrama de impedâncias.....	36
Figura 15 – Diferença percentual de tensão para o motor de 100 CV.....	37
Figura 16 – Esquema simplificado dos motores e cargas do britador.....	39
Figura 17 – Diagrama de impedâncias do britador.....	40
Figura 18 – Módulos de tensões durante a partida de motor.....	48
Figura 19 – Oscilações de tensão durante a partida do motor de 250 CV.....	50
Figura 20 – Módulos de tensões durante a partida de motor.....	51
Figura 21 – Oscilações de tensão durante a partida do motor de 250 CV.....	52
Figura 22 – Comparação das diferenças de oscilações para os métodos.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos modelos de carga	13
Tabela 2 – Valores percentuais de oscilação de tensão	36
Tabela 3 – Impedância total de cada trecho.....	41
Tabela 4 – Característica dos Transformadores	42
Tabela 5 – Característica dos MIT	42
Tabela 6 – Dados para a partida e regime permanente	43
Tabela 7 – Dados para as outras cargas do sistema	43
Tabela 8 – Redução da potência.....	46
Tabela 9 – Redução da impedância.....	46
Tabela 10 – Potência total em cada barra.....	47
Tabela 11 – Amplitudes das tensões de barra (p.u. volt)	48
Tabela 12 – Oscilações de tensões de barra (%)......	49
Tabela 13 – Amplitudes das tensões de barra (p.u. volt)	51
Tabela 14 – Oscilações de tensões de barra (%)......	52
Tabela 15 – Diferenças de tensões de barra entre os métodos (%)	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
1.1 JUSTIFICATIVA.....	9
1.2 OBJETIVO GERAL.....	11
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
2. DESENVOLVIMENTO	12
2.1 SISTEMAS DE POTÊNCIA	12
2.1.1 Modelo da carga.....	13
2.1.2 Controle de tensão em sistemas de distribuição.....	14
2.1.3 Oscilações de tensão	16
2.1.4 Afundamentos de tensão	18
2.1.5 Afundamentos causados por grandes cargas	20
2.1.6 Representação fasorial do afundamento de tensão	21
2.1.7 Normas regulamentadoras.....	22
2.1.8 Aspectos econômicos	23
2.2 ESTRATÉGIAS DE ACIONAMENTOS DE MOTORES ELÉTRICOS	25
2.2.1 Partida direta	26
2.2.2 Partida estrela-triângulo	28
2.2.3 Soft-Starter.....	30
2.3 METODOLOGIA	31
2.3.1 Introdução	31
2.3.2 Método do fluxo de potência	31
2.3.1 Método de curto circuito.....	32
2.4 RECURSOS NECESSÁRIOS.....	34
3. APLICAÇÃO DO MÉTODO A UM ALIMENTADOR	35
3.1 Alimentador Único	35
4. ESTUDO DE CASO.....	38

4.1	Considerações iniciais	38
4.2	Especificações do sistema industrial	38
4.3	Especificações dos condutores	40
4.4	Especificações dos transformadores	41
4.5	Especificações dos motores	42
4.6	Especificações das outras cargas do sistema	43
4.7	Potência e impedância de rotor bloqueado para cada método	44
5.	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	47
5.1	Método de Fluxo de Potência	47
5.2	Método de Curto-Circuito	50
5.2	Comparação dos resultados obtidos em cada método	53
6.	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS.....	57

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, verifica-se que o consumo de energia elétrica por parte das indústrias corresponde a quase metade do montante total (BEN, 2010). A Figura 1 mostra como o consumo de energia elétrica se divide nos principais setores do mercado brasileiro em 2010.

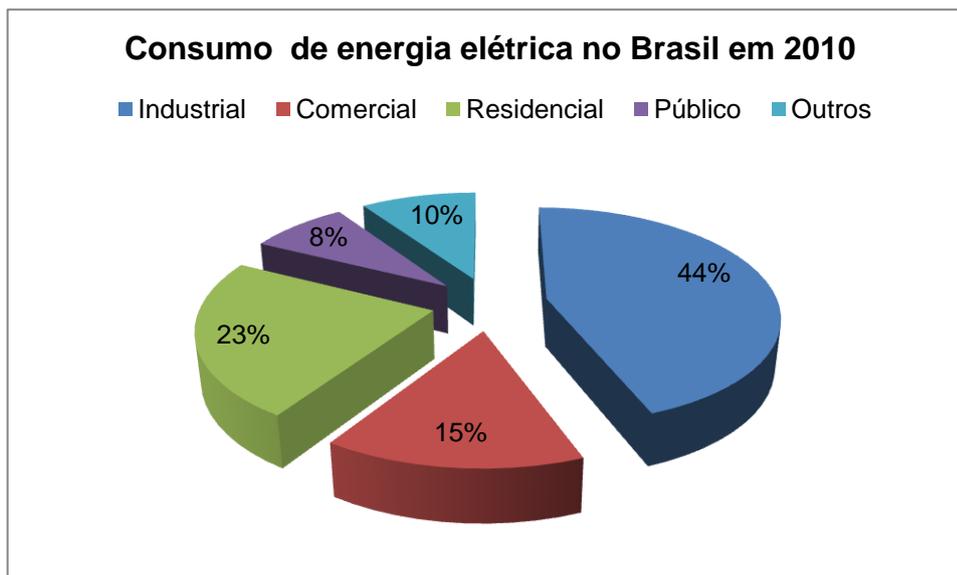


Figura 1 – Consumo de energia elétrica no Brasil em 2010

Fonte: Adaptado de BEN (2010)

Particularmente, o que mais contribui para o crescimento do consumo por parte das indústrias são as máquinas elétricas, sobretudo os motores de indução trifásicos (MORENO, et al., 2002). Devido a isso e também ao conseqüente surgimento de novas tecnologias, como por exemplo, o controle de velocidade de motores CA, os problemas na qualidade da energia da rede elétrica também aumentaram de maneira significativa.

Especificamente com relação à tensão, os principais problemas que podem ocorrer são os desequilíbrios de tensão, *flickers* de tensão, transitórios, variações de tensão de curta duração, variações no valor eficaz da tensão, interrupções, distorções na forma de onda, entre outros (DUGAN, et al., 2002). Os afundamentos de tensão, por sua vez, são usualmente associados à falhas no sistema de energia elétrica, no entanto, podem ser causados pela elevada corrente de partida de motores de indução que podem levar o sistema a perda de

informações (quando ocorre, por exemplo, o desligamento de sistemas eletrônicos), funcionamentos incorretos, disparos indesejados, entre outros (LLERENA, 2006).

Vale lembrar que a maior parte dos problemas surge no regime transitório do sistema. Durante a partida, por exemplo, os motores de indução solicitam da rede de alimentação uma corrente de valor elevado, na ordem de 6 a 10 vezes a sua corrente nominal. Isso acarreta afundamentos rápidos de tensão nas cargas próximas, podendo, em muitas situações, causar perturbações inadmissíveis ao sistema. Além disso, em algumas situações é necessário acionar dois ou mais motores de grande porte simultaneamente, o que acaba agravando ainda mais as condições do sistema de suprimento.

Neste ponto, é importante ressaltar o fato de que a corrente não é constante durante a partida, ela possui um pico inicial bastante elevado que cai rapidamente para um valor múltiplo da nominal (esta é denominada a corrente de pico) e se mantém durante boa parte do tempo de aceleração do motor para então passar ao seu valor nominal conforme mostra a Figura 2 em que a escala de tempo (eixo x) é logarítmica (GOMES, et al., 2001).

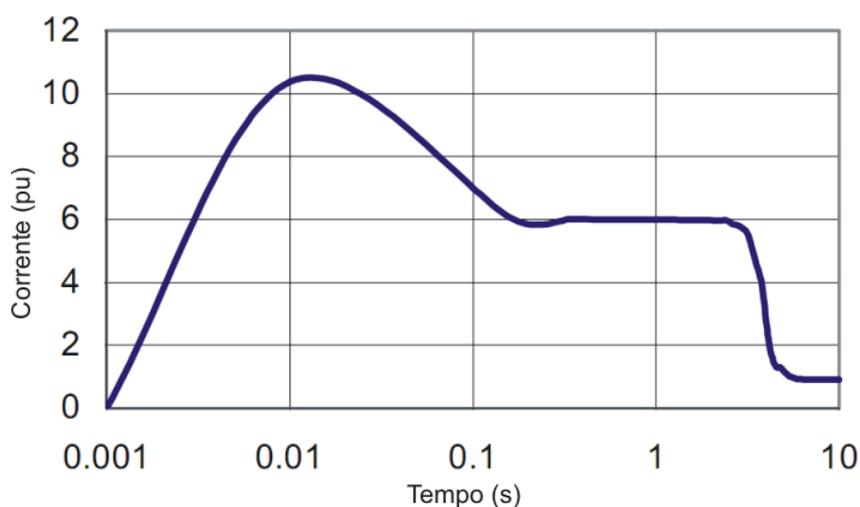


Figura 2 – Corrente de partida direta de um MIT ($V = 1$ pu)

Fonte: Adaptado de GOMES (2001).

Desta forma, durante a partida dos motores, a queda de tensão do sistema é maior que a estabelecida para regime permanente, podendo provocar sérios distúrbios nos equipamentos de comando e proteção, além de afetar o desempenho do sistema de iluminação. Com relação ao sistema de iluminação, as lâmpadas fluorescentes não sofrem impactos significativos, contanto que a tensão de partida resultante não seja menor que 85% da nominal, caso for menor podem

apagar. Já as lâmpadas incandescentes não apagam quando submetidas a quedas de tensão excessivas. No entanto, tornam-se susceptíveis ao fenômeno de cintilação, ou simplesmente *flicker*, que prejudica a uniformidade do fluxo luminoso diante de um observador (MAMEDE FILHO, 2010).

Desta forma, a elaboração de um projeto industrial deve ser realizada de forma a não degradar a operação em regime normal do sistema, definindo os melhores métodos de partidas para cada aplicação de forma a garantir a funcionalidade do sistema (MAMEDE FILHO, 2010).

A partir disso, pretende-se realizar através deste trabalho, a abordagem dos problemas decorrentes da partida desses motores de grande porte, especificamente, quantificando os valores de afundamentos de tensão de curta duração que ocorrem em cada barra da rede de uma planta industrial típica.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diagnosticar as amplitudes das oscilações de tensão na partida de motores é fundamental por dois motivos principais. O primeiro relaciona-se ao interesse da concessionária local, que normalmente limita a queda de tensão no ponto de entrega do sistema distribuidor (geralmente entre 3% e 5%) (MAMEDE FILHO, 2010). Ainda nesse cenário, destaca-se o interesse para que as tensões dos demais consumidores fora da indústria não sejam deterioradas. O segundo ponto é de interesse da própria indústria, ou seja, relacionado à funcionalidade dos outros equipamentos que estão conectados à rede, sobretudo os eletrônicos, que são mais sensíveis às oscilações de tensão (MAIA, 2008). Além disso, as consequências dos afundamentos de tensão afetam a própria máquina assíncrona, levando a perda de velocidade durante o afundamento e picos de corrente e conjugado que aparecem tanto na queda de tensão quanto no instante de reestabelecimento, ou seja, após o tempo de partida, que é o instante em que a máquina entra em regime de operação normal (LLERENA, 2006).

Por outro lado, percebe-se que em geral, não existem publicações técnicas que tratem do problema de forma ampla e formal, que permita calcular as oscilações de tensão na partida de motores em todas as barras da rede elétrica

considerada, sobretudo, quando se considera sistemas industriais de grande porte com vários alimentadores. Atualmente o que se faz é calcular as quedas de tensão somente no alimentador do motor, desprezando-se a influência da partida em outras partes do sistema elétrico.

Pretende-se, desta forma, desenvolver um material de referência no que se diz respeito à determinação dessas oscilações de tensão e verificar se estas violam as percentagens de variação admitidas por normas regulamentadoras.

Além disso, baseado em dados científicos, percebe-se que dentre os problemas relacionados à qualidade da energia elétrica, os afundamentos de tensão são os que têm maior contribuição em termos percentuais conforme pode ser visto na Figura 3.

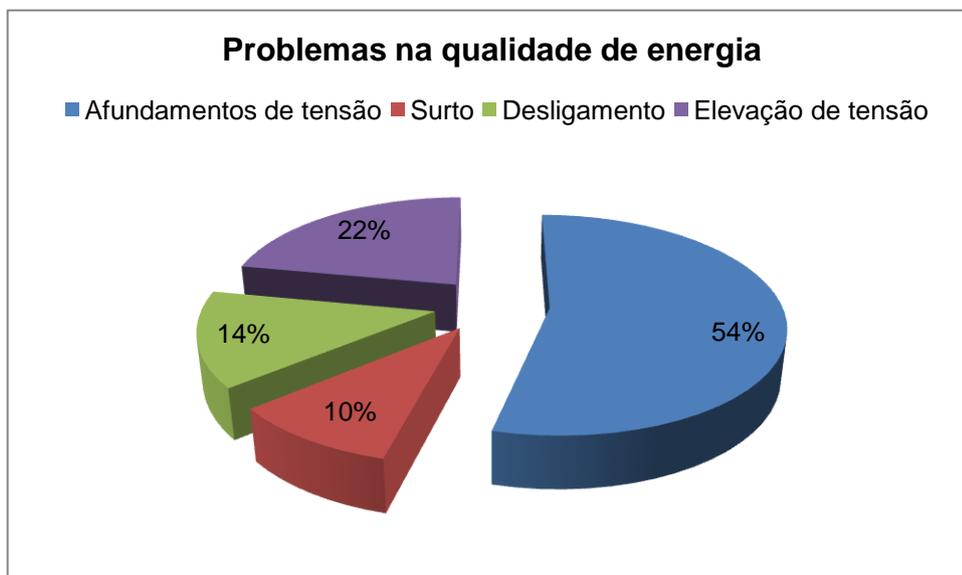


Figura 3 – Problemas na qualidade de energia

Fonte: Adaptado de MAIA (2008)

Além do fato dos afundamentos de tensão ser a maior causa de problemas relacionados à qualidade de energia elétrica, também são os que causam maiores prejuízos de ordem econômica conforme se destaca a seguir com alguns exemplos já registrados (MAIA, 2008).

