

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCEL CHUMA CERBANTES

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE CARGAS ESPECIAIS NOS INDICADORES DE
QUALIDADE DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE
BAIXA TENSÃO

Ilha Solteira

2012

MARCEL CHUMA CERBANTES

Orientado

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE CARGAS ESPECIAIS NOS INDICADORES DE
QUALIDADE DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE
BAIXA TENSÃO**

Texto apresentado à Faculdade de Engenharia
do Campus de Ilha Solteira – UNESP como
parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica
Área de Conhecimento: Automação

JOSÉ ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Orientador

Ilha Solteira

2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

Cerbantes, Marcel Chuma.

C411a Análise da influência de cargas especiais nos indicadores de qualidade das redes de distribuição de energia elétrica de baixa tensão / Marcel Chuma Cerbantes. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2012
104 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2012

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani
Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica. 2. Sistemas elétricos de potência. 3. Sistemas de distribuição de energia elétrica. 4. Redes de baixa tensão. 5. Cargas especiais. 6. Qualidade da energia fornecida.

DEDICO

À minha esposa **Keila Cristina Araujo Cerbantes** pelo amor, compreensão e incentivo que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu pai **José Luiz Cerbantes** e minha mãe **Devanilde Chuma Cerbantes**, pela educação e por todo apoio no desenvolvimento deste trabalho.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise da Influência de Cargas Especiais nos Indicadores de Qualidade das Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Baixa Tensão

AUTOR: MARCEL CHUMA CERBANTES

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. SERGIO AZEVEDO DE OLIVEIRA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. RODRIGO APARECIDO FERNANDES PEREIRA
Departamento de Engenharia de Produção / Petrobras - Bacia de Santos

Data da realização: 24 de agosto de 2012.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Pelo dom da vida, pela fé, pelo refúgio espiritual nos momentos de dificuldade e pelas bênçãos materiais e espirituais, indispensáveis para a realização deste trabalho.

À minha esposa Keila Cristina Araujo Cerbantes.

Pelo amor, carinho, compreensão, incentivo e companheirismo, primordiais para a realização deste trabalho.

Aos meus pais José Luiz Cerbantes e Devanilde Chuma Cerbantes.

Pela educação, ajuda, apoio e carinho que serviram de alavanca para a realização deste trabalho.

Ao meu irmão Bruno Chuma Cerbantes.

Por todo o apoio, carinho e grande incentivo.

Aos meus avós Alexandre Chuma (*in memoriam*) e Olídia de Godoi Chuma.

Pelo apoio, carinho e incentivo.

Aos meus sogros Carlos Roberto de Araujo e Nágila Maria da Silva Araujo.

Por todo o carinho e incentivo na realização deste trabalho.

A todos os demais familiares e amigos.

Por todo o apoio e incentivo.

Aos meus amigos (alunos e professores) do grupo LaPSEE (Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica).

Pela amizade, incentivo e ajuda.

Ao meu orientador José Roberto Sanches Mantovani.

Pelo apoio, ajuda, paciência, amizade e orientação deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora Sérgio Azevedo de Oliveira e Rodrigo Aparecido Fernandes Pereira.

Pela disponibilidade e sugestões que agregaram valor a este trabalho.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Pelo apoio financeiro (Proc. 556421/2010-9).

Aos docentes da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Pelos ensinamentos de excelência.

“Seu tempo é limitado, então não percam tempo vivendo a vida de outro. Não sejam aprisionados pelo dogma - que é viver com os resultados do pensamento de outras pessoas. Não deixe o barulho da opinião dos outros abafar sua voz interior. E mais importante, tenha a coragem de seguir seu coração e sua intuição. Eles de alguma forma já sabem o que você realmente quer se tornar. Tudo o mais é secundário.” Steve Jobs

RESUMO

Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um algoritmo para simulação e avaliação dos impactos provocados por cargas especiais na qualidade da energia elétrica de redes de distribuição secundárias, visando aumentar a rapidez e precisão do processo de permissão da instalação de novos consumidores de característica industrial na rede. Desta forma as cargas especiais, motores de indução e máquinas de soldagem a arco, são modeladas em potência constante e, apenas, em seus principais estágios de funcionamento. Os impactos do funcionamento destas cargas são avaliados através da comparação entre o estado inicial da rede (antes da instalação da carga) com os estados obtidos para cada estágio de funcionamento da carga instalada. O estudo é realizado em uma rede secundária real utilizando como ferramenta computacional um algoritmo de cálculo de fluxo de potência radial trifásico *backward/forward*. Os resultados obtidos mostram a precisão da modelagem proposta para as cargas especiais estudadas com relação ao seu comportamento real esperado e, ainda, que a ferramenta computacional desenvolvida aumenta significativamente a rapidez na tomada de decisões no planejamento da instalação de novos consumidores na rede.

Palavras Chave- Permissão de instalação. Cargas especiais. Motores de indução trifásicos. Partida desequilibrada. Máquinas de soldagem a arco. Curto-circuito. Qualidade da energia fornecida.

ABSTRACT

This work proposes the development of an algorithm for simulation and evaluation of the impacts caused by special loads in the quality of electricity distribution networks secondary. The goal is increase the speed and accuracy of the permitting process of installing new industrial consumers in network. The special loads studied (Induction Motors and Arc Welding Machines) are modeled at constant power, and only in its main stages of operation. The impacts of the operation of these loads are evaluated by comparing the initial state of the network (before installation of the load) with the states obtained for each stage of operation of the installed load. The study is conducted in a real secondary network using an algorithm as a computational tool for calculating power flow radial-phase backward / forward. The results showed good accuracy of the proposed model for special loads studied with respect to its real expected behavior and still that the developed computational tool significantly increases the speed of decision making in planning the installation of new consumers on the network.

Keywords- Process of allow. Special loads. Three-phase induction motors. Unbalanced starting. Arc welding machines. Short-circuit. Electrical power quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Critérios e estudos de planejamento para os sistemas de distribuição	17
Figura 2 - Representação simplificada do sistema elétrico brasileiro	23
Figura 3 - Diagrama unifilar de um alimentador primário de distribuição atual	25
Figura 4 - Evolução de rede de baixa tensão	27
Figura 5 - Rede secundária reticulada	27
Figura 6 - Classificação da ANEEL para os níveis de tensão	29
Figura 7 - Flutuação de tensão	32
Figura 8 - Curva de sensibilidade do olho humano	33
Figura 9 - Limites de aceitação de oscilação de tensão	34
Figura 10 - Circuito equivalente para o motor de indução com operação balanceada	46
Figura 11 - Circuito equivalente para o motor de indução simplificado	46
Figura 12 - Correntes nas fases 1,2 e 3 de MIT no transitório elétrico de partida	48
Figura 13 - Estrutura do AG desenvolvido	52
Figura 14 - Representação da população inicial gerada	53
Figura 15 - Classificação das fontes de energia convencionais para soldagem a arco	56
Figura 16 - Curva característica estática das MSA-CC	56
Figura 17 - Curva característica estática das MSA-CV	57
Figura 18 - Ilustração do deslocamento de eixo para as curvas de fator de potência das MSA-CC/CV	60
Figura 19 - Numeração de um pequeno sistema de distribuição radial (a), (b) e (c)	64
Figura 20 - Seção de uma linha (ramo l)	65
Figura 21 - Representação dos breakpoints usando injeção de corrente nodal	69
Figura 22 - Representação de uma carga especial instalada na barra de interesse da rede secundária	72
Figura 23 - Fluxograma do algoritmo de simulação e análise proposto	75
Figura 24 - Teste de validação da modelagem proposta para a partida desequilibrada do MIT de 5 cv	79
Figura 25 - Teste de validação da modelagem proposta para a partida desequilibrada do MIT de 20 cv	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127 V)	30
Tabela 2 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220 V)	30
Tabela 3 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (254/127 V)	30
Tabela 4 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (440/220 V)	30
Tabela 5 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (208/120 V)	30
Tabela 6 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (230/115 V)	31
Tabela 7 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (240/120 V)	31
Tabela 8 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/110 V)	31
Tabela 9 - Classificação das variações de tensão de curta duração	35
Tabela 10 - Tipos de funcionalidades dos motores de indução	36
Tabela 11 - Dados dos MIT's de 5 cv e 20 cv e parâmetros de controle do AG	77
Tabela 12 - Resultados obtidos na modelagem da partida desequilibrada do MIT de 5 cv	77
Tabela 13 - Resultados obtidos na modelagem da partida desequilibrada do MIT de 20 cv	78
Tabela 14 - Comparação entre as modelagens clássica e proposta para os MIT's de 5 e 20 cv	80
Tabela 15 - Dados de placa das MSA-CC/CV de 250 A	81
Tabela 16 - Resultados obtidos na modelagem do curto-circuito das MSA-CC/CV de 250 A	81
Tabela 17 - Comparação das modelagens proposta e clássica para o curto-circuito das MSA-CC/CV de 250 A	82
Tabela 18 - Resultados da simulação da combinação 1	84
Tabela 19 - Resultados da simulação da combinação 2	85
Tabela 20 - Resultados da simulação da combinação 3	85
Tabela 21 - Resultados da simulação da combinação 4	86
Tabela 22 - Resultados da simulação da combinação 5	87
Tabela 23 - Resultados da simulação da combinação 6	88
Tabela 24 - Resultados da simulação da combinação 7	88
Tabela 25 - Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 1	89
Tabela 26 - Resultados da simulação do motor em partida direta	91
Tabela 27 - Resultados da simulação do motor com chave estrela-triângulo	92
Tabela 28 - Resultados da simulação do motor com chave compensadora	92
Tabela 29 - Resultados da simulação do motor com chave série/paralelo	93

Tabela 30 - Resultados da simulação do motor com <i>soft-starter</i> e inversor de frequência	94
Tabela 31 - Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 2	94
Tabela 32 - Topologia da rede secundária real de distribuição de 86 barras (220/127 V)	101

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Ampère
AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
CC	<i>Constant Current</i> ou Corrente Constante
CV	<i>Constant Voltage</i> ou Tensão Constante
FD	Fator de Desequilíbrio de Tensão
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
kV	Kilo Volt
kVA	Kilo Volt-Ampère
MI	Motores de Indução
MIT	Motores de Indução Trifásicos
MSA	Máquinas de Soldagem a Arco
MSA-CC	Máquinas de Soldagem a Arco com fonte de Corrente Constante (CC)
MSA-CV	Máquinas de Soldagem a Arco com fonte de Tensão Constante (CV)
MT	Média Tensão
MVA	Mega Volt-Ampère
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
SDAT	Sistema de Distribuição de Alta Tensão
SDBT	Sistema de Distribuição de Baixa Tensão
SDMT	Sistema de Distribuição de Média Tensão
SED	Subestações de Distribuição
TA	Tensão de Atendimento
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TL	Tensão de Leitura
V	Volt
VA	Volt-Ampère

VAR	Volt-Ampère Reativo
W	Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	REVISÃO DA LITERATURA	19
1.2	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	21
2	OS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	23
2.1	OS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIOS OU DE BT	25
2.1.1	REDES SECUNDÁRIAS AÉREAS	26
2.1.2	REDES RETICULADAS OU SUBTERRÂNEAS	27
2.2	ASPECTOS DE QEE ABORDADOS NESTE TRABALHO	28
2.2.1	TENSÃO EM REGIME PERMANENTE	29
2.2.2	DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	31
2.2.3	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	32
2.2.4	VARIAÇÕES DE TENSÃO A CURTA DURAÇÃO	34
2.3	ESTUDO E MODELAGEM DAS CARGAS ESPECIAIS ABORDADAS NO TRABALHO	35
2.3.1	MOTORES DE INDUÇÃO	36
2.3.1.1	MODELAGEM CLÁSSICA DA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO	37
2.3.1.2	MODELAGEM CLÁSSICA DO REGIME PERMANENTE DE MOTORES DE INDUÇÃO	40
2.3.2	MÁQUINAS DE SOLDAGEM A ARCO	41
2.3.2.1	MODELAGEM CLÁSSICA DO CURTO-CIRCUITO DE MSA	42
2.3.2.2	MODELAGEM CLÁSSICA DO PONTO DE OPERAÇÃO DE MSA	43
3	METODOLOGIAS DE MODELAGEM PROPOSTAS	44
3.1	MODELAGEM DA PARTIDA DESEQUILIBRADA DE MIT	44
3.1.1	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE MIT NO TRANSITÓRIO ELÉTRICO DE PARTIDA	49
3.1.2	CÁLCULO DAS CORRENTES SOLICITADAS PELAS FASES DO MIT NA PARTIDA DESEQUILIBRADA	54
3.1.3	EQUACIONAMENTO DO MODELO EM POTÊNCIA CONSTANTE NA PARTIDA DESEQUILIBRADA DE MIT	55
3.2	MODELAGEM DO CURTO-CIRCUITO DE MSA-CC/CV	55
3.2.1	ESTIMAÇÃO DA CORRENTE NOS TERMINAIS DAS MSA NO CURTO-CIRCUITO	58
3.2.2	ESTIMAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DAS MSA NO CURTO-CIRCUITO	59
3.2.3	EQUACIONAMENTO DO MODELO EM POTÊNCIA CONSTANTE DAS MSA NO CURTO-CIRCUITO	61
4	ALGORITMO DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS IMPACTOS DOS MIT E MSA NAS REDES SECUNDÁRIAS	63
4.1	CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA EM REDES SECUNDÁRIAS	63
4.1.1	FLUXO DE POTÊNCIA RADIAL DE VARREDURA TRIFÁSICO A QUATRO FIOS	64

4.1.1.1	REDES FRACAMENTE MALHADAS	68
4.2	<i>ALGORITMO DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE PROPOSTO</i>	70
5	TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
5.1	<i>TESTES DE VALIDAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE MODELAGEM PROPOSTAS</i>	76
5.2	<i>SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS CARGAS ESPECIAIS NA REDE</i>	82
5.2.1	ESTUDO DE CASO 1	83
5.2.1.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS	89
5.2.2	ESTUDO DE CASO 2	90
5.2.2.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS	94
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	96
	REFERÊNCIAS	98
	ANEXO I - TOPOLOGIA DA REDE SECUNDÁRIA REAL ANALISADA	101

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da energia fornecida pelas concessionárias é deteriorada, principalmente, pelo funcionamento de cargas especiais ligadas à rede elétrica. As cargas especiais solicitam correntes não lineares da rede durante o seu funcionamento e, em geral, são de potência elevada, o que ajuda a maximizar ainda mais suas influências nos distúrbios elétricos da rede. Os principais e mais comuns tipos de cargas especiais encontrados em sistemas de distribuição de média e baixa tensão são: motores de indução e máquinas de soldagem a arco. Tais cargas são utilizadas, principalmente, em instalações de característica industrial.