- Controle de tráfico aéreo: Perda de controle em um grande aeroporto pode custar US\$15.000/minuto;
- Fabricante de compressores: Afundamentos e Interrupções custam em torno de US\$1.700.000/ano;

- DuPont: Economizou US\$75 milhões/ano implementando solução de qualidade de energia;
- Indústria Automotiva: interrupções momentâneas custam em torno de US\$10 milhões/ano;

1.2 OBJETIVO GERAL

Analisar quantitativamente as quedas de tensão na partida de motores de grande porte em cargas circunvizinhas do sistema em que o motor está inserido em sistemas de médio/grande porte, ou seja, em sistemas que possuem vários alimentadores.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Aplicar a teoria de fluxo de potência para a obtenção das oscilações de tensão em todas as barras de um sistema industrial durante a partida de um motor.
2. Aplicar um método baseado na teoria de curto-circuito, que tradicionalmente é utilizado para faltas elétricas trifásicas equilibradas para comprovação dos resultados.
3. Implementar em software de simulação *matlab* linhas de comando (específicas para o estudo de caso de um britador da região) de modo a se obter as oscilações de tensão em cada uma das barras conectadas à rede.
4. Realizar revisão bibliográfica dos principais métodos de acionamento de motores de indução trifásicos.
5. Desenvolver análise comparativa em termos quantitativos considerando os métodos de partida direta, compensadora, estrela triângulo e soft-starter.
6. Desenvolver monografia apresentando os resultados obtidos.

2. DESENVOLVIMENTO

Buscando-se a contextualização do problema que será apresentado, serão destacados os principais conceitos que estão relacionados às redes industriais tais como: a modelagem da carga, controle de tensão em sistemas de distribuição, afundamentos de tensão e oscilações de tensão que ocorrem durante a partida de motores elétricos. Além disso, serão destacados os conceitos acerca do fluxo de potência em sistemas industriais, bem como alguns dos aspectos pertinentes aos principais métodos de partida de motores.

2.1 SISTEMAS DE POTÊNCIA

Os motores elétricos de indução têm impactos nos sistemas elétricos de potência em que estão inseridos, influenciando na qualidade de energia, sobretudo, durante a partida do MIT. Isso se torna ainda mais grave quando se considera motores de grande porte, pois requerem uma quantidade significativa de energia reativa, suficiente para afetar a rede de fornecimento.

Além disso, os estudos de fluxo de carga são de extrema importância tanto no planejamento quanto na execução de futuros sistemas elétricos de potência, bem como para a determinação da melhor forma de operação dos sistemas já existentes.

A principal informação que se obtém a partir de um estudo de fluxo de potência é a magnitude e o ângulo de fase da tensão em cada barra do sistema. Além disso, fornece o valor real de potência reativa que flui em cada linha, entre outras informações adicionais (STEVENSON, 1994).

No entanto, é importante ressaltar que as quedas de tensão em regime permanente não devem ser confundidas com a instabilidade de tensão. As quedas de tensão podem ser rápidas (como no caso da partida de um motor de indução) ou lentas (como nos comutadores de *tap* sob carga). Já a estabilidade de tensão é algumas vezes referida como estabilidade de carga e é um problema dinâmico (PADYAR, 2004). Este trabalho, por sua vez, pretende realizar a análise da

oscilação de tensão no instante em que ocorre a partida de um ou mais motores, não necessitando, desta forma, realizar a análise da dinâmica do processo.

2.1.1 Modelo da carga

A representação da carga é uma questão relativamente complexa devido ao fato de poder ser realizada considerando-se três situações: impedância constante, corrente constante ou potência constante. A escolha de um dos três parâmetros depende do estudo que se deseja realizar. Além disso, em barras típicas, o montante de carga que corresponde aos motores de indução está em entre 50 a 70% do total (ZANETTA, 2005).

A Figura 4 representa os respectivos comportamentos para as cargas em função da variação da tensão e a Tabela 1 mostra as equações e características principais para cada modelo, ou seja, considerando impedância constante, corrente constante e potência constante.



Figura 4 – Modelos de carga

Fonte: Adaptado de Zanetta (2005).

Tabela 1 – Características dos modelos de carga

Característica	Impedância constante	Corrente constante	Potência constante
Varia com a tensão	$S_C = \frac{V_C^2}{Z_C^*}$	$S_C = V_C \cdot I_C$	$I_C = \frac{S_C^*}{V_C^*}$
Não varia com a tensão	$Z_C = R_C + j \cdot X_C$	$I_C = I_C \angle \theta$	$S_C = P_C + j \cdot Q_C$

Os modelos de impedância constante e potência constante (ou a composição de ambos) são mais adequados para estudos de fluxo de potência. Vale a pena ressaltar que algumas aproximações no modelo de carga não comprometem de maneira significativa os cálculos, pois em geral, a parcela correspondente à

corrente pré-falta é relativamente pequena em relação à corrente total de curto fazendo com que, muitas vezes, a corrente pré-falta não seja considerada nos cálculos, simplificando, desta forma, o procedimento (ZANETTA, 2005).

2.1.2 Controle de tensão em sistemas de distribuição

Serão apresentados alguns conceitos básicos relacionados ao controle de tensão em sistemas de distribuição, sobretudo, evidenciando os termos usados ao longo do trabalho, visando dar embasamento para uma melhor compreensão do texto.

- Tensão nominal: é o valor utilizado no projeto de determinado equipamento, ou seja, valor fornecido pelo fabricante.
- Regulação de tensão: é a variação existente entre o valor máximo e o mínimo de tensão num determinado ponto do sistema elétrico. A regulação é dada conforme a equação (1).

$$R = V_0 - V_1 \quad (1)$$

Onde:

V_0 - tensão máxima

V_1 - tensão mínima

Geralmente, a regulação de tensão é expressa em termos percentuais, de acordo com a Equação (2), logo:

$$R = \frac{V_0 - V_1}{V_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

- Métodos diretos de obtenção das grandezas elétricas: Os valores das grandezas elétricas são obtidos através de leituras diretas nos instrumentos indicadores ou registradores de medição.

- Métodos indiretos de medição das grandezas elétricas: Os valores das grandezas elétricas são obtidos por meio de cálculos ou através de correlações estatísticas com outras grandezas.
- Oscilação de tensão: é uma série regular ou irregular de variações no valor da tensão (PINTO, 1985).
- Ponto de entrega: ponto de conexão do sistema elétrico da empresa distribuidora de eletricidade com a instalação elétrica da(s) unidade(s) consumidora(s) e que delimita as responsabilidades da distribuidora, definidas pela autoridade reguladora (ABNT, 2004).

Os aparelhos eletrodomésticos e equipamentos elétricos em geral, como os motores de indução, por exemplo, são projetados para produzir um determinado trabalho, cujo desempenho e vida útil são alterados de acordo com vários fatores, dentre eles o mais comum é quando existe uma diferença entre a tensão nominal e a fornecida pela concessionária, sendo que quanto maior essa diferença, menor a vida útil do equipamento.

Para ter-se noção de como as variações curtas de tensão (como as decorrentes da partida de motores) alteram as características de funcionamento dos equipamentos elétricos, toma-se como exemplo a vida útil das lâmpadas incandescentes, cujo valor é dado conforme a Equação (3) (PINTO, 1985).

$$Vida_{util} = Vida_{nom} \cdot \left(\frac{V_{nom}}{V_f} \right)^{13,1} \quad (3)$$

$Vida_{util}$ - vida útil da lâmpada;

$Vida_{nom}$ - vida nominal da lâmpada;

V_{nom} - tensão nominal;

V_f - tensão fornecida.

Através da Equação (3), percebe-se que se haver uma elevação da tensão fornecida V_f de 5%, a redução da vida útil da lâmpada incandescente é cerca de 50%.

Com relação aos motores de indução, as variações da tensão de fornecimento resultam em alterações do funcionamento destes, isso ocorre devido à relação quadrática entre a tensão aplicada ao motor e sua característica do conjugado versus escorregamento. A seguir, estão listados alguns parâmetros mecânicos e elétricos que têm alterações quando ocorrem oscilações de tensão:

- Torque de partida: diminui com a redução da tensão;
- Corrente de partida: diminui com a redução da tensão;
- Corrente plena carga: aumenta com a redução da tensão;
- Velocidade nominal: diminui ligeiramente com a redução da tensão.

Além disso, os equipamentos de comando e proteção bem como o próprio motor de indução, possuem um limite de tensão, abaixo da nominal, que podem operar sem que haja perda de funcionalidade dos mesmos. Como exemplo pode-se citar os contadores da classe 600 V que podem operar normalmente até 85% da tensão nominal. Com relação ao motor de indução, à plena carga, deixam de funcionar quando a tensão for inferior a 71% da tensão nominal (MAMEDE FILHO, 2010).

2.1.3 Oscilações de tensão

Em termos gerais, entende-se por problemas na qualidade da energia, aqueles manifestados na tensão, corrente ou frequência que resultam na falha ou no funcionamento incorreto de algum equipamento (DUGAN, et al., 2002).

Nos últimos anos, tem merecido especial atenção as questões relacionadas à qualidade de energia, sobretudo, com relação às oscilações de tensão resultantes na partida de motores. Isto se deve ao fato da utilização cada vez maior de equipamentos eletrônicos nos processos de automação das indústrias, ou seja, estes equipamentos são sensíveis a qualquer variação de tensão no sistema (LEBORGNE, 2003).

Em outras palavras, se a magnitude e duração dos afundamentos de tensão forem maiores que a sensibilidade dos equipamentos, estes podem parar de operar temporariamente, ou até mesmo tornarem-se inutilizáveis, causando assim, o bloqueio de parte ou toda a produção, causando prejuízos de ordem técnica e

financeira (TANG, et al., 2000). Além disso, pode haver perda de informações nos sistemas computacionais, funcionamentos incorretos, disparos indesejados, entre outros (MARTINS, et al., 2003).

Dentre os principais problemas causados, com relação à tensão, destacam-se:

- Subtensão momentânea (*voltage sag*): também conhecido por “cava de tensão”, pode ser provocado, por exemplo, por um curto-circuito momentâneo num outro alimentador do mesmo sistema elétrico ou durante a partida de um motor, que tem comportamento semelhante a um curto-circuito.
- Sobretensão momentânea (*voltage swell*): pode ser provocada, entre outros casos, por situações de defeito ou operações de comutação de equipamentos ligados à rede elétrica.
- Transitórios: ocorrem como resultado de fenômenos transitórios, tais como a comutação de bancos de capacitores ou descargas atmosféricas.
- Flutuação da tensão (*flicker*): acontece devido a variações intermitentes de certas cargas, causando flutuações nas tensões de alimentação (que se traduz, por exemplo, em oscilações na intensidade da iluminação elétrica) (MARTINS, et al., 2003).

A Figura 5 mostra as formas de onda para subtensão momentânea, sobretensão momentânea, transitórios e flutuação da tensão.

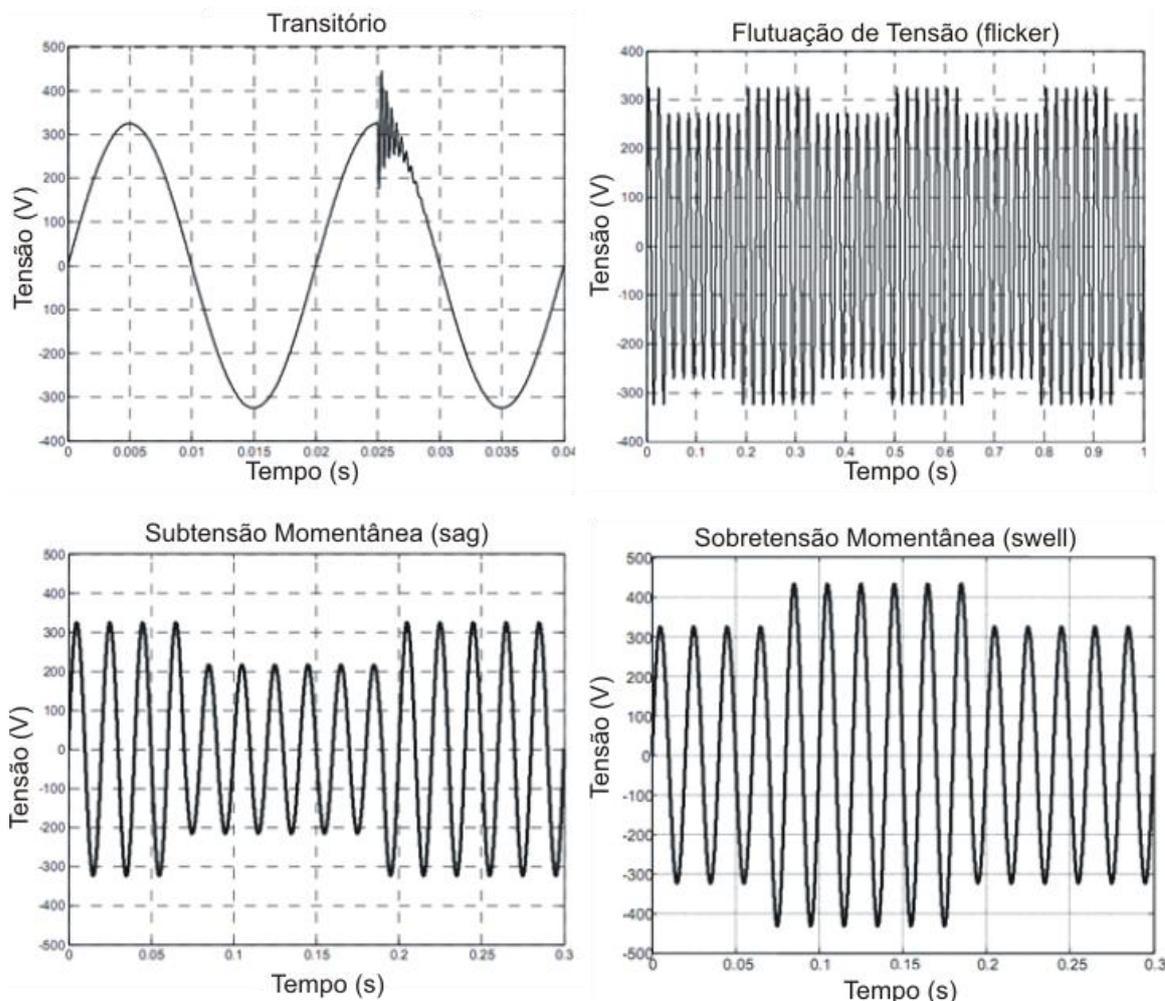


Figura 5 – Alguns problemas na qualidade da tensão da rede elétrica

Fonte: Adaptado de Martins (2003).

2.1.4 Afundamentos de tensão

As perturbações nos sistemas elétricos podem ser divididas em duas categorias: as grandes perturbações e as pequenas perturbações. Como grandes perturbações pode-se considerar um curto-circuito, a variação brusca de carga, perda de geradores, entre outros. Como exemplo de pequenas perturbações se destacam as variações normais da carga.

Um afundamento de tensão (*voltage dip*) é uma das perturbações principais em sistemas industriais e consiste na redução em um período curto de tempo ou a perda completa da tensão RMS (valor médio quadrático) (DUGAN, et al., 2002). Em termos técnicos, os afundamentos de tensão são geralmente rápidos, no

entanto o IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) classifica os afundamentos de tensão, de acordo com a duração, conforme abaixo:

- Instantâneos: entre 0,5 ciclo e 30 ciclos;
- Momentâneos: entre 30 ciclos e 3 segundos;
- Temporários: entre 3 segundos e 1 minuto.