Os impactos provocados pelo funcionamento destas cargas na rede são observados, principalmente, na deterioração dos índices de qualidade da tensão fornecida. Tais índices englobam desde afundamentos, harmônicos, desequilíbrio e oscilações de tensão até redução dos níveis aceitáveis de fornecimento de tensão em regime permanente. A perda da qualidade destes índices pode causar o mau funcionamento e até mesmo danos aos equipamentos eletroeletrônicos, além do incômodo aos consumidores por causa da cintilação (*flicker*), que é a impressão visual de uma luminosidade oscilante de modo regular ou irregular (BAGGINI, 2008; KENNEDY, 1998).

Os sistemas de distribuição secundários ou de baixa tensão apresentam grande sensibilidade às solicitações elétricas de cargas especiais devido aos baixos níveis de tensão em que operam e, conseqüentemente, são as partes do sistema onde se encontram os piores índices de qualidade de energia elétrica.

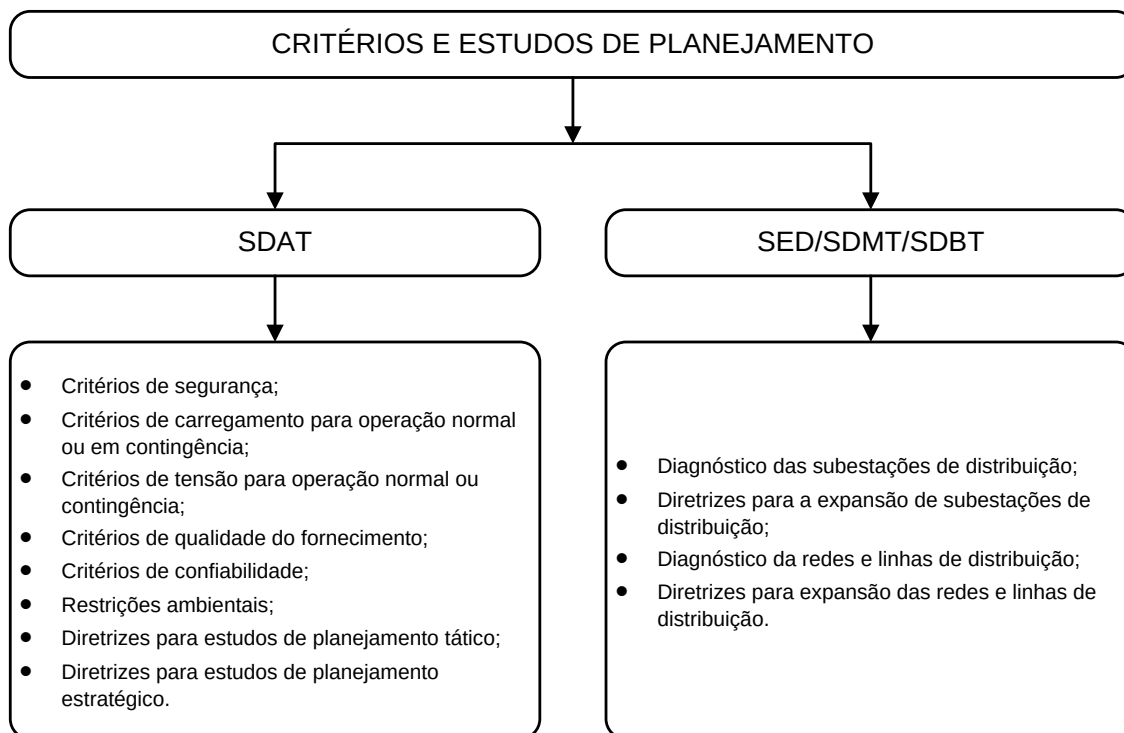
Para as concessionárias, operar fora dos limites estabelecidos pelas agências reguladoras pode provocar o pagamento de multas e até mesmo ações indenizatórias para os consumidores. Desta maneira torna-se necessária a realização de um conjunto de medidas preventivas e/ou corretivas por parte da concessionária, de forma a assegurar os limites de qualidade estabelecidos pelas agências reguladoras. Estas medidas incluem desde investimentos em infraestrutura e manutenção nos circuitos existentes, projetos de novos circuitos mais eficientes até o planejamento do processo de permissão da ligação de novos consumidores nas redes de distribuição de média e baixa tensão (COSSI, 2003; COSSI, 2008; PEREIRA JUNIOR, 2009).

No Brasil, o serviço de fornecimento de energia elétrica é regulamentado e fiscalizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Um dos objetivos da ANEEL é garantir a qualidade do fornecimento de energia de igual modo para todos os consumidores, fazendo com que as leis que protegem os consumidores e a regulamentação entre os agentes dos

setores sejam rigorosamente cumpridas. Para os sistemas de distribuição as normas operativas e de qualidade do fornecimento de energia elétrica são estabelecidas através dos módulos do PRODIST.

Na Figura 1 apresentam-se os critérios e tipos de estudos necessários para avaliar e definir as futuras configurações dos SDBT, SDMT, SDAT e de SED (ANEEL, 2011).

Figura 1 - Critérios e estudos de planejamento para os sistemas de distribuição



Fonte: (ANEEL, 2011)

O conceito de qualidade de energia elétrica está relacionado com um conjunto de alterações ou perturbações que podem ocorrer no sistema elétrico, de forma a comprometer a qualidade do produto e/ou do serviço elétrico. De forma geral, a qualidade do produto está relacionada com as alterações na forma de onda padrão da energia elétrica e a qualidade do serviço relaciona-se às interrupções ou falta de energia nos pontos de consumo. De acordo com Bernardes e Ayello (2008), as perturbações elétricas em sistemas elétricos de potência podem ser divididas nos seguintes tipos:

A. Grandes perturbações, que causam interrupção no fornecimento de energia em uma grande área

São perturbações caracterizadas pelas grandes interrupções nos sistemas de energia elétrica em geral. Neste caso existem poucas manobras operacionais que podem ser realizadas para solução parcial e/ou integral do problema. No entanto, após estas ocorrências, é necessário analisá-las e tentar obter uma solução técnica para evitar a repetição dos problemas ocorridos.

B. Pequenas perturbações, que causam interrupções em áreas localizadas

Estas perturbações são chamadas de normais ou esperadas, envolvem ocorrências simples e geralmente são eliminadas através da atuação correta do sistema de proteção e interrupção de energia numa área localizada. Os pequenos distúrbios ocorrem com maior frequência, sendo que a análise dos mesmos e investimentos na melhoria da qualidade da confiabilidade elétrica são fundamentais para evitar grandes problemas no futuro.

C. Perturbações escondidas, que não causam interrupções no fornecimento

Apresentam as seguintes características:

1. Não envolvem interrupções forçadas de energia;
2. Passam despercebidas pela operação do sistema;
3. Não envolvem atuação de relés de proteção;
4. Em médio ou longo prazo, irão afetar as atividades de manutenção;
5. Ocorrem de forma repetitiva.

As perturbações do tipo A e B são facilmente perceptíveis e estão relacionadas à qualidade do serviço, pois provocam interrupção da energia elétrica. Por outro lado, as perturbações do tipo C estão relacionadas com as alterações na qualidade do produto e podem não ser detectadas por pessoas e sistemas supervisórios convencionais, mas devem ser tratadas, pois:

- Afetam a vida útil de equipamentos elétricos;
- Podem ocasionar paradas de produção, mesmo sem ter havido uma interrupção da energia;
- Fornecem pistas valiosas para evitar uma perturbação mais grave que envolva interrupção, perda de produção ou queima de equipamentos.

Uma das alternativas mais baratas e eficientes para evitar o aumento das perturbações escondidas e, por conseguinte, da deterioração da qualidade da energia fornecida é o planejamento do processo de permissão da instalação de novos consumidores na rede. Este planejamento tem como objetivo analisar antecipadamente os distúrbios elétricos que as novas cargas especiais poderão produzir na rede e, a partir daí, verificar a viabilidade de instalação destas cargas no ponto desejado. As concessionárias são adeptas a este recurso, mas a falta de uma ferramenta computacional específica dificulta e atrasa o processo de análise e de tomada de decisões. Além disso, nem todas as cargas especiais possuem modelos bem definidos e que permitam calcular com boa precisão suas solicitações elétricas reais em seus diferentes estágios de funcionamento, como é o caso das máquinas de soldagem a arco. Outras cargas já possuem modelos de circuitos elétricos consolidados na literatura, mas não contemplam algumas particularidades de seu funcionamento, por exemplo, a solicitação desequilibrada de potência na partida de motores de indução trifásicos.

Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um algoritmo para simulação e análise dos impactos provocados por cargas especiais na qualidade da energia de sistemas secundários, visando aumentar a rapidez e a precisão do processo de permissão da instalação de novos consumidores industriais na rede. Além disso, são propostas metodologias para modelagem mais precisa e coerente de algumas cargas especiais estudadas (MIT e MSA). Estas cargas são modeladas em potência constante e, somente, em seus principais estágios de funcionamento. A modelagem em potência constante consiste na determinação aproximada da potência elétrica ativa e reativa solicitada pela carga no estágio de funcionamento estudado. São propostos novos modelos para o curto-circuito das máquinas de soldagem a arco e para a partida desequilibrada de motores de indução trifásicos. São realizados testes comparativos para avaliação da robustez dos novos modelos propostos. Os impactos destas cargas são avaliados comparando-se o estado inicial da rede com os estados obtidos de cada estágio de funcionamento da carga. O estudo é realizado em uma rede secundária real utilizando como ferramenta computacional um algoritmo de cálculo de fluxo de potência radial trifásico *backward/forward* a quatro fios, aliado a um método de renumeração de barras em camadas.

1.1 REVISÃO DA LITERATURA

De acordo Baggini (2008) e Keneddy (1998) a energia fornecida pelas concessionárias de energia elétrica deve ser mantida dentro dos padrões de qualidade aceitáveis, de modo que o funcionamento das instalações e equipamentos elétricos não seja prejudicado e,

principalmente, que os consumidores não sejam afetados ou incomodados com as perturbações da rede. Eles ainda sugerem que as cargas especiais possuem grande influência na deterioração da qualidade do produto energia elétrica.

De acordo com as normas técnicas das concessionárias Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL (2000a, 2000b) e Rede Energia (2008), a instalação de novas cargas especiais em redes secundárias exige a análise antecipada dos impactos provocados pelo funcionamento destas cargas na qualidade da energia fornecida. Este processo de análise e resposta ao consumidor interessado é denominado processo de permissão da instalação de novos consumidores na rede. É sugerido ainda que a análise possa ser feita apenas nos principais estágios de funcionamento destas cargas. No módulo 8 do PRODIST (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2012b) estão definidos os limites de qualidade de energia exigidos pela ANEEL.

Em Mamede Filho (1986, 2007), Centro Federal de Educação Tecnológica- CEFET (2005), Rede Energia (2008) e CPFL (2000b) são apresentadas as modelagens clássicas dos estágios de partida e operação nominal de MI, assim como a modelagem das técnicas de redução de partida. Estes modelos são baseados na utilização dos dados de placa destes motores. De acordo com a norma Associação Brasileira de Normas Técnica - ABNT (1980) a corrente de partida apresentada nos dados de placa de MI são obtidas através da análise de seus circuitos equivalentes em regime permanente, mostrando que a modelagem clássica de partida não contempla o desequilíbrio verificado no transitório elétrico de partida de MIT.

De acordo com Barbi (1985) e Krause (1986) o transitório elétrico de partida de MIT pode ser analisado utilizando o seu modelo em componentes simétricas instantâneas. Krause (1986) mostra que as correntes solicitadas pelas fases do motor neste transitório são significativamente desequilibradas, mas que o transitório elétrico de partida é muito rápido e de pouquíssimos ciclos da rede. O estudo deste transitório depende do conhecimento da resistência e indutância de dispersão do circuito equivalente do motor no transitório elétrico de partida. A adoção de algumas hipóteses permite relacionar as correntes do motor no transitório elétrico de partida com seus dados de placa através de um modelo de otimização, do qual os parâmetros do circuito equivalente do motor no transitório elétrico de partida são a solução do modelo.

As metaheurísticas cada vez mais tem se consolidado como ferramentas rápidas e eficientes na solução de problemas de otimização em diversas áreas do conhecimento. O AG é uma destas importantes ferramentas. Desde que foi proposto por Goldberg (1989) o AG tem evoluído e se tornado uma metaheurística de grande importância para resolução de diversos

problemas de otimização. Em Reeves (2003) o AG é abordado de uma forma bastante abrangente, abrindo um leque de aplicações e formas de sua utilização.

Em Rede Energia (2008) e CPFL (2000a) apresenta-se a modelagem clássica dos principais estágios de funcionamento das máquinas de soldagem a arco, ou seja, o curto-circuito e o ponto de operação. Elas mostram que a potência de curto-circuito é considerada o dobro de sua potência de soldagem, pois a corrente de curto-circuito é considerada o dobro da corrente de soldagem ajustada. No entanto, em Cary (1998), Modenesi (2009) e Weman (2003) mostra-se que apesar da grande variedade de tipos e técnicas de soldagem as MSA podem ser divididas nas categorias CC e CV, de acordo com sua fonte de solda. Eles mostram as grandes diferenças entre o comportamento de cada uma destas fontes no curto-circuito.

Os impactos provocados pelos principais estágios de funcionamento de MIT e MSA na rede elétrica podem ser analisados usando os resultados de algoritmos de cálculo de fluxo de potência. O algoritmo apresentado por Cheng e Shirmohammadi (1995) permite a análise em tempo real de sistemas de distribuição radiais. Este método é uma extensão direta do método de compensação para o fluxo de potência de sistemas fracamente malhados de fase única para trifásica. O método proposto é capaz de enfrentar estes desafios de modelagem, mantendo uma velocidade de execução elevada exigida para o real tempo de aplicação em sistemas de automação de distribuição. O estado de redes fracamente malhadas também pode ser determinado sem maiores problemas através da utilização da técnica dos *breakpoints* apresentada por Shirmohammadi, Hong, Semlyen e Luo (1988).

1.2 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho foi organizado em cinco capítulos. Este primeiro é introdutório e apresenta o problema estudado, a técnica e os objetivos desta dissertação, além da revisão bibliográfica. A ele somam-se os seguintes:

O Capítulo 2 apresenta os sistemas de distribuição de AT, MT e BT, os índices de qualidade da energia fornecida abordados e as particularidades e modelagem em potência constante clássica dos principais estágios de funcionamento das cargas especiais estudadas neste trabalho.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia proposta para modelagem mais precisa e coerente de alguns dos estágios de funcionamento das cargas especiais estudadas.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia e algoritmos para o cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição radiais e malhadas. Além das particularidades da ferramenta

computacional proposta para simulação e análise dos impactos do funcionamento destas cargas especiais nas redes secundárias.

O Capítulo 5 apresenta os resultados de testes e simulações realizados. O Capítulo 6 que apresenta as conclusões sobre o trabalho desenvolvido.