Em termos do valor da tensão, ocorre um decréscimo no valor médio quadrático (RMS) no ponto mais baixo durante o afundamento e possui valor que varia entre 0,1 pu e 0,9 pu na frequência de operação (AUNG, et al., 2005). Em outras palavras, dizer que um afundamento de tensão é de 0,8 pu significa que a tensão foi reduzida para o patamar de 0,8 pu. Se a intensidade for menor que 0,10 pu é considerado pelo como sendo uma interrupção (IEEE, 1995).

A magnitude do afundamento de tensão durante a partida de um motor é função, principalmente, das seguintes variáveis (NEVELSTEEN, et al., 1989):

- Corrente de partida do motor;
- Impedância do local da partida até o ponto.

Existem duas causas principais para os afundamentos de tensão: faltas nos ramais da rede e a partida de grandes cargas. As faltas da rede são geralmente de curta duração (menos de um segundo), porém são de grande amplitude. Por outro lado, quando se considera a partida de grandes cargas, as oscilações podem durar vários segundos (CHAPMAN, 2002).

Assume-se, geralmente, que os afundamentos de tensão possuem a forma de onda retangular. Isto pode ser considerado negligenciando o fato de haver uma mudança na impedância de falta durante o progresso desta. No entanto, para o caso de motores de indução, a forma de onda do afundamento de tensão é deformada devido à resposta dinâmica do motor de indução. Os efeitos das quedas de tensão nos terminais do motor refletem na diminuição do torque e velocidade do motor. Se a magnitude for demasiada grande o motor pode reacelerar, resultando numa quantidade de corrente maior solicitada da rede (AUNG, et al., 2005). Em consequência disso, os afundamentos de tensão tem a forma de onda similar a Figura 6.

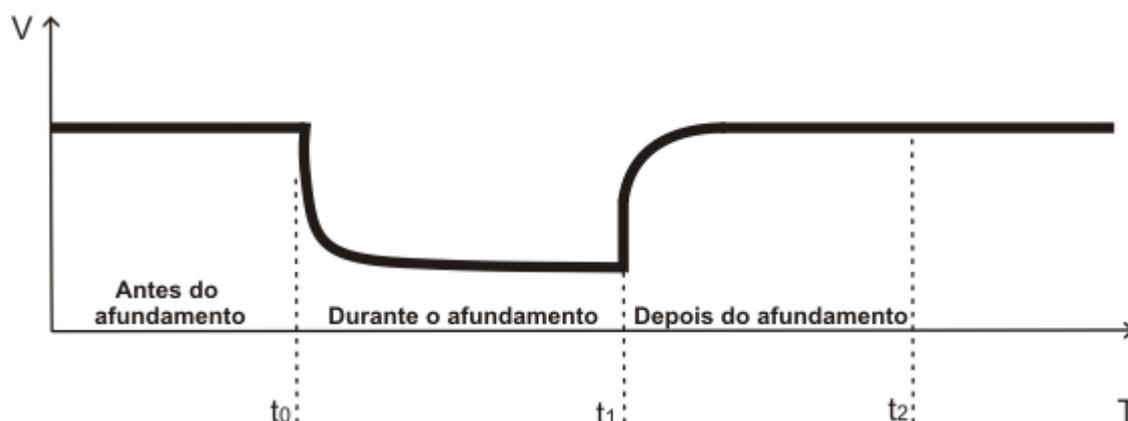


Figura 6 – Afundamentos de tensão devido à resposta dinâmica do motor

Fonte: Adaptado de Aung et.al. (2005).

2.1.5 Afundamentos causados por grandes cargas

A corrente de partida de um MIT é normalmente superior a nominal, na ordem de 6 a 10 vezes. Em específico, quando se trata da partida e movimentação de grandes cargas, requerem-se motores com potência elevada e isso implica em uma corrente de partida com magnitude ainda maior. Por outro lado, os cabos da instalação são dimensionados para a corrente de funcionamento normal. Sendo assim, a corrente inicial alta pode causar uma queda de tensão na rede de alimentação e na instalação. A magnitude deste efeito depende da impedância da rede no chamado PCC (ponto de conexão comum) e também da impedância do cabeamento da instalação. Quanto mais perto estiver a carga da fonte, em menor quantidade e menos severos serão os afundamentos (CHAPMAN, 2002).

Se forem considerados afundamentos de tensão durante períodos curtos de tempo, constata-se que os motores de indução podem ajudar a carga durante este período devido a inércia, regenerando energia conforme reduzem a velocidade. No entanto, é importante observar que em muitas situações todos os motores iniciam a partida ao mesmo tempo e isto pode ser a causa de problemas adicionais, ou seja, nesta situação, a inércia já não é suficiente para suprimir os efeitos dos afundamentos de tensão (CHAPMAN, 2002).

É fato, desta forma, que para grandes cargas devem ser usados mecanismos para redução da corrente de partida a valores mínimos de forma a

partida e conseqüentemente reduzem a potência de rotor bloqueado. Isso pode ser visto através da

Figura 7 onde uma redução na corrente de partida promove um alívio na corrente da rede, que por sua vez conduz a um aumento na amplitude da tensão V , aproximando-a do módulo da tensão E . Com a redução da corrente I para I' , a tensão passa de V para V' , reduzindo a diferença entre os módulos de E e V .

2.1.7 Normas regulamentadoras

Cada concessionária de energia elétrica possui suas normas quanto às quedas de tensão permitidas no ponto de entrega da instalação. Por outro lado, a NBR 5410 estabelece alguns limites de quedas de tensão na partida de motores como forma de evitar perturbações que comprometam a rede de distribuição, a própria instalação e o funcionamento das demais cargas por ela alimentadas.

O dimensionamento dos condutores que alimentam os motores deve ser tal que, em regime permanente, as quedas de tensão nos terminais do motor e em outros pontos de utilização da instalação não ultrapassem os limites de queda estabelecidos por cada concessionária (geralmente entre 5% e 7%). Por outro lado, durante a partida, o dimensionamento dos condutores deve ser de forma que a queda de tensão nos terminais do dispositivo de partida não ultrapasse 10% da respectiva tensão nominal.

Além disso, a NBR 14039 que estabelece normas para instalações elétricas de média tensão (1kV a 36,2 kV), acrescenta que a queda de tensão entre a origem de uma instalação e qualquer ponto de utilização deve ser menor ou igual a 5% quando se utiliza níveis de média tensão.

Outro aspecto de fundamental importância quando se trata de oscilações de tensão é com relação ao número de partida por unidade de tempo do motor. A Figura 8 mostra os limites de oscilação máxima permitidos, onde se verifica que quanto mais partidas são realizadas por minuto, menor deve ser a oscilação de tensão para não haver danos maiores ao motor e a instalação. Por outro lado, se o motor parte poucas vezes ao dia o limite de queda de tensão é maior, por volta de 9%, para o caso de 12 partidas por dia, por exemplo.

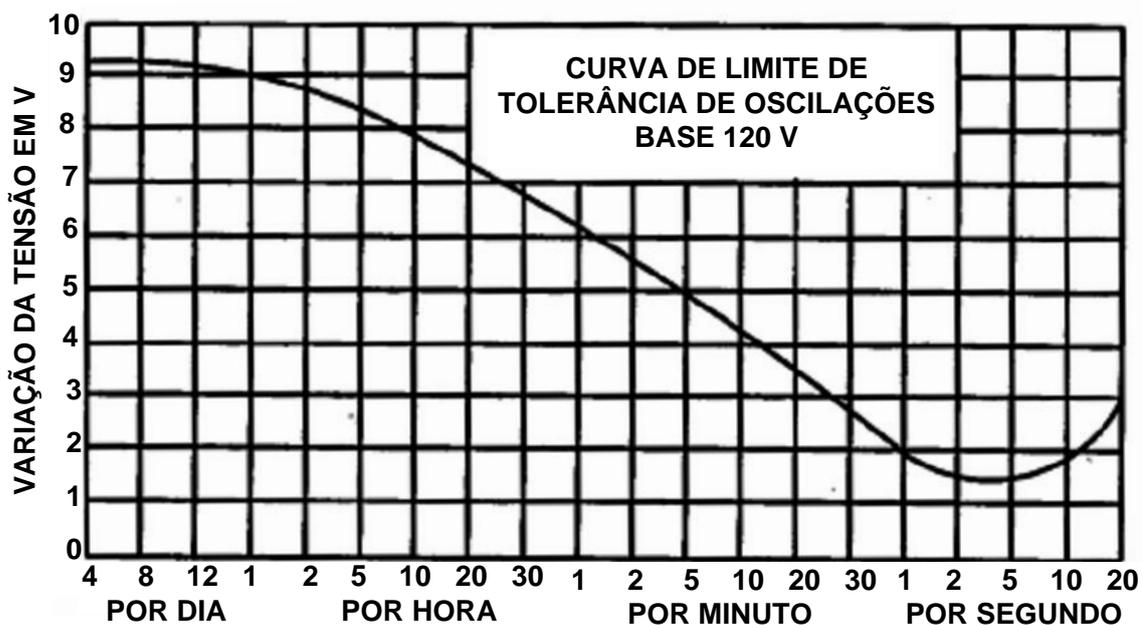


Figura 8 – Limites de tolerância das oscilações de tensão.

Fonte: Adaptado de Mamede (2010)

De acordo com as informações supracitadas e com a Figura 8, será considerado neste trabalho, para efeitos de cálculo, que o limite máximo de queda de tensão admissível seja de 10%, seja no alimentador do próprio motor ou em qualquer uma das barras adjacentes do sistema.

2.1.8 Aspectos econômicos

Em relação à partida dos motores, vale ressaltar que tanto a demanda quanto o consumo de energia elétrica não são afetados de forma significativa, uma vez que a demanda vista pelo medidor é integralizada no tempo de 15 minutos e o tempo de partida dos motores é na ordem de alguns segundos à minutos quando se trata de motores de grande porte (MAMEDE FILHO, 2010).

No entanto, quando se trata de afundamentos de tensão, a questão econômica torna-se relevante, não pelo fato do consumo ou demanda, mas com relação às consequências técnicas de operação tanto do motor quanto dos outros equipamentos conectados à rede. As indústrias, por sua vez, têm investido cada vez

mais em equipamentos que garantam máxima produtividade. Desta forma, uma interrupção passa a ter impactos econômicos consideráveis (DUGAN, et al., 2002).

Em determinadas situações, a simples mudança no método de partida é suficiente para a compensação, porém em outros casos pode ser necessário à mudança de mais elementos do sistema. Em termos econômicos e de segurança é mais recomendado projetar um equipamento ou até mesmo redimensionar o motor, ao invés de adaptar todo o sistema à mudança conforme se verifica através da Figura 9, onde o custo da solução aumenta rapidamente conforme o ponto de tratamento é transferido do equipamento dentro da planta para a infraestrutura.

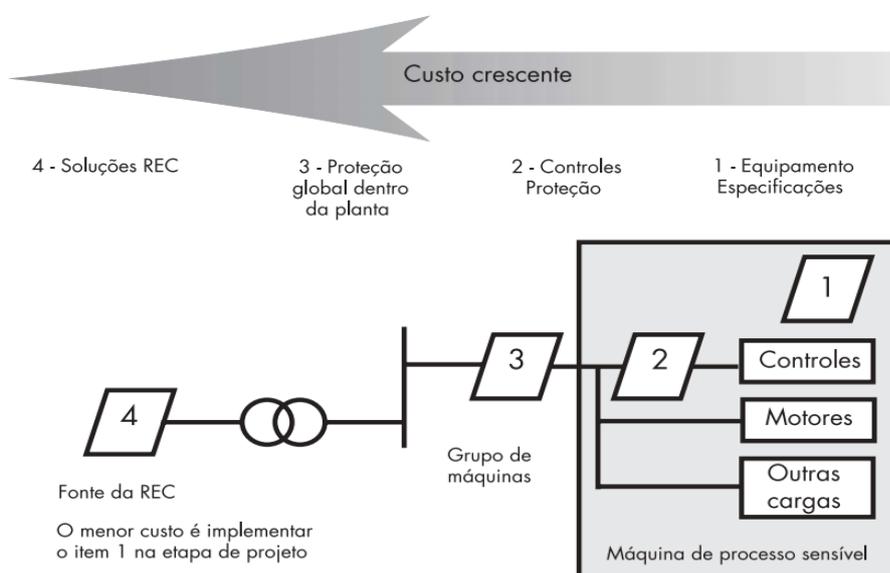


Figura 9 – Custo de melhorias na tolerância aos afundamentos

Fonte: Chapman (2002).

Vale ressaltar que além das cargas circunvizinhas ao motor que está partindo sofrerem as consequências do afundamento de tensão, os equipamentos de proteção como os relés e contadores também são sensíveis a estes afundamentos e podem, muitas vezes, ser o elo mais fraco do sistema (CHAPMAN, 2002).

2.2 ESTRATÉGIAS DE ACIONAMENTOS DE MOTORES ELÉTRICOS

De todas as máquinas existentes em operação, a máquina de indução é aquela que apresenta o maior número de unidades em serviço, correspondente aproximadamente a 60% do consumo de energia dos países industrializados (GOMES, et al., 2001). Isto ocorre devido à simplicidade, robustez e a seu custo ser relativamente pequeno, quando comparado com o custo de uma máquina de corrente contínua ou de uma máquina síncrona de igual potência (SIMONE, 2000).

Os motores elétricos de indução, por sua vez, podem ser acionados de diversas maneiras, dependendo das características do fornecimento de energia elétrica e da demanda que se tem da máquina. A razão para a existência de diferentes métodos de partida consiste no fato de provocar a diminuição da corrente de partida do motor, sobretudo, para diminuir as quedas de tensão nos terminais do motor e nas cargas circunvizinhas (NEVELSTEEN, et al., 1989).

O método de acionamento mais simples existente é a partida direta, onde a corrente de partida não é limitada e o conjugado também não é afetado. As partidas que utilizam chave estrela triângulo e chave compensadora também são métodos considerados simples e baratos e são utilizados, geralmente, em aplicações que não exigem alto conjugado na partida.

Além destes, atualmente, utilizam-se soft-starter e inversores no acionamento dessas máquinas, recursos estes que tem se tornado cada vez mais comum nas indústrias de todos os portes visto os benefícios trazidos por esses dispositivos como redução considerável da corrente de partida. Os inversores ainda tem a vantagem de controle da velocidade do motor através do ajuste da frequência de alimentação.

A seguir, apresentar-se-á, em maiores detalhes as características técnicas e de funcionamento de cada um dos métodos supracitados.

2.2.1 Partida direta

A partida direta é um dos métodos mais simples de partida de motores e não exige dispositivos especiais para acionamento do motor. Utilizam-se apenas contadores, disjuntores ou chaves interruptoras. Além disso, a chave de partida direta é um dispositivo pelo qual o motor parte com valores plenos de conjugado e de corrente de partida, pois suas bobinas recebem a tensão nominal de serviço (MAMEDE FILHO, 2010). No entanto, algumas condições devem ser satisfeitas para a obtenção de sucesso quando se considera a partida direta, dentre elas, deve-se destacar que a capacidade de fornecimento de corrente da rede precisa ser grande, de forma que a corrente de partida do motor não seja relevante.

Por outro lado, em muitos casos, utiliza-se a partida direta sem realizar essas considerações técnicas fazendo com que as acentuadas oscilações de tensão afetem o sistema causando danos a este. É importante ressaltar ainda, que de acordo com a NBR 5410 para a partida direta de motores com potência acima de 3,7 kW (5 CV), em instalações alimentadas diretamente pela rede de distribuição pública e em baixa tensão, deve ser consultada a empresa distribuidora local.

Além disso, a partida deve ser realizada sem carga, reduzindo a corrente de partida, e por consequência, atenuando os efeitos sobre o sistema de alimentação (NEVELSTEEN, et al., 1989).

O diagrama de força e de comando para a partida direta é representado na Figura 10.

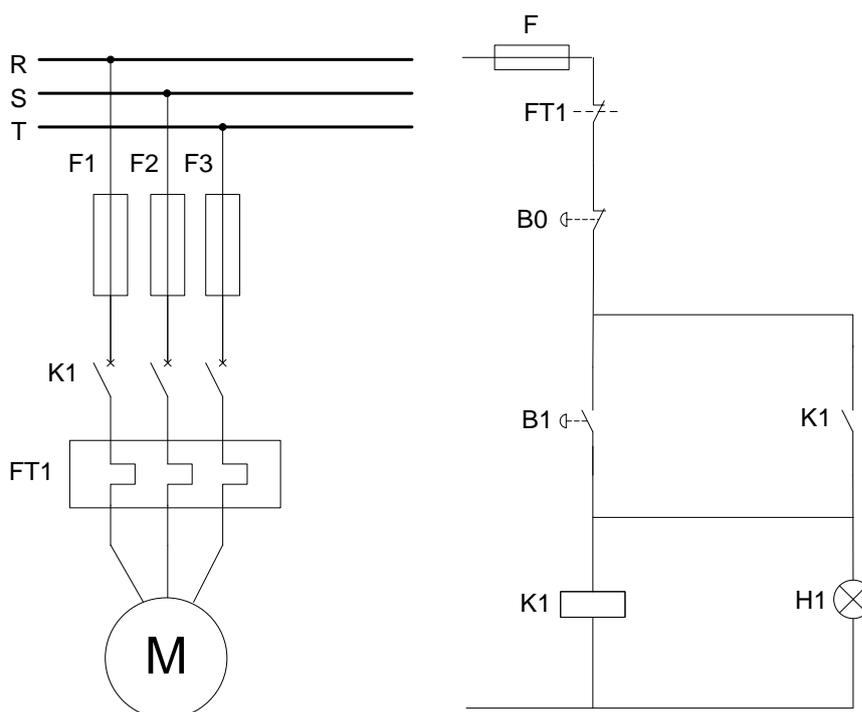


Figura 10 – Diagrama de força e comando para partida direta

Fonte: Adaptado de Franchi (2008).

Onde:

F - Fusível

FT_1 - Relé de sobrecarga

K_1 - Contator

B_0 - Botão de desligar

B_1 - Botão de ligar

H_1 - Lâmpada de indicação

O funcionamento do circuito de comando para a partida direta consiste basicamente dos seguintes comandos: apertando-se a botoeira B_1 o circuito é energizado e o contator K_1 é acionado. Nesse instante, o contato de K_1 é fechado e quando a botoeira B_1 é solta o circuito fica energizado por esse caminho alternativo. Quando a botoeira B_0 é acionada, o contator K_1 é desligado automaticamente e o circuito é interrompido.

2.2.2 Partida estrela-triângulo

Uma das formas de suavizar os efeitos de partida de motores elétricos é a utilização da partida estrela-triângulo. Para o acionamento do motor através desse tipo de chave é necessário que o motor possua seis terminais disponíveis e deve dispor de dupla tensão nominal. (MAMEDE FILHO, 2010)

O procedimento para o acionamento do motor consiste basicamente do acionamento do motor em ligação estrela, reduzindo-se a corrente de linha em três vezes e após determinado tempo (geralmente quando o motor atinge velocidade próxima da nominal, cerca de 90%), realiza-se a troca da ligação para triângulo de forma automática.

Uma das desvantagens deste tipo de ligação é que o conjugado também se reduz três vezes, portanto, deve se empregar este tipo de acionamento para partidas que não exijam conjugado de partida alto (FRANCHI, 2008).

O diagrama de força multifilar é mostrado na Figura 11 e o de comando na Figura 12 para a partida estrela triângulo.

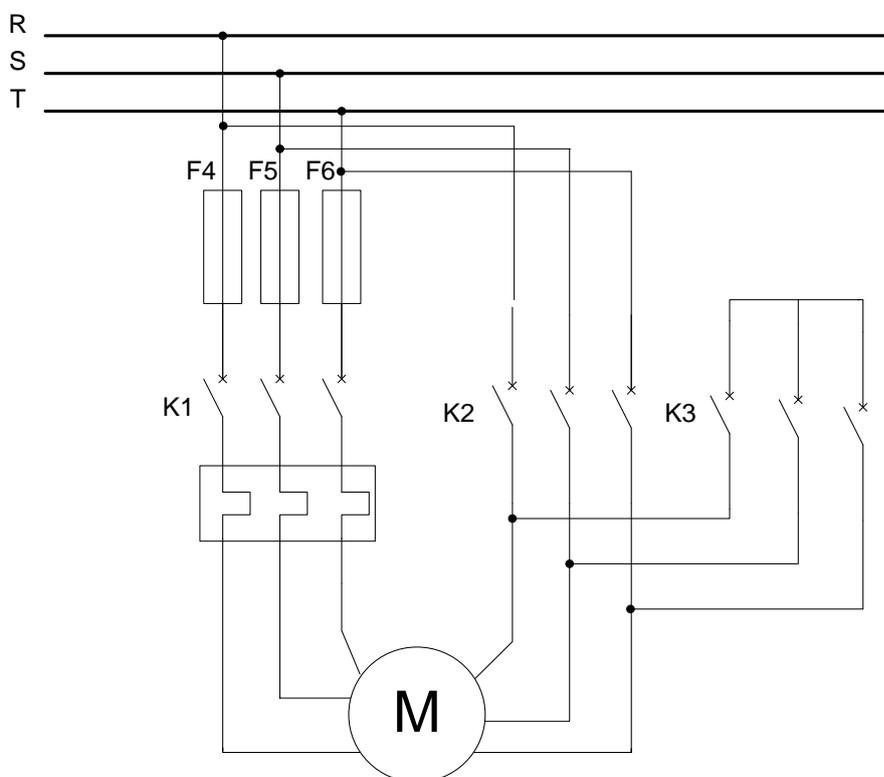


Figura 11 – Diagrama de força multifilar para partida estrela-triângulo

Fonte: Adaptado de Franchi (2008).

triângulo, isto ocorre quando o contato do relé temporizador KT_1 é fechado e o contator K_2 é acionado, permanecendo, portanto, o contator K_1 e o contator K_2 funcionando em regime. Quando a botoeira B_0 é acionada, o fornecimento de corrente para o circuito é interrompido e conseqüentemente o motor é desligado.

2.2.3 Soft-Starter

As soft-starters são chaves de partida estática destinada à aceleração, desaceleração e proteção de motores de indução trifásicos. Através do ajuste do ângulo de disparo dos tiristores realiza-se o controle da tensão aplicada ao motor, permitindo, desta forma, a obtenção de partidas e paradas suaves.

Além disso, com o ajuste adequado das variáveis, o torque produzido é ajustado à necessidade da carga, garantindo que a corrente solicitada seja a mínima necessária para a partida.

A grande parte das soft-starters utilizadas nos dias de hoje são microprocessadas, totalmente digitais e dotadas de tecnologia de ponta e são projetadas de forma a garantir a melhor performance na partida e parada de motores de indução, apresentando-se como uma solução completa e de baixo custo. Além disso, dispõe-se de uma interface homem-máquina que permite fácil ajuste dos seus parâmetros.

Para as simulações deste trabalho, supõe-se que o ajuste do ângulo de disparo dos tiristores é feito de tal forma que a tensão inicial seja 35% da nominal, e o torque resultante, embora reduzido, é ainda suficiente para colocar o motor (em vazio) em movimento.

2.3 METODOLOGIA

2.3.1 Introdução

Para um único alimentador, um método clássico de análise das oscilações se baseia no divisor de tensão. Para avaliar as oscilações nos alimentadores e barras circunvizinhas, esse método é limitado e trabalhoso, exigindo a obtenção de circuitos equivalentes. No sentido de generalizar a avaliação de amplitudes de oscilações para todo tipo de rede, com qualquer quantidade de barras, como sistemas elétricos de potência interligados, redes elétricas radiais com vários alimentadores, ou mesmo um único alimentador, esse trabalho discute e formaliza dois métodos de análise. Pretende-se, portanto, estabelecer as equações e procedimentos que caracterizem cada um dos métodos propostos, as vantagens, desvantagens e limitações e realizar a aplicação destes a uma rede elétrica.

2.3.2 Método do fluxo de potência

Um primeiro método para a obtenção das amplitudes das oscilações de tensão, em todas as barras da rede elétrica, dada a partida de um ou mais motores em quaisquer barras, utiliza a teoria de fluxo de potência. Como o interesse aqui são as amplitudes das oscilações, não há necessidade de uma análise dinâmica da partida de motores. Assim, aplica-se o fluxo de carga para se identificar no exato momento da partida a magnitude das oscilações. O método aqui proposto utiliza-se de dados como a potência de rotor bloqueado (obtida a partir do catálogo do motor) e também pode ser aplicado tanto a sistemas radiais como malhados.

Um dos métodos de fluxo de carga mais utilizados é o de Gauss-Seidel que usa formulação das equações do sistema elétrico de potência em números complexos, o que resulta em uma equação por barra, excetuando-se a barra flutuante.

A Equação (4) representa a fórmula geral do método de Gauss-Seidel, onde i corresponde à iteração e k a barra do sistema. Nota-se que os valores

substituídos são aqueles mais recentes, ou seja, à medida que os valores são determinados, estes são utilizados no processo de substituição, ou seja:

$$V_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \cdot \left(\frac{P_k - j \cdot Q_k}{V_k^{*(i)}} - \sum_{m=1}^{k-1} Y_{km} \cdot V_m^{(i+1)} - \sum_{m=k+1}^n Y_{km} \cdot V_m^{(i)} \right) \quad (4)$$

Além disso, para que haja convergência é importante que o conjunto de valores arbitrados esteja próximo da solução. O critério de convergência é representado pela Equação (5).

$$\Delta V_k = \left| V_k^{(i)} - V_k^{(i-1)} \right| \leq \varepsilon \quad (5)$$

Se for considerada a análise de sistemas complexos, do ponto de vista de possuir inúmeras cargas dispostas em diferentes barras, faz-se necessário o uso de recursos computacionais para a determinação das amplitudes das tensões nas barras do sistema. Neste aspecto, utilizar-se-á o software de simulação *matlab*, que permitirá determinar as oscilações nas n barras de um determinado sistema industrial.

2.3.1 Método de curto circuito

Além disso, como ferramenta auxiliar para a comprovação dos resultados encontrados através do fluxo de potência, pretende-se utilizar da teoria de curto circuito trifásico equilibrado, onde tipicamente é requerida a matriz de impedâncias.

Da mesma forma que na análise através do método do fluxo de potência, são necessárias as tensões pré-falta de barras, impedâncias de transferência entre barras e impedâncias próprias de barras. Na consideração deste método são necessárias algumas adaptações, dentre elas, destaca-se que a impedância de falta é substituída pela impedância de rotor bloqueado.

Além disso, considera-se que o sistema está inicialmente (antes da partida de um ou mais motores) funcionando em regime permanente sob condições conhecidas de geração e de carga.

O procedimento para o cálculo das oscilações de tensão considerando este método é composto das seguintes etapas principais.

1. Através de um estudo de fluxo de potência, determinar as tensões iniciais em cada barra do sistema, ou seja, os valores antes da partida.
2. Determinar a matriz de admitância de barra Y .
3. Calcular a matriz de impedância de barras Z , invertendo-se a matriz Y .
4. Calcular as oscilações de tensão máximas durante a partida.
5. Através da diferença entre os valores finais encontrados no item 4 e dos valores iniciais do item 3, obtém-se as quedas de tensão em cada barra.

Portanto, as fórmulas que serão desenvolvidas a seguir permitirão o cálculo das oscilações de tensão pelo método de curto circuito para sistemas generalizados, isto é, aplicáveis a sistemas com n barras.

Apresenta-se a seguir, a nomenclatura das variáveis que serão utilizadas nos equacionamentos:

V_{bus}^i - Tensão antes da partida

V_{bus}^f - Tensão pós-partida do motor

ΔV - Variação de tensão na barra

Z_{bus} - Matriz de impedância

I^p - Corrente na partida do motor

Z^m - Impedância do motor

A Equação (6) representa a variação de tensão numa barra, ou seja, a diferença entre o valor máximo de oscilação de tensão que ocorre durante a partida.

$$\Delta V = V_{bus}^f - V_{bus}^i \quad (6)$$

Pode-se obter o valor de ΔV ainda conforme a Equação (7).

$$\Delta V = Z_{bus} \cdot I^p \quad (7)$$

Assim, substituindo ΔV na Equação (6).

$$V_{bus}^f = V_{bus}^0 + Z_{bus} \cdot I^p \quad (8)$$

Por outro lado, a tensão pós-partida do motor em uma barra arbitrária q é relacionada com a corrente de falta conforme a Equação (9).

$$V_q^f = Z^m \cdot I^p \quad (9)$$

Portanto, a corrente de falta resulta como se mostra na Equação (10):

$$I^p = \frac{V_q^0}{Z^p + Z_{qq}} \quad (10)$$

Finalmente, obtêm-se através da Equação (11) o valor das tensões pós-partida para cada barra do sistema. Sendo que q representa a barra em que o motor está partindo e i qualquer outra barra do sistema.

$$\begin{cases} V_i^f = V_i^0 - \frac{Z_{iq}}{Z_f + Z_{qq}} \cdot V_q^0, & i \neq q \\ V_q^f = \frac{Z^f}{Z_f + Z_{qq}} \cdot V_q^0, & i = q \end{cases} \quad (11)$$

2.4 RECURSOS NECESSÁRIOS

Os recursos necessários para a execução do projeto são:

- Acesso ao portal periódico da Capes
- Software Matlab
- Livros disponíveis na biblioteca da UTFPR
- Consulta a dissertações e teses correlatas a área de trabalho
- Visitas ao britador

3. APLICAÇÃO DO MÉTODO A UM ALIMENTADOR

3.1 Alimentador Único

Como forma de verificação dos métodos de análise propostos nesse trabalho, far-se-á, inicialmente, a análise considerando um único alimentador que é mostrado na Figura 13 e que aciona um motor de 100 CV.