2 OS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

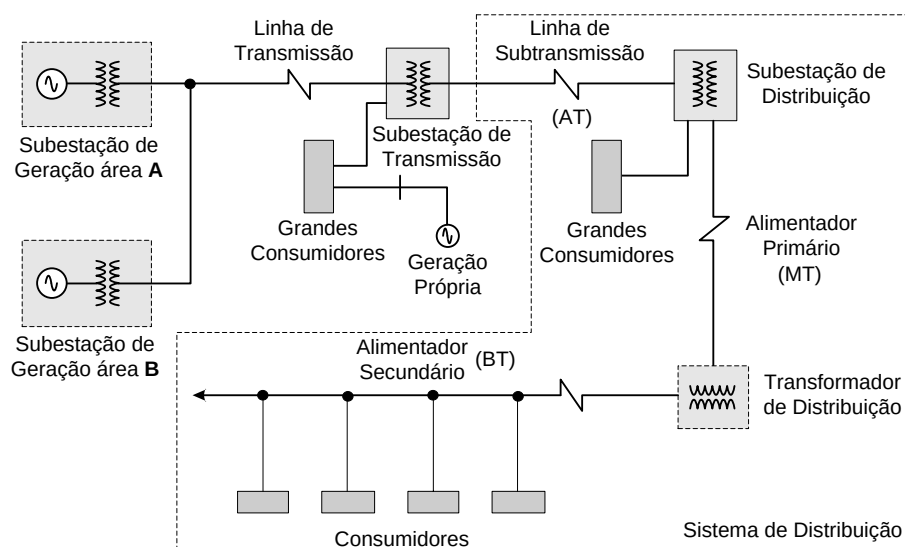
No Brasil, o sistema de energia elétrica é baseado principalmente em grandes usinas de geração que transmitem energia através de sistemas de transmissão, que é então transportada para os sistemas de distribuição. O sistema de distribuição é a parte da rede elétrica responsável pela entrega da energia elétrica aos consumidores.

De acordo com o PRODIST (ANEEL, 2012a) os sistemas elétricos de distribuição brasileiros incluem todas as redes e linhas de distribuição de energia elétrica em tensão inferior a 230 kV, seja em BT, MT ou AT. Estas faixas de tensão de distribuição estão definidas como:

- **AT:** Tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV, ou instalações em tensão igual ou superior a 230 kV quando especificamente definidas pela ANEEL;
- **MT:** Tensão entre fases cujo valor eficaz é superior a 1 kV e inferior a 69 kV;
- **BT:** Tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou inferior a 1 kV.

Com base nestas definições considera-se que o sistema de distribuição atual é composto pelas linhas de subtransmissão (AT), subestações de distribuição, alimentadores e ramais laterais primários (MT), transformadores abaixadores de MT para BT, geradores distribuídos com seus sistemas de controle, sistema de proteção e circuitos secundários (BT). Na Figura 2 ilustra-se uma simplificação do sistema elétrico brasileiro atual.

Figura 2 - Representação simplificada do sistema elétrico brasileiro



Fonte: (PABLA, 2005)

Como se pode observar através da Figura 2, os sistemas de subtransmissão ou de distribuição de alta tensão (AT) têm a função de captar a energia das subestações de transmissão e transferi-la às subestações de distribuição e aos consumidores (industriais de grande porte). Este sistema pode operar em configuração radial e, tomando-se cuidados especiais no quesito proteção, pode também operar em malha.

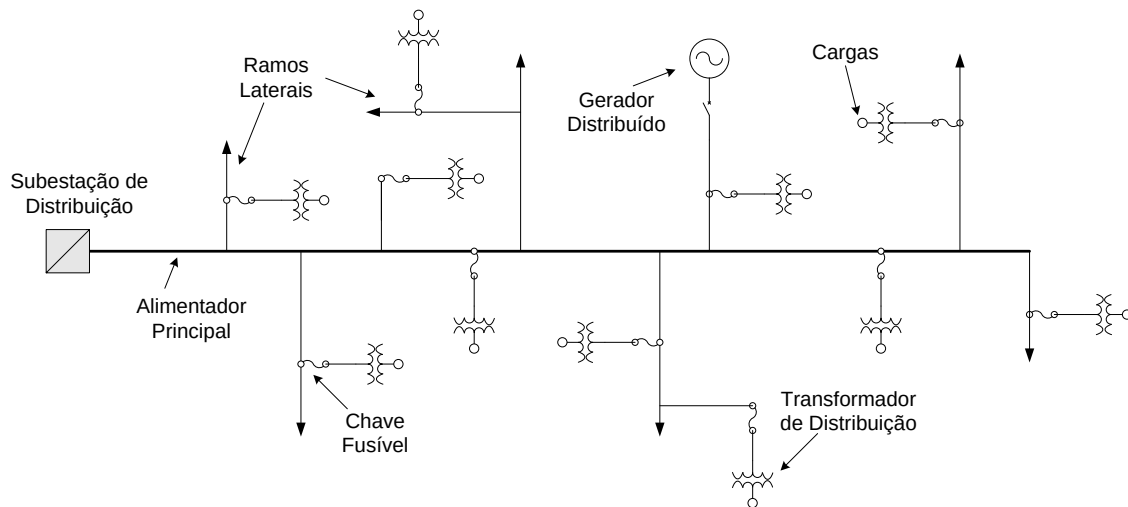
Os sistemas distribuição de média tensão (MT) emergem das subestações de distribuição e atendem os chamados consumidores primários e os transformadores de distribuição. Dentre os consumidores primários destacam-se as indústrias de porte médio, conjuntos comerciais (“*shopping centers*”), instalações de iluminação pública e etc. Tais redes podem ser aéreas ou subterrâneas, as primeiras de uso mais difundido pelo seu menor custo, e as segundas possuem grande aplicação em áreas de maior densidade de carga, como por exemplo, a zona central de uma metrópole ou onde hajam restrições paisagísticas. Também, são tipicamente caracterizadas por possuírem um arranjo topológico radial, ou seja, por não possuírem malhas ou serem fracamente malhadas (KAGAN et al., 2005).

No entanto, a crescente busca por fontes alternativas de geração de energia elétrica no Brasil e no mundo originou a chamada geração distribuída, a qual começa a por fim a esta característica topológica típica das redes de distribuição. O fato é que estas pequenas unidades de geração (geradores distribuídos) também podem ser inseridas diretamente nos sistemas de distribuição de MT e, quando possível, em qualquer ponto da topologia dos mesmos. Isto faz com que parte do alimentador de distribuição perca a radialidade, provocando alterações nos níveis de tensão e perdas no sistema, e na forma de planejar a expansão e operação da rede (PEREIRA JUNIOR, 2009).

No Brasil, este novo sistema de geração de energia elétrica está sendo impulsionado principalmente pelo aumento das unidades de cogeração do setor sucroalcooleiro. Apesar das mudanças estruturais e operacionais impostas aos sistemas de distribuição e as questões de confiabilidade de geração, a geração distribuída é uma boa alternativa às formas tradicionais de produção de energia elétrica para as diversas aplicações.

Na Figura 3 ilustra-se a topologia de um alimentador de distribuição (MT) atual, com a inserção de geradores distribuídos em sua topologia.

Figura 3 - Diagrama unifilar de um alimentador primário de distribuição atual



Fonte: (ANDERSON, 1995)

Os sistemas de distribuição secundários ou de BT são a parte mais extrema do sistema elétrico como um todo e, devido ao enfoque a eles dado no presente trabalho, estão descritos detalhadamente na seguinte subseção.