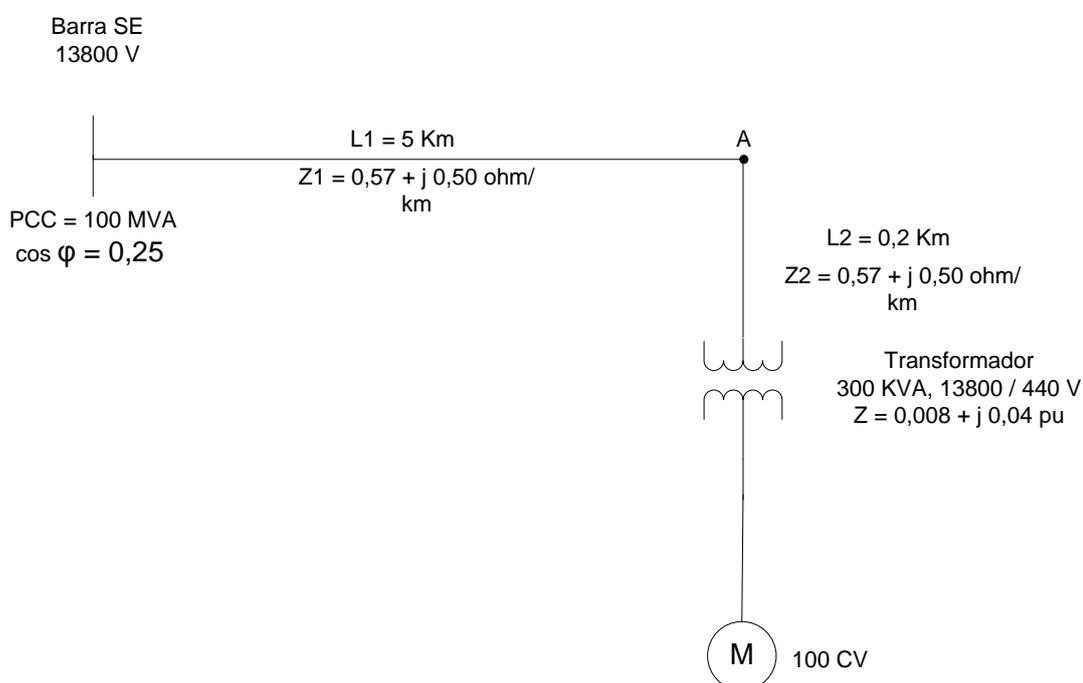


Figura 13 – Rede elétrica com um único alimentador

Fonte: Adaptado de Pinto (1985).

Na Figura 14 mostra-se o diagrama de impedâncias do sistema apresentado na Figura 13. Percebe-se que o sistema foi dividido em cinco barras, sendo que a barra 1 é uma barra fictícia, ou seja, é a referência do sistema.

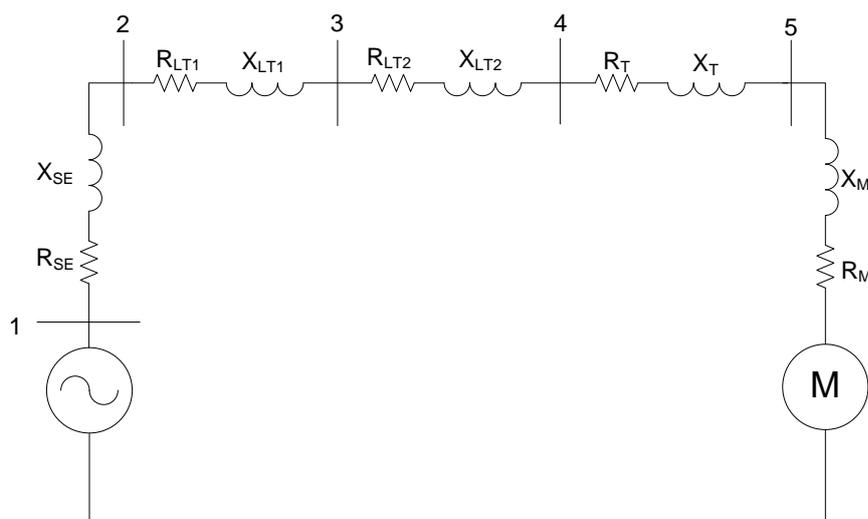


Figura 14 – Diagrama de impedâncias

Fonte: Autoria própria.

As simulações foram realizadas utilizando o software *matlab* considerando três métodos distintos. O primeiro é utilizando-se do divisor de tensão, que para um alimentador é implementado de maneira simples, no entanto, quando se considera um número de barras e de alimentadores maior este método torna-se trabalhoso e obsoleto. O segundo utiliza-se da teoria de fluxo de potência e finalmente o último método fornece os resultados das oscilações de tensão em cada barra através da adaptação da teoria de curto circuito trifásico equilibrado.

A Tabela 2 mostra os valores percentuais de afundamentos de tensão em cada barra da rede, bem como as diferenças para cada um dos métodos apresentados.

Tabela 2 – Valores percentuais de oscilação de tensão

Barra i	Divisor tensão	Fluxo potência	Curto circuito	Diferença fluxo e divisor	Diferença cc e divisor	Diferença fluxo e cc
1	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2	0,51%	0,61%	0,50%	0,10%	0,01%	0,11%
3	1,47%	1,67%	1,38%	0,20%	0,09%	0,29%
4	1,51%	1,71%	1,41%	0,20%	0,10%	0,30%
5	8,96%	9,91%	8,20%	0,95%	0,76%	1,71%

A Figura 15 representa as variações percentuais em cada barra do sistema de forma gráfica para melhor entendimento.

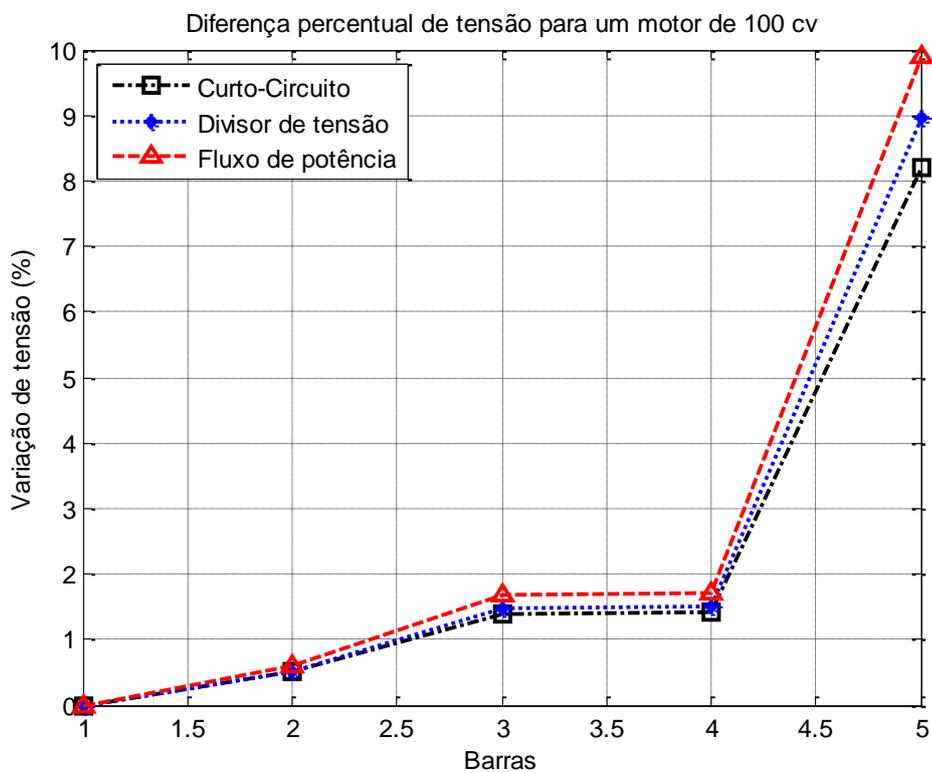


Figura 15 – Diferença percentual de tensão para o motor de 100 CV

Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos utilizando um único alimentador foram satisfatórios visto que os valores encontrados em cada método são muito próximos. Especificamente, para as quatro primeiras barras do sistema, a maior diferença percentual encontrada foi de 0,30%. Para a barra 5, localizada nos terminais do motor que está partindo, a diferença de maior relevância foi de 1,71%, em função de neste ponto do sistema a queda de tensão ser a maior entre todos os pontos, pelo fato de estar localizada no ponto mais longe da fonte de alimentação.

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Considerações iniciais

A oportunidade de realizar um estudo de caso para se determinar as oscilações de tensão em um sistema com inúmeras barras e para comprovar os resultados encontrados para um único alimentador dando maior legitimidade ao trabalho, surgiu frente a uma demanda de um britador localizado entre as cidades de Vitorino (PR) e São Lourenço d'Oeste (SC) que tinha como objetivo verificar o que causava a retirada de operação de uma usina de asfalto localizado nas proximidades (300 m) do britador quando da partida de motores na ordem de 200 CV.

Para que esse objetivo fosse cumprido com sucesso, necessitou-se deslocar-se até o britador para coleta de dados da respectiva rede industrial. Vale lembrar, que a indústria não dispõe de nenhum tipo de esquema elétrico que represente a quantidade de motores e nem as distâncias entre os trechos do sistema industrial, pois esta, aos poucos foi sendo ampliada.

Partindo desse pressuposto, foi fundamental um estudo inicial das condições da rede de suprimento, dos tipos de motores, transformadores, bem como medições das distâncias dos condutores entre os elementos do sistema industrial para determinar suas respectivas impedâncias, entre outros dados para tornar possível a aplicação dos métodos propostos neste trabalho.

4.2 Especificações do sistema industrial

A Figura 16 compõe o sistema industrial do britador de maneira simplificada, contendo apenas os motores de grande porte. Os motores auxiliares são mostrados no diagrama com a de denominação de outras cargas. Basicamente, o sistema consiste na rede de entrada de 13,8 kV, passando por dois transformadores de 500 kVA, um para o circuito primário e secundário e outro para o circuito terciário. O britador primário é composto por um motor de 150 CV. No britador secundário, por

sua vez, localiza-se o motor de 200 CV e o britador terciário é composto por dois motores de alto rendimento de 250 CV cada.

A referência do sistema é a barra 1, que é a subestação da COPEL, cuja tensão fornecida é de aproximadamente 13800 V.

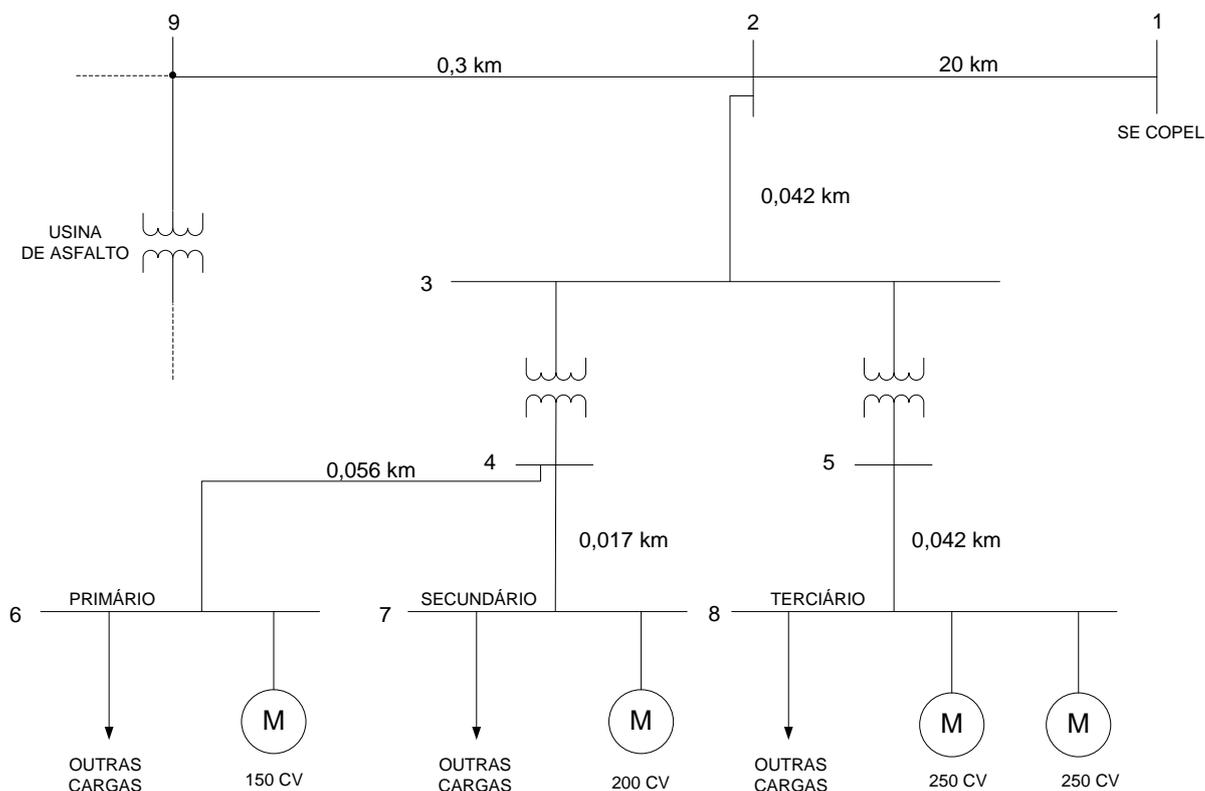


Figura 16 – Esquema simplificado dos motores e cargas do britador

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 17 mostra-se o diagrama de impedâncias do sistema industrial apresentado na Figura 16. Percebe-se que o sistema foi dividido em 9 barras, e conforme apresentado anteriormente, a barra 1 é a referência do sistema. Supõe-se, para efeitos de cálculo, que a tensão fornecida pela concessionária neste ponto seja constante e de valor 1,0 pu.

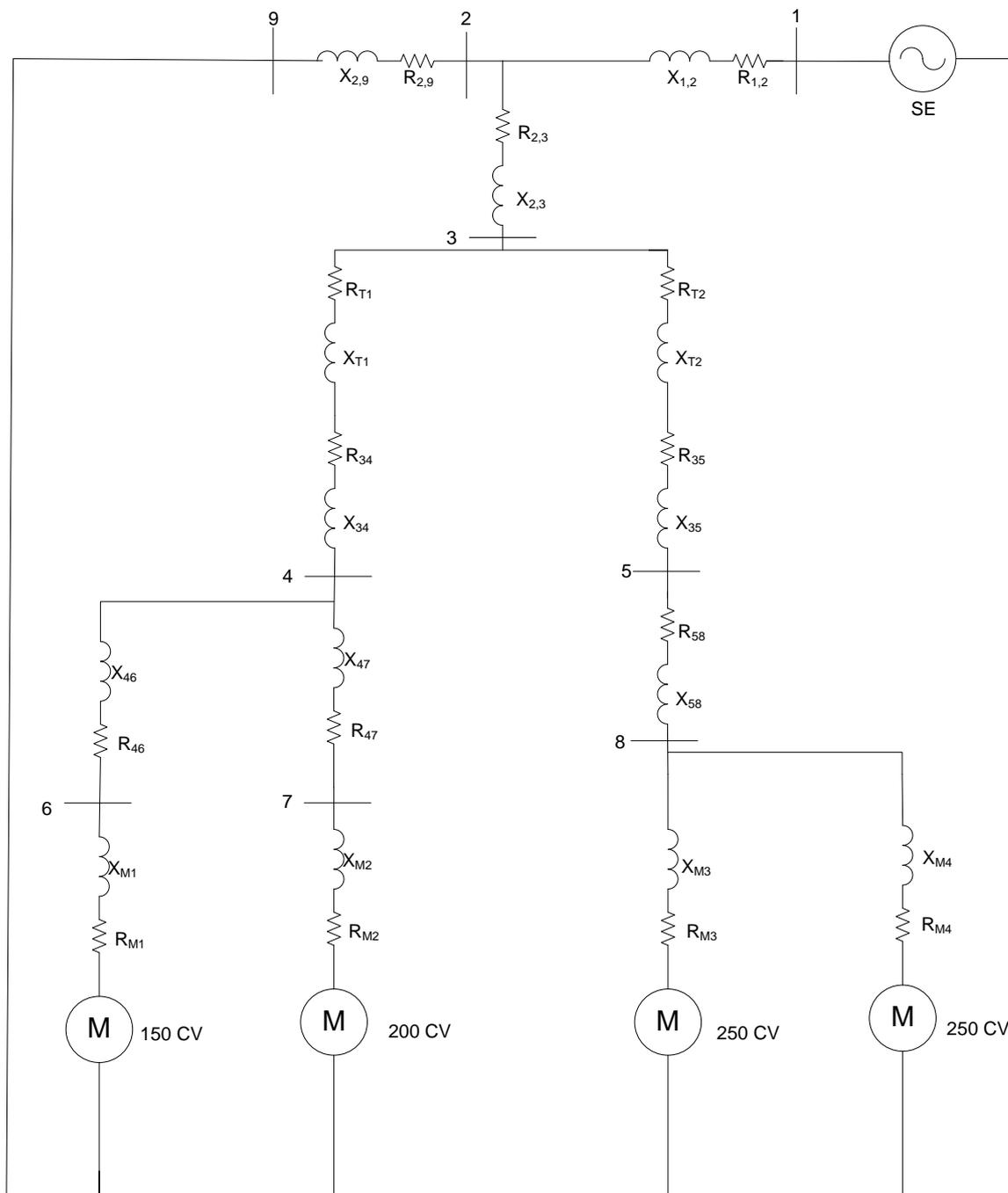


Figura 17 – Diagrama de impedâncias do britador

Fonte: Autoria própria.

4.3 Especificações dos condutores

Os valores de impedância (resistência e reatância) dos cabos do sistema elétrico do britador foram determinados através de medições do valor da secção transversal (em mm^2) de cada condutor.

Através das distâncias medidas entre as barras do sistema, torna-se possível determinar a impedância total de cada trecho conforme a Equação (12), que é obtida multiplicando o comprimento de cada trecho pela respectiva impedância e dividindo pelo número de cabos por fase. A utilização de vários cabos por fase permite diminuir a secção destes, diminuindo-se a impedância entre eles de maneira proporcional.

$$Z_T = \frac{L \cdot Z}{N} \quad (12)$$

Onde:

Z_T - Impedância total de cada trecho (ohm)

N - Número de condutores por fase

L - Comprimento entre cada barra (km)

Z - Impedância entre as barras (ohm/km)

A partir disso, determina-se a impedância total de cada trecho, cujos resultados são dados na Tabela 3.

Tabela 3 – Impedância total de cada trecho

Trecho L (km)	Tipo cabo	Cabos por fase (N)	Impedância Z (ohm/km)	Impedância total Z_T (ohm)
$L_{1,2} = 22$	Alumínio	1	$0,4245 + i0,3304$	$8,4900 + i6,6080$
$L_{2,3} = 0,042$	Alumínio	1	$0,4245 + i0,3304$	$0,0178 + i0,0139$
$L_{2,9} = 0,300$	Alumínio	1	$0,4245 + i0,3304$	$0,1273 + i0,0991$
$L_{4,6} = 0,056$	Cobre	2	$0,173 + i0,30888$	$0,0048 + i0,0086$
$L_{4,7} = 0,016$	Cobre	3	$0,272 + i0,33064$	$0,0015 + i0,0018$
$L_{5,8} = 0,042$	Cobre	4	$0,147 + i0,30267$	$0,0015 + i0,0032$

4.4 Especificações dos transformadores

As especificações nominais dos transformadores são apresentadas na Tabela 4 de modo que a potência e a tensão nominal são dados de placa de cada

equipamento coletados no britador. As denominações de transformador primário e secundário e transformador terciário referem-se ao nome dos circuitos que cada transformador é responsável por atender.

Tabela 4 – Característica dos Transformadores

Transformador do circuito	Potência (KVA)	Tensão (V)	Impedância (ohm)
PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO	500	13800/380	0,008 + i0,04
TERCIÁRIO	500	13800/380	0,008 + i0,04

4.5 Especificações dos motores

Para os motores, foram obtidos os valores de potência e tensão nominal a partir dos dados de placa e as demais informações técnicas relevantes obtidas a partir do catálogo do fabricante WEG. Os motores de 250 CV são de alto rendimento, enquanto o de 150 CV e o 200 CV são tradicionais. A potência de rotor bloqueado é dada conforme a Equação (13) e os valores de cada motor são apresentados na Tabela 5.

$$P_{RB} \text{ (KVA)} = \frac{I_p}{I_n} \cdot P \text{ (kW)} \quad (13)$$

Tabela 5 – Característica dos MIT

Motor	Potência (CV)	Potência (kW)	Pólos	I_p / I_n	FP	Potência rotor bloqueado (KVA)
1	150	110	6	7	0,83	770
2	200	150	6	7,6	0,81	1140
3	250	185	6	6,2	0,79	1147
4	250	185	6	6,2	0,79	1147

Assumindo que durante a partida dos motores o fator de potência típico pode ser adotado como 0,3 e com base nos valores de potência de rotor bloqueado de cada máquina, pode-se representar este valor de potência em termos complexos, ou seja, contendo a parcela real que fornece a potência ativa e a parcela imaginária representando a potência reativa.

A Tabela 6 reúne informações dos valores de fator de potência para regime permanente e para a partida de forma a obterem-se os valores complexos da potência para ambas as situações conforme a Equação (14). Isso é necessário, em virtude das simulações que serão realizadas, ou seja, para os motores que já estiverem em funcionamento o valor correspondente será o valor de potência nominal. Por outro lado, para o motor que irá partir deve ser utilizado o valor de potência de rotor bloqueado.

$$S_{RB} \text{ (KVA)} = P_{RB} \cdot (FP + i \cdot \text{sen} \cdot (\cos^{-1} FP)) \quad (14)$$

Tabela 6 – Dados para a partida e regime permanente

Motor	Potência (kW)	Potência rotor bloqueado (KVA)	FP partida	FP regime	S(RB)	S em RP
1	110	770	0,30	0,83	231 + i734,53	110 + i73,92
2	150	1140	0,30	0,81	342 + i1087,4	150 + i108,59
3	185	1147	0,30	0,79	344,1 + i1094,1	185 + i143,57
4	185	1147	0,30	0,79	344,1 + i1094,1	185 + i143,57

4.6 Especificações das outras cargas do sistema

Além dos quatro motores principais de 150 CV, 200 CV e dois de 250 CV, existem outros motores de potências menores (entre 10 CV e 30 CV) utilizados para o acionamento das esteiras, bombas de água, entre outros. Para efeito de cálculo, todos esses motores se comportarão como cargas (ligadas ou desligadas) conectadas aos respectivos barramentos. A Tabela 7 fornece os valores de potência total em cada barra. Considerou-se um valor de fator de potência típico para motores deste porte.

Tabela 7 – Dados para as outras cargas do sistema

Barra	Potência total (CV)	FP	Potência (kW)	Potência complexa
6	152,5	0,736	112,24	112,24 + i103,24
7	119	0,736	87,58	87,58 + i109,45
8	211	0,736	155,29	155,29 + i142,83

Além disso, para o método de curto circuito, é necessário determinar a impedância de rotor bloqueado do motor que irá partir. A determinação da impedância é realizada a partir da relação entre a tensão do motor e a potência, conforme a Equação (15).

$$Z_{RB} = \frac{V^2}{S} = \frac{13.8^2}{1.147} = 166.03\Omega$$

$$R_{RB} = Z_{RB} \cdot \cos\theta = 166.03 \cdot 0.3 = 48.80\Omega$$

$$X_{RB} = Z_{RB} \cdot \sin\theta = 166.03 \cdot 0.954 = 158.38\Omega$$

$$Z_{RB} = (48.80 + i \cdot 158.38)\Omega$$
(15)

4.7 Potência e impedância de rotor bloqueado para cada método

Independente do método utilizado para acionamento de um MIT a potência de rotor bloqueado está diretamente relacionada com a corrente de partida da máquina, através da relação expressa na Equação (16).

$$P_{RB} = V \cdot I_{RB}$$
(16)

Desta forma, quando se considera a corrente de partida fornecida pelo catálogo e realiza-se o produto com sua respectiva tensão nominal, determina-se a potência de rotor bloqueado. Por outro lado, esta consideração é válida apenas para a partida direta. Quando se consideram outros métodos de acionamento como partida compensadora, estrela triângulo ou soft-starter a corrente decai e por consequência a respectiva potência de rotor bloqueado também é torna-se proporcionalmente menor.

Para a chave estrela triângulo, a tensão diminui por raiz de três durante a partida, considerando a impedância constante e variando-se a tensão, a potência de rotor bloqueado cai de maneira proporcional ao quadrado da tensão, ou seja, um terço da potência original, conforme mostra a Equação (17).

$$S_{Y-\Delta} = \frac{V_{Y-\Delta}^2}{Z} = \frac{\left(\frac{V_{DIRETA}}{\sqrt{3}}\right)^2}{Z} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{V_{DIRETA}^2}{Z}\right) \quad (17)$$

Quando se utiliza da chave compensadora para a partida, diminui-se o enrolamento útil, diminuindo desta forma a tensão que alimenta a bobina. Assim, a potência de rotor bloqueado também cai de maneira proporcional à quantidade de enrolamento que é utilizado. Por exemplo, se 50% do enrolamento útil for utilizado para a partida, a potência de rotor bloqueado decairá de maneira proporcional ao quadrado deste valor, ou seja, diminuirá quatro vezes em relação a potência original conforme mostra a Equação (18).

$$S_{COMP} = \frac{V_{COMP}^2}{Z} = \frac{\left(\frac{V_{DIRETA}}{0.5}\right)^2}{Z} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{V_{DIRETA}^2}{Z}\right) \quad (18)$$

Para a partida utilizando soft-starter, a limitação da corrente também é realizada diminuindo a tensão na partida, por exemplo, se a soft-starter for programada para iniciar a partida do motor com 35% da tensão nominal, significa que a nova potência de rotor bloqueado será diminuída por esse valor ao quadrado, conforme mostra a Equação (19).

$$S_{COMP} = \frac{V_{COMP}^2}{Z} = \frac{\left(\frac{V_{DIRETA}}{0.35}\right)^2}{Z} = 0,1225 \cdot \left(\frac{V_{DIRETA}^2}{Z}\right) \quad (19)$$

A Tabela 8 resume essas informações, ou seja, mostra o quanto a potência decai em relação ao valor original para cada método de partida. Esses valores serão utilizados na aplicação do método de fluxo de potência.

Tabela 8 – Redução da potência

Partida	Tensão aplicada (pu)	Redução da potência (pu)
Direta	1	0
Estrela Triângulo	$1/\sqrt{3}$	0,33
Compensadora	0,5	0,25
Soft Starter	0,35	0,1225

Analogamente à potência, a impedância de rotor bloqueado também pode ser vista como sendo a grandeza que se altera com relação aos valores originais, considerados como os nominais de partida direta. Isto será útil na aplicação do método de curto circuito, onde não se utilizam as potências, mas sim a impedância de rotor bloqueado. A Tabela 9 resume essas informações.

Tabela 9 – Redução da impedância

Partida	Redução da potência (pu)	Aumento da Impedância (pu)
Direta	0	0
Estrela Triângulo	0,33	3
Compensadora	0,25	4
Soft Starter	0,1225	8,16

5. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

A seguir serão realizadas simulações computacionais, utilizando-se dos parâmetros reais obtidos com base no sistema industrial do britador, como forma de aplicação de ambos os métodos apresentados neste trabalho. Considerar-se-á uma situação típica que acontece, que é partida de um dos motores de 250 CV localizado na barra 8, de forma que já estavam em funcionamento as cargas e o motor de 150 CV da barra 7. Na barra 8, por sua vez, metade das cargas estão ligadas e o outro motor de 250 também está funcionando. Apenas as cargas da barra 6 e o motor desta que são considerados desligados.

Os resultados fornecidos serão das amplitudes de tensão em cada uma das barras do sistema, considerando partida direta, estrela triângulo, compensadora e soft-starter. Além disso, serão plotados gráficos referentes às tensões em cada barra em pu e os gráficos correspondentes às oscilações de tensão para facilitar a visualização dos resultados.

5.1 Método de Fluxo de Potência

A Tabela 10 reúne as informações de potências consumidas nas barras que possuem cargas/motores, para a situação proposta.