2.1 OS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO SECUNDÁRIOS OU DE BT

Os sistemas de distribuição secundários ou de baixa tensão (BT) de energia elétrica são derivados das estações transformadoras, ou seja, constituem o circuito elétrico da parte de baixa tensão dos transformadores de distribuição (vide Figura 3). Como já descrito anteriormente, estes sistemas são caracterizados por operarem em baixos níveis de tensão, ou seja, sua tensão entre fases deve ser igual ou inferior a 1 kV.

As redes secundárias constituem o chamado alimentador secundário e podem operar em malha ou de forma radial. Tais redes são responsáveis por alimentarem os consumidores de baixa tensão, consumidores residenciais, pequenos comércios e indústrias. Estas redes podem alcançar, por circuito, comprimentos da ordem de centenas de metros (SHORT, 2004; KAGAN et al., 2005).

Observa-se que a natureza de cada segmento do sistema elétrico define implicitamente o grau de confiabilidade que dele é exigido, em função do montante de potência transportada. Assim, nesta hierarquia de responsabilidade, o primeiro elemento é a subestação de transmissão, responsável pela transferência de potência da ordem de centenas de MVA, e o último é a rede de baixa tensão, na qual a potência demandada é da ordem de dezenas de

kVA. Nesse contexto a rede de distribuição secundária usualmente não conta com recursos para o atendimento de contingências.

Pelo fato de operarem em baixos níveis de tensão estes sistemas são mais sensíveis às perturbações elétricas, causadas principalmente pelo funcionamento de diversos tipos de cargas especiais (MI e MSA, por exemplo) instaladas. Devido a essa sensibilidade os sistemas de BT são a parte do sistema elétrico onde se encontram os piores índices de QEE.

A não linearidade da corrente elétrica solicitada por tais cargas especiais faz com que haja significativas e irregulares oscilações de tensão na rede, com efeitos nos níveis de iluminação sensíveis ou não ao olho humano, mas que deterioram a qualidade do produto energia elétrica. Desta forma, estudos e projetos que se atentem à adequação dos índices de QEE de sistemas de distribuição de BT dentro dos padrões exigidos pelas agências reguladoras (ANEEL) são de grande importância econômica/comercial para as empresas distribuidoras.

Devido a tais particularidades, estes sistemas serão utilizados no presente trabalho como forma de validação da modelagem proposta para as cargas especiais em questão e como forma de avaliação dos impactos na QEE sobre estes sistemas devido ao funcionamento de tais cargas.

2.1.1 REDES SECUNDÁRIAS AÉREAS

No Brasil, a grande maioria das redes secundárias de distribuição é do tipo aéreo e pode operar de forma radial ou em malha. Pode-se dizer que estas redes são as mais usuais devido ao seu baixo custo e rapidez construtiva, quando comparadas às redes subterrâneas, mas perdem no quesito confiabilidade.

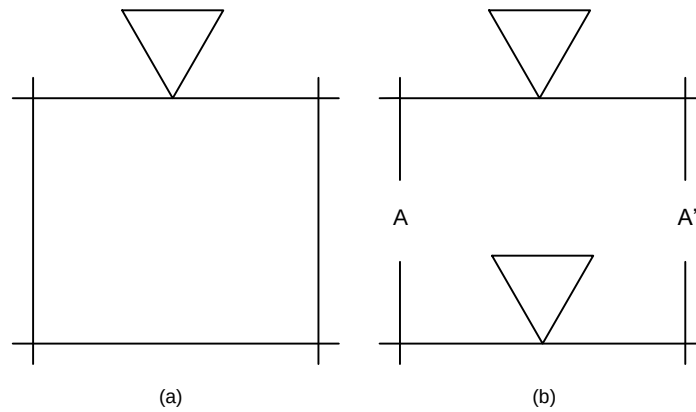
Neste tipo de rede a carga máxima instalada permissível é determinada pela potência do transformador de distribuição (MT/BT). Basicamente, existem duas medidas a serem tomadas quando a carga excede esta potência permitida:

- Substituição do transformador por um de maior potência;
- Divisão da rede original em dois ou mais circuitos e alocação de um novo transformador para cada circuito resultante da divisão;

Na Figura 4 apresenta-se a evolução da rede, que inicia em malha, Figura 4 (a), e quando alcança seu limite de carregamento, evolui para a configuração radial, através da

instalação de outro transformador de distribuição e seccionamento da malha nos pontos A e A', Figura 4 (b) (KAGAN, 2005).

Figura 4 - Evolução de rede de baixa tensão

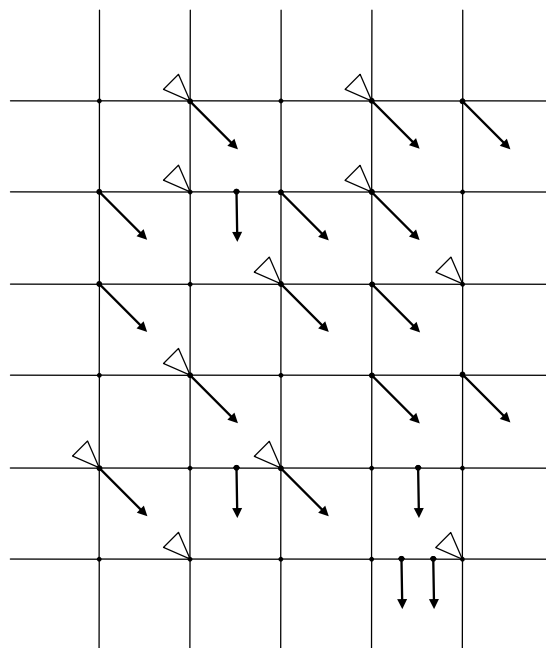


Fonte: (KAGAN, 2005)

2.1.2 REDES RETICULADAS OU SUBTERRÂNEAS

As redes subterrâneas, especialmente no Brasil, iniciaram nas décadas de 50 a 70. O sistema utilizado foi o modelo americano, chamado de “reticulado”. Tal modelo está ilustrado através da Figura 5.

Figura 5 - Rede secundária reticulada



Fonte: (KAGAN, 2005)

Este sistema era o mais robusto em termos de confiabilidade de rede na época, apresentando índices de DEC e FEC praticamente nulos (KAGAN et al., 2005). Uma rede reticulada, como o próprio nome sugere, é constituída por um conjunto de malhas que são supridas por transformadores trifásicos, com seus terminais de baixa tensão inseridos diretamente nos nós do reticulado.

Entre dois nós é usual utilizar-se, em cada fase, três cabos em paralelo. Isto é feito visando aumentar a confiabilidade e a capacidade de carregamento do sistema. Destaca-se que este tipo de rede apresenta um custo extremamente elevado e não é mais construído. Existe em áreas centrais de grandes metrópoles como São Paulo, Rio de Janeiro, Curitiba e etc., onde foi instalado há mais de trinta anos.

2.2 ASPECTOS DE QEE ABORDADOS NESTE TRABALHO

No Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2012b) estão definidos os índices responsáveis pela medição da qualidade do produto e do serviço elétrico dos sistemas de distribuição brasileiros. No entanto, a proposta deste trabalho se limita a analisar somente os índices de qualidade do produto, ou seja:

- a) Tensão em regime permanente;
- b) Fator de potência;
- c) Harmônicos;
- d) Desequilíbrio de tensão;
- e) Flutuação de tensão;
- f) Variações de tensão de curta duração;
- g) Variação de frequência.