Tabela 10 – Potência total em cada barra

Barra	Motores em RP (kVA)	Potência dos Motores (kVA)	Cargas (kVA)	Potência Total (pu)
6	0	0	0	0,2222 + i0,1772
7	87,58 + i109,45 (200 CV)	0	150 + i108,59 (100%)	0,2376 + i0,2180
8	185 + i143,57 (250 CV)	344,1 + i1094,1	77,64 + i71,41 (50%)	0,6067 + i1,3091

A

Tabela 11 mostra as amplitudes das tensões de barra resultantes para diferentes métodos de partida, para a situação proposta. As potências fornecidas pela subestação, para cada tipo de chave de partida, bem como os valores de fluxos e perdas, foram omitidas, visto que o interesse são as tensões e suas amplitudes.

Tabela 11 – Amplitudes das tensões de barra (p.u. volt)

Barra	Direta	Y-Δ	Compensadora	Soft-starter
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.8835	0.9391	0.9446	0.9528
3	0.8832	0.9390	0.9444	0.9527
4	0.8709	0.9275	0.9329	0.9413
5	0.8079	0.9097	0.9196	0.9349
6	0.8709	0.9275	0.9329	0.9413
7	0.8649	0.9218	0.9274	0.9358
8	0.7615	0.8910	0.9036	0.9231
9	0.8835	0.9391	0.9446	0.9528

Os afundamentos de tensão mostrados na Tabela 11 resultam nas curvas representadas na Figura 18.

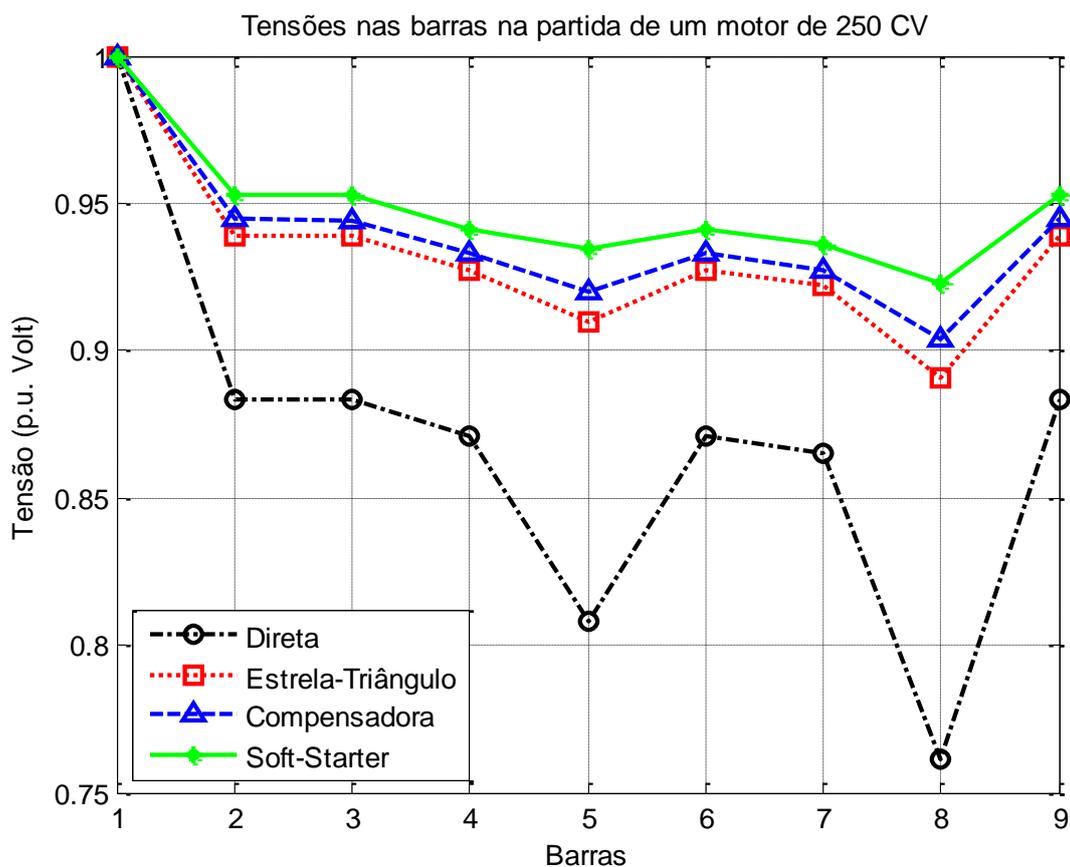


Figura 18 – Módulos de tensões durante a partida de motor.

Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, pode-se avaliar os afundamentos de tensão de uma maneira alternativa que é através dos valores das oscilações de tensão resultantes em cada barra. No caso, elas se referem ao valor de tensão que se reduz em cada ponto do alimentador, particularmente nas barras, em comparação à tensão nominal. São desejáveis pelo consumidor que essas variações sejam as mínimas possíveis, porque elas podem levar a carga, bem como os dispositivos de comando e proteção a operações indesejáveis. Também, podem contribuir para reduzir o conceito da companhia perante os consumidores vizinhos. Os valores estão dados em termos de oscilação percentual, calculados conforme a Equação (20).

$$\Delta V(\%) = \frac{V_1 - V_i}{V_i} \cdot 100 \quad (20)$$

V_1 - tensões iniciais em cada barra;

V_i - tensão durante a partida do motor;

As oscilações de tensão são mostradas na Tabela 12 e na Figura 19 o gráfico resultante. Conforme esperado, com a presença das chaves de partida, as oscilações são menores.

Tabela 12 – Oscilações de tensões de barra (%)

Barra	Direta	Y-Δ	Compensadora	Soft-starter
1	0	0	0	0
2	11.6526	6.0853	5.5443	4.7175
3	11.6768	6.0980	5.5559	4.7274
4	12.9101	7.2546	6.7056	5.8666
5	19.2083	9.0326	8.0370	6.5130
6	12.9101	7.2546	6.7056	5.8666
7	13.5097	7.8172	7.2648	6.4207
8	23.8452	10.9044	9.6363	7.6945
9	11.6526	6.0853	5.5443	4.7175

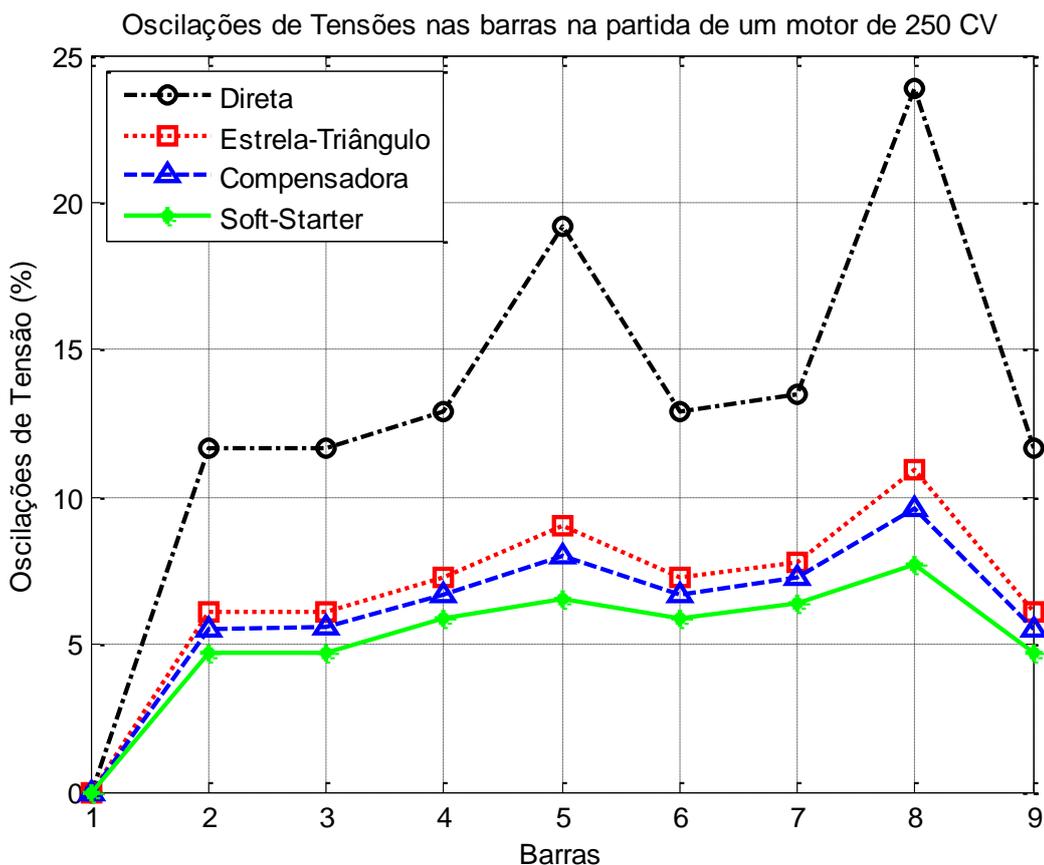


Figura 19 – Oscilações de tensão durante a partida do motor de 250 CV.

Fonte: Autoria própria.

5.2 Método de Curto-Circuito

Para a aplicação do método de curto circuito, torna-se necessário o valor de impedância de rotor bloqueado do motor que irá partir. Ainda é necessário determinar, através de um estudo de fluxo de potência, os valores de tensão iniciais em cada barra do sistema, ou seja, no instante anterior a partida do motor.

A Tabela 13 mostra as amplitudes de tensões de barra e a Figura 20 o gráfico resultante destas.

Tabela 13 – Amplitudes das tensões de barra (p.u. volt)

Barra	Direta	Y- Δ	Compensadora	Soft-starter
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.9076	0.9411	0.9457	0.9531
3	0.9074	0.9410	0.9456	0.9530
4	0.8961	0.9297	0.9343	0.9417
5	0.8203	0.9018	0.9131	0.9310
6	0.8961	0.9297	0.9343	0.9417
7	0.8906	0.9242	0.9288	0.9362
8	0.8124	0.8938	0.9051	0.9230
9	0.9076	0.9411	0.9457	0.9531

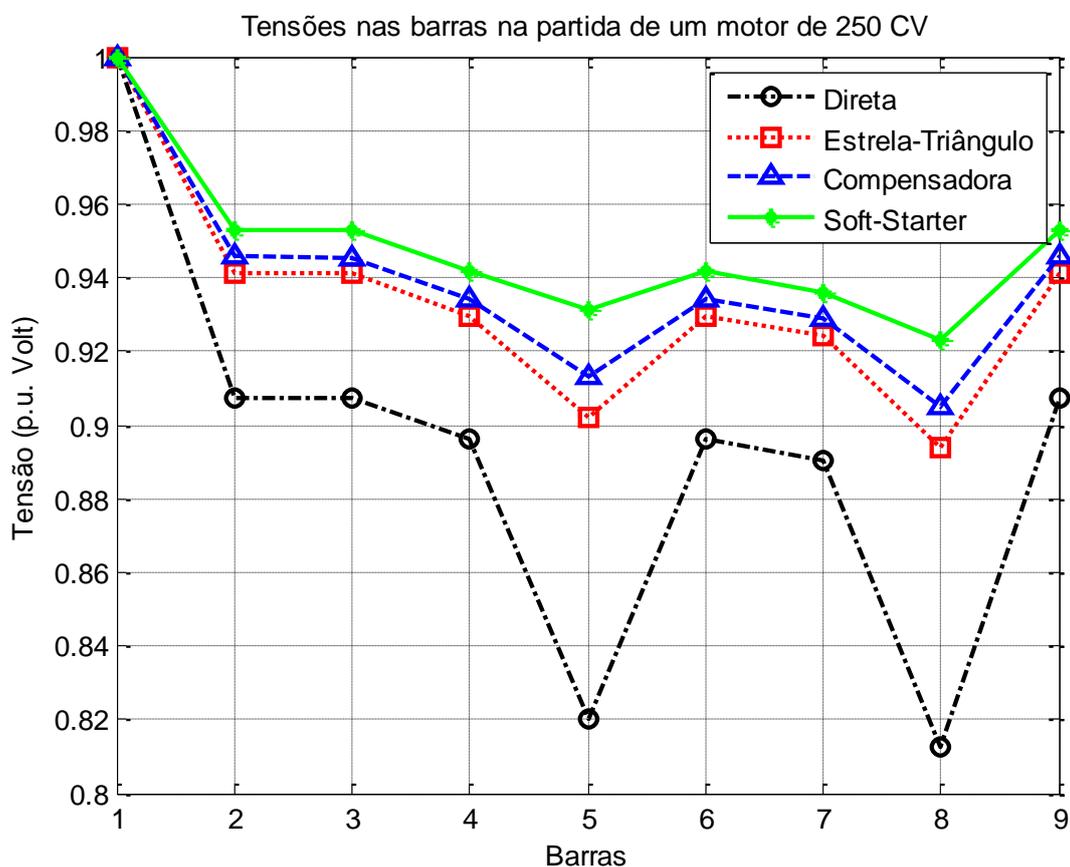


Figura 20 – Módulos de tensões durante a partida de motor.

Fonte: Autoria própria.

Ainda, mostram-se as oscilações resultantes para este caso cujos valores estão dados na Tabela 14 e representados na Figura 21.

Tabela 14 – Oscilações de tensões de barra (%)

Barra	Direta	Y-Δ	Compensadora	Soft-starter
1	0	0	0	0
2	9.2419	5.8918	5.4265	4.6923
3	9.2593	5.9034	5.4374	4.7019
4	10.3885	7.0332	6.5671	5.8317
5	17.9662	9.8215	8.6886	6.9000
6	10.3885	7.0332	6.5671	5.8317
7	10.9379	7.5827	7.1167	6.3813
8	18.7648	10.6191	9.4861	7.6973
9	9.2419	5.8918	5.4265	4.6923

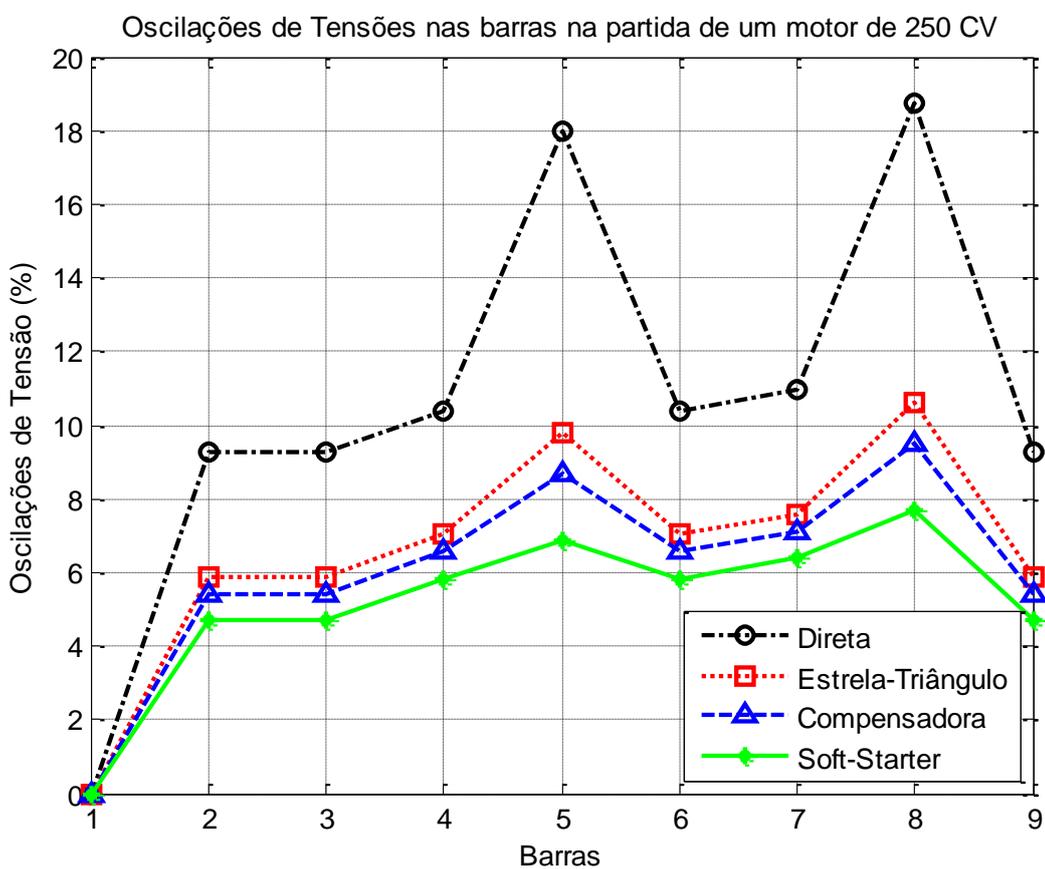


Figura 21 – Oscilações de tensão durante a partida do motor de 250 CV.

Fonte: Autoria própria.

5.2 Comparação dos resultados obtidos em cada método

Ambas as técnicas exploradas fornecem resultados bastante coerentes. Percebe-se que a pequena diferença resultante deve-se a natureza distinta de cada método. O método de fluxo de potência utiliza como parâmetro constante a potência de rotor bloqueado. Por outro lado, o método de curto circuito utiliza a impedância de rotor bloqueado constante.

A Tabela 15 mostra as diferenças percentuais, em módulo, entre cada método para os diferentes tipos de partida considerados. Nota-se que o erro é pequeno para a maioria das partidas e ainda ressalta-se a coerência dos valores de oscilação de tensão. Quando se utilizam chaves de partida como estrela-triângulo, compensadora e soft-starter as diferenças são em torno de apenas 1%.

Tabela 15 – Diferenças de tensões de barra entre os métodos (%)

Barra	Direta	Y- Δ	Compensadora	Soft-starter
1	0	0	0	0
2	2.4107	0.1935	0.1178	0.0252
3	2.4175	0.1946	0.1185	0.0255
4	2.5216	0.2214	0.1385	0.0349
5	1.2421	0.7889	0.6516	0.3870
6	2.5216	0.2214	0.1385	0.0349
7	2.5718	0.2345	0.1481	0.0394
8	5.0804	0.2853	0.1502	0.0028
9	2.4107	0.1935	0.1178	0.0252

Além disso, mostram-se na Figura 22 os gráficos sobrepostos para ambos os métodos, considerando os casos em que se utilizam das chaves de partida. Verifica-se um leve deslocamento para cima dos valores de curto circuito com relação ao método de fluxo de potência.

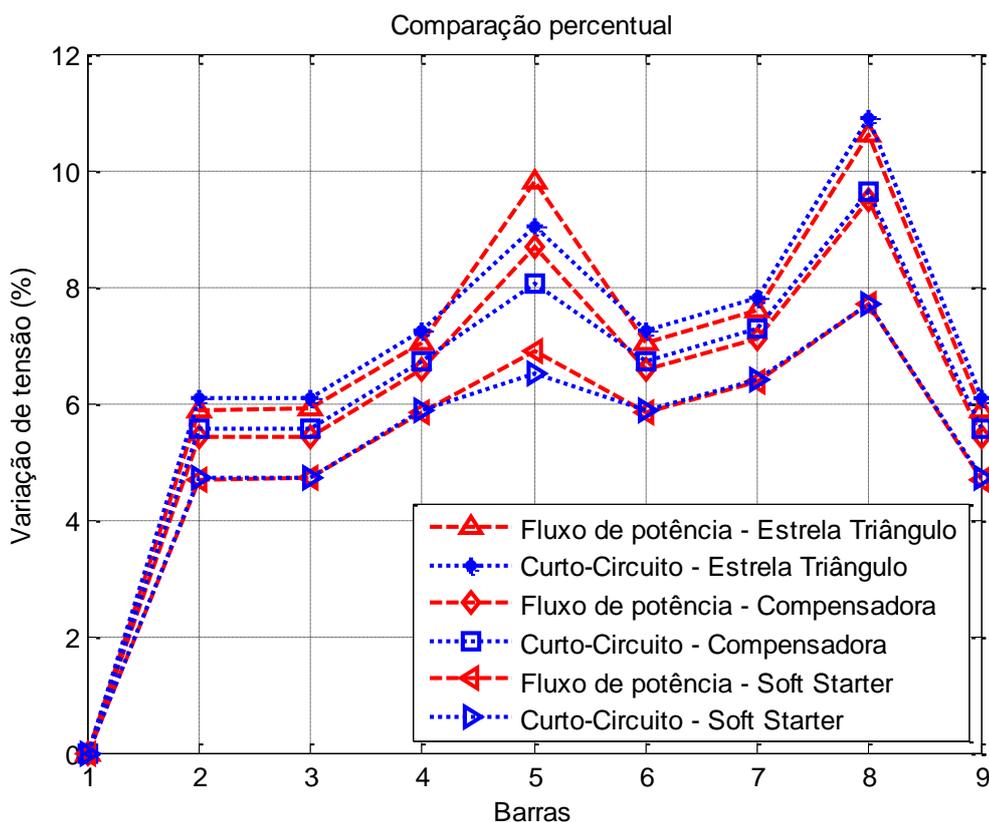


Figura 22 – Comparação das diferenças de oscilações para os métodos.

Fonte: Autoria própria.

É fato haver grande similaridade nos resultados obtidos em ambos os métodos. Os valores deslocados por uma pequena diferença entre ambos os métodos aplicados deve a natureza distinta de cada um deles. O primeiro considera a modelagem com potência constante cujos valores dos afundamentos de tensão são ligeiramente maiores que para o caso em que se considera a modelagem com impedância constante.

6. CONCLUSÕES

É fato que os afundamentos de tensão causados em uma rede industrial durante a partida de um ou mais motores pode ser a causa de diversos prejuízos ao sistema, como falhas nos dispositivos de comando e proteção e dependendo da magnitude do afundamento pode causar a retirada brusca de cargas do sistema, impactando, desta forma, na produtividade das indústrias em geral.

Este trabalho contribui, sobretudo, na demonstração de duas técnicas de naturezas distintas que culminam em valores bastante aproximados dos afundamentos de tensão em todas as barras da rede elétrica considerada. Esses métodos, por sua vez, podem ser considerados clássicos na literatura, no entanto, foram adaptados e utilizados neste trabalho com uma abordagem inovadora, até então ainda não referenciada em outros trabalhos.

Os métodos propostos permitem considerar inúmeras situações de geração e consumo dentro de um sistema industrial podendo considerar um ou mais motores partindo ao mesmo tempo e ainda, se necessário, fornece resultados para caso haja mais fontes geradoras dentro do sistema. Isto oferece inúmeras vantagens, dentre elas, habilita conferir, ainda durante o projeto do sistema industrial, se as restrições estabelecidas pela norma são violadas. Caso o sistema já esteja em funcionamento e haja problemas durante a partida dos motores, ainda assim torna-se possível determinar quais as barras que sofrem com afundamentos mais severos e com isso verificar técnica e economicamente qual a melhor alternativa para solução do problema, seja com a substituição do método de partida, troca de nível de tensão, troca de cabos, entre outras.

O método de estudo de fluxo de potência adaptado para obter as amplitudes das tensões de afundamento possui vantagens tais como; não é necessário utilizar a matriz impedância de barra, ou seja, não precisa realizar a operação da matriz admitância inversa, simplificando ainda mais os cálculos. Por outro lado, exige que se utilize de algum método de iteração, como o Gauss-Seidel, por exemplo, podendo exigir tempos de simulação distintos dependendo da tolerância utilizada e do tamanho da rede elétrica.

O método de curto circuito, por sua vez, utiliza-se da inversa da matriz admitância para a obtenção da matriz de impedâncias, o que implica em operações

matemáticas mais complexas, dependendo do tamanho da rede elétrica. Porém, considerando que geralmente utilizar-se-á de programas de computador para as simulações, este empecilho torna-se irrelevante. A grande vantagem do método de curto circuito é que não exige que se realizem iterações, ou seja, ele considera apenas uma equação algébrica contendo o valor inicial da tensão na barra, valor inicial de tensão onde parte-se o motor, e as impedâncias entre os pontos considerados. No entanto, torna-se necessário a obtenção das tensões iniciais em cada barra no instante anterior a partida do(s) motor(es), que pode ser realizado através de um estudo de fluxo de carga. Vale ressaltar, que se o sistema estiver operando sem nenhum tipo de carga, pode-se omitir este estudo de fluxo inicial, considerando tensões de 1 pu para todas as barras do sistema, simplificando os cálculos.

Os resultados encontrados para o sistema industrial fornecem resultados bastante aproximados e coerentes para ambos os métodos, considerando diferentes tipos de partida, bastando ao projetista à escolha do método que julgar mais adequado, sobretudo, considerando normas regulamentadoras. Ressalta-se, neste ponto, que os valores de afundamento de tensão quando se considera a modelagem com potência constante são ligeiramente maiores que para o caso em que se considera a modelagem com impedância constante, ou seja, como maneira de prevenção torna-se interessante utilizar-se do caso mais crítico que é obtido a partir da modelagem através do método de fluxo de potência.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro : ABNT, 2004.

AUNG, M.T and MILANOVIC, J.V. 2005. **Responses, Analytical Assessment of the Effects of Voltage Sags on Induction Motor Dynamic**. IEEE. 2005.

BEN. 2010. **Balanço Energético Nacional (BEN)**. <https://ben.epe.gov.br>. [Online] 2010. [Citado em: 03 de 11 de 2011.]

CHAPMAN, David. 2002. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia - Fundamentos de Tensão**. São Paulo : Pro Cobre, 2002.

DECKMANN, S. M., POMILIO, J. A., **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**, Publicação interna, LCEE-DSCE-FEEC-UNICAMP.

DUGAN, Roger C., et al. 2002. **Electrical Power Systems Quality**. 2. s.l. : McGraw-Hill, 2002.

ELGERD O. L. 1978. **Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica**. McGraw-hill, 1978.

FRANCHI, Claiton Moro. 2008. **Acionamentos elétricos**. São Paulo : Érica, 2008.

GOMES, J, C. and MORCOS, M,M. 2001. **A Simple Methodology for Estimating the Effect of Voltage Sags Produced by Induction Motor Starting Cycles on Sensitive Equipment**. 2001.

IEEE, **Institute of Electrical and Electronic Engineers**. 1995. IEEE Recommended Practice for. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=475495>. [Online] 06 14, 1995. [Cited: 11 03, 2011.]

KAGAN, N., OLIVEIRA, C. C. B., ROBBA, E. J., **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**, Livro, 1ª Edição, Ed. Blucher, São Paulo, 2005.

LEBORGNE, Roberto Chouhy. 2003. **Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Processos Industriais Frente a Fundamentos de Tensão**. Itajubá : Universidade Federal de Itajubá, 2003.

LLERENA, Maria Tereza Mendoza. 2006. **Estimativa do Comportamento de Máquinas Assíncronas Sujeitas a Afundamentos de Tensão**. Porto Alegre : UFRGS, 2006.

MAIA, Reinaldo Moreira. 2008. **Estudo de Caso de Afundamentos de Tensão nos Componentes do Sistema Elétrico Industrial da Moinhos Vera Cruz**. Belo Horizonte : UFMG, 2008.

MAMEDE FILHO, João. 2010. **Instalações Elétricas Industriais**. Rio de Janeiro : LTC, 2010.

MARTINS, Júlio S., COUTO, Carlos e AFONSO, João L. 2003. **Qualidade de Energia Elétrica**. 2003.

MILLER, T. J. E., **Reactive Power Control In Electric Systems**, Livro, Editora John Wiley & Sons, New York, Eua, 1982.

MORENO, J., et al. 2002. **Fuzzy logic based improvements in efficiency optimization of induction motor drives**. Fuzzy Systems, 1997., Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on. 2002.

NEVELSTEEN, J and ARAGON, H. 1989. **Starting of larges motors - Methods and economics**. PCIC-88-23. IEEE, 1989.

PADIYAR, K. R. 2004. **Power System Dynamics - Stability and Control**. New Dheli : Anshan, 2004. p. 571.

PINTO, Vladimir Gomes. 1985. **Controle de Tensão de Sistemas de Distribuição**. Rio de Janeiro: Campus Ltda, 1985. Vol. 5.

PORTOLANN, C.A., DRANKA, G. G., LAFAY, J. M. S., 2012. **Avaliação de Oscilações de Tensão Devido à Partida de Motores Usando Método de Fluxo de Potência**. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), SBA, Goiânia, Maio 2012.

PORTOLANN, C. A., CAMPAGNOLO J. M., **Um Estudo sobre a Contribuição de Alívios de Carga na Regulação de Tensão em Redes Fracas**, VIII Congresso Brasileiro Sobre Qualidade Da Energia Elétrica (Cbqee), Santos, Ago. 2007.

PORTOLANN, C. A., KOLZER, J. F., LAFAY, J-M. S., MACHADO, M., CANZI, A. L., **Influência de Pequena Central Hidrelétrica na Regulação de Tensão da Forcel**,

XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXI SNPTEE), Florianópolis, 23 a 26 de outubro de 2011.

SIMONE, Julio Aluisio. 2000. **Máquinas de Indução Trifásicas**. São Paulo : Érika, 2000.

STEVENSON, William D. 1994. **Power System Analysis**. Singapore : McGraw - Hill, 1994.

TANG, L, J, LAMORE e MEHTA, M. 2000. **Distribution System Voltage Sags: Interaction with . IEEE Press Series on Power Engineering**. 2000.

WILLIAMS, A. J., GRIFFITH, M. S., **Evaluating the Effects of Motor Starting on Industrial and Commercial Power Systems**, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-14, No. 4, July/Ago. 1978.

ZANETTA, L.C. 2005. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. São Paulo : Livraria da física, 2005.