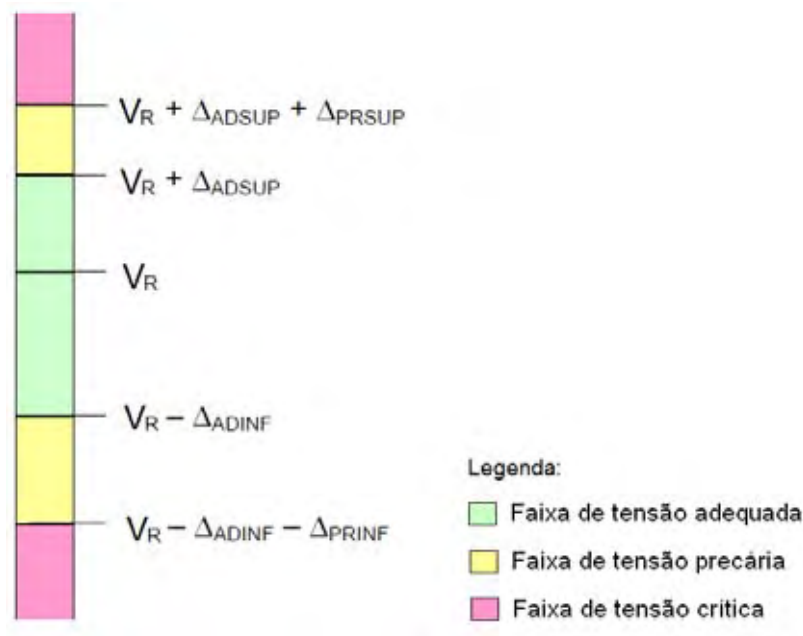
No entanto, fica evidente que a modelagem em potência constante proposta neste trabalho para as cargas não permite a análise de todos estes índices, mas somente alguns deles. Desta forma, os índices abordados no trabalho são: (a) Tensão em regime permanente, (d) Desequilíbrio de tensão, (e) Flutuação de tensão, e (f) Variações de tensão de curta duração.

Estes índices e a forma como eles foram abordados no presente trabalho seguem descritos com maiores detalhes nas subseções a seguir.

2.2.1 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Os níveis de tensão em todo sistema devem estar dentro de níveis aceitáveis determinados pelos órgãos reguladores. No Brasil, a ANEEL classifica as faixas de tensões em: faixa de tensão adequada, faixa de tensão precária e faixa de tensão crítica (ANEEL, 2012b). Na Figura 6 ilustram-se estas faixas de tensão de forma genérica, tomando como referência a tensão nominal do sistema (V_R).

Figura 6 - Classificação da ANEEL para os níveis de tensão



Fonte: (ANEEL, 2012b)

sendo:

- Δ_{ADSUP} : Variação adequada superior de tensão;
- Δ_{ADINF} : Variação adequada inferior de tensão;
- Δ_{PRSUP} : Variação precária superior de tensão;
- Δ_{PRINF} : Variação precária inferior de tensão.

Nas tabelas a seguir apresentam-se as faixas de classificação de tensão em regime permanente para os diferentes níveis de tensão de trabalho dos sistemas secundários de distribuição de energia elétrica, de acordo com o PRODIST.

Tabela 1 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/127 V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura em volt (TL)
Adequada	$(201 \leq TL \leq 231) / (116 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(189 \leq TL < 201 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) / (109 \leq TL < 116 \text{ ou } 133 < TL \leq 140)$
Crítica	$(TL < 189 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 140)$

Fonte: (ANEEL, 2012b)

Tabela 2 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220 V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura em volt (TL)
Adequada	$(348 \leq TL \leq 396) / (201 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(327 \leq TL < 348 \text{ ou } 396 < TL \leq 403) / (189 \leq TL < 201 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 327 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 189 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: (ANEEL, 2012b)

Tabela 3 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (254/127 V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura em volt (TL)
Adequada	$(232 \leq TL \leq 264) / (116 \leq TL \leq 132)$
Precária	$(220 \leq TL < 232 \text{ ou } 264 < TL \leq 269) / (109 \leq TL < 116 \text{ ou } 132 < TL \leq 140)$
Crítica	$(TL < 220 \text{ ou } TL > 269) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 140)$

Fonte: (ANEEL, 2012b)

Tabela 4 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (440/220 V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura em volt (TL)
Adequada	$(402 \leq TL \leq 458) / (201 \leq TL \leq 229)$
Precária	$(380 \leq TL < 402 \text{ ou } 458 < TL \leq 466) / (189 \leq TL < 201 \text{ ou } 229 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 380 \text{ ou } TL > 466) / (TL < 189 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: (ANEEL, 2012b)

Tabela 5 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (208/120 V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura em volt (TL)
Adequada	$(196 \leq TL \leq 229) / (113 \leq TL \leq 132)$
Precária	$(189 \leq TL < 196 \text{ ou } 229 < TL \leq 233) / (109 \leq TL < 113 \text{ ou } 132 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 189 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: (ANEEL, 2012b)

Tabela 6 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (230/115 V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura em volt (TL)
Adequada	$(216 \leq TL \leq 241)/(108 \leq TL \leq 127)$
Precária	$(212 \leq TL < 216)$ ou $(241 < TL \leq 253)/(105 \leq TL < 108$ ou $127 < TL \leq 129)$
Crítica	$(TL < 212$ ou $TL > 253)/(TL < 105$ ou $TL > 129)$

Fonte: (ANEEL, 2012b)

Tabela 7 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (240/120 V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura em volt (TL)
Adequada	$(216 \leq TL \leq 254)/(108 \leq TL \leq 127)$
Precária	$(212 \leq TL < 216$ ou $254 < TL \leq 260)/(106 \leq TL < 108$ ou $127 < TL \leq 130)$
Crítica	$(TL < 212$ ou $TL > 260)/(TL < 106$ ou $TL > 130)$

Fonte: (ANEEL, 2012b)

Tabela 8 - Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (220/110 V)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura em volt (TL)
Adequada	$(201 \leq TL \leq 229)/(101 \leq TL \leq 115)$
Precária	$(189 \leq TL < 201$ ou $229 < TL \leq 233)/(95 \leq TL < 101$ ou $115 < TL \leq 117)$
Crítica	$(TL < 189$ ou $TL > 233)/(TL < 95$ ou $TL > 117)$

Fonte: (ANEEL, 2012b)

2.2.2 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado às alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição. Na rede de distribuição podem ocorrer desequilíbrios de naturezas distintas, ou seja:

- Devido à assimetria da rede, gerada pelos tipos de transformadores de distribuição utilizados. Assim, mesmo que a carga seja perfeitamente equilibrada (desequilíbrio de corrente nulo), serão detectados níveis de desequilíbrio de tensão;
- Devido à natureza da carga, da forma como os consumidores estão conectados nas fases e neutro da rede de distribuição e com os diferentes níveis de corrente que absorvem em cada instante de tempo da curva de carga diária.

O desequilíbrio de tensão pode ser medido através do cálculo do fator de desequilíbrio pelas Equações (1) e (2), respectivamente (ANEEL, 2012b). Neste trabalho será utilizada a Equação (2).

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100 \quad (1)$$

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \text{ , onde } \beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2)$$

sendo:

V_- : Magnitude da tensão de sequência negativa (RMS);

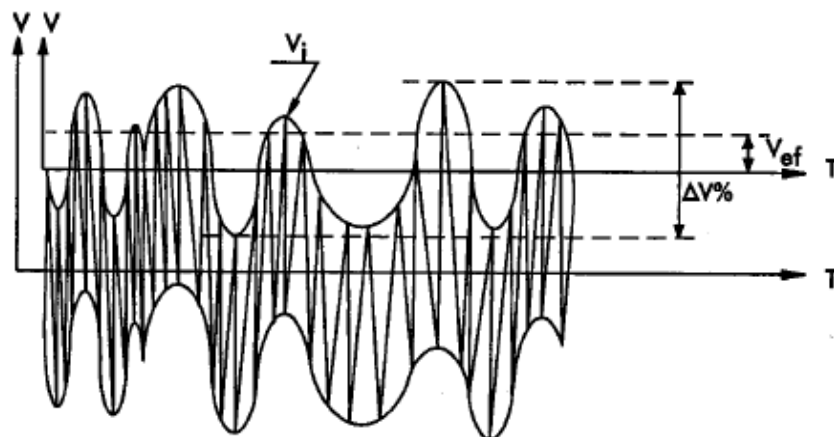
V_+ : Magnitude da tensão de sequência positiva (RMS);

V_{ab}, V_{bc} e V_{ca} : Magnitudes das tensões trifásicas de linha (RMS).

2.2.3 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

A flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão (ANEEL, 2012b). Na Figura 7 ilustra-se um exemplo de flutuação de tensão.

Figura 7 - Flutuação de tensão

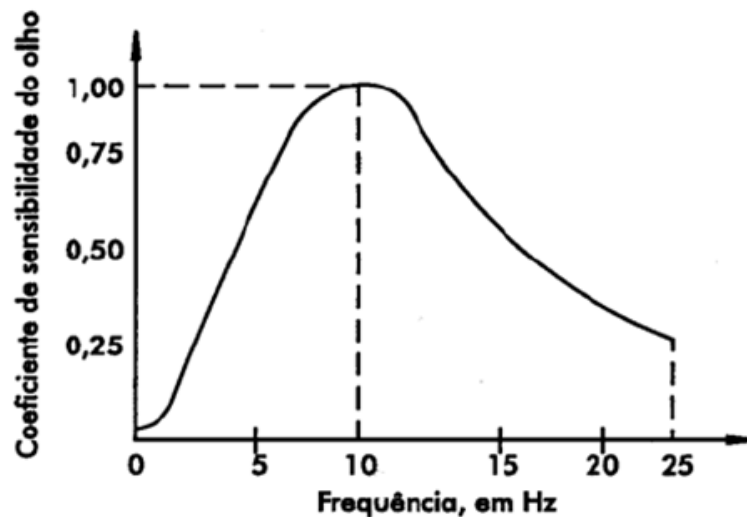


Fonte: (MEHL, 2004)

A determinação da qualidade da tensão de um barramento do sistema de distribuição quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação (ou *flicker*) luminosa no consumidor final, que tenha seus pontos de iluminação alimentados em baixa tensão.

Entre as causas do fenômeno são citadas cargas especiais com ciclo de operação variável, cuja frequência de operação produz uma modulação da magnitude da tensão da rede na faixa de 0 a 30 Hz. Nessa faixa de frequências, o olho humano é extremamente sensível às variações da emissão luminosa das lâmpadas, sendo que a máxima sensibilidade do olho é em torno de 10 Hz (MEHL, 2004). Na Figura 8 ilustra-se a curva de sensibilidade do olho humano.

Figura 8 - Curva de sensibilidade do olho humano



Fonte: (MEHL, 2004)

Neste caso em particular, apesar da modelagem proposta no trabalho ser do tipo potência constante, a flutuação de tensão será analisada supondo-se que a carga especial instalada na rede pode ser acionada várias vezes durante um determinado intervalo de tempo. Com isso, os limites de flutuação de tensão permitidos nos sistemas podem ser calculados através da Equação (3),

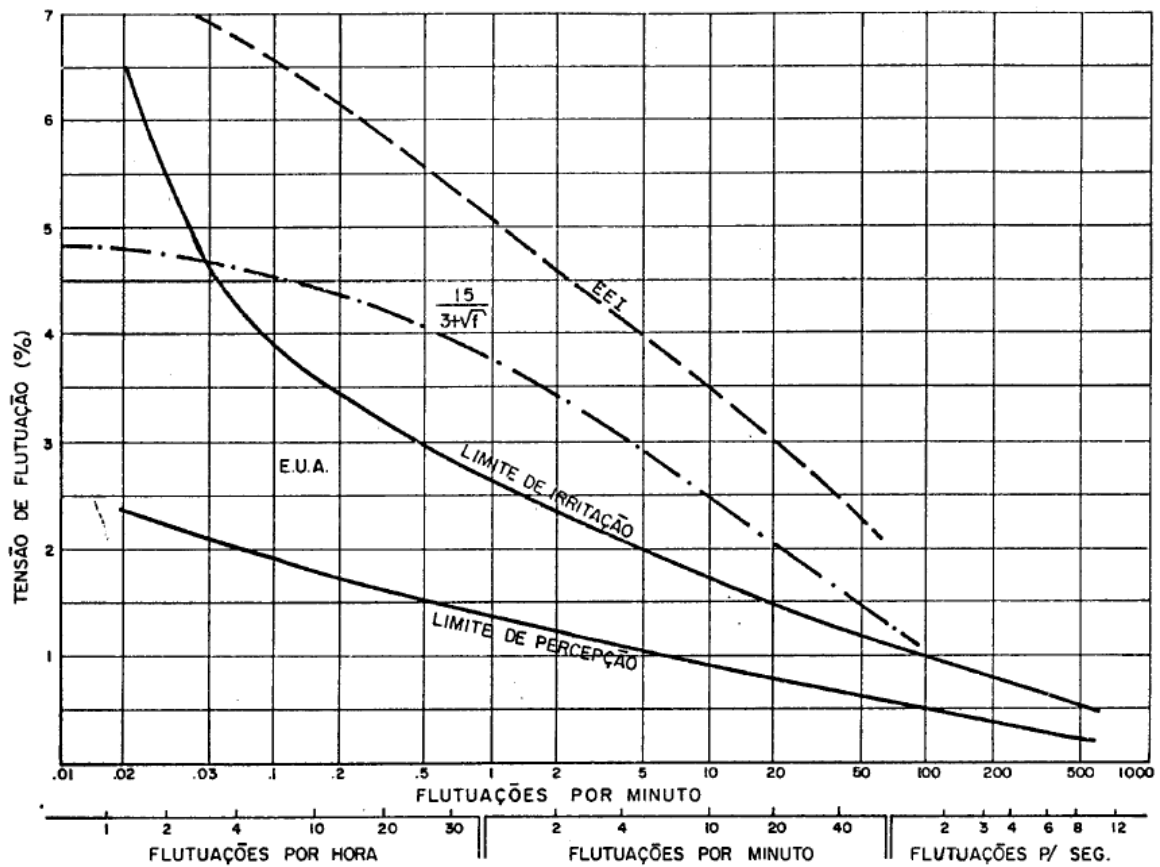
$$V_{adm} \% = \frac{15}{3 + \sqrt{f}} \quad (3)$$

que é uma aproximação da curva que representa limite superior de aceitação de oscilação de tensão na rede (ELETROBRÁS, 1985), conforme ilustrado na Figura 9.

sendo:

- V_{adm} % : Flutuação de tensão admissível em porcentagem da nominal;
 f : Número de oscilações causadas pela carga num intervalo de 1 minuto.

Figura 9 - Limites de aceitação de oscilação de tensão



Fonte: (ELETROBRÁS, 1985)

2.2.4 VARIAÇÕES DE TENSÃO A CURTA DURAÇÃO

Variações de tensão de curta duração são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo e classificadas pelo PRODIST (ANEEL, 2012b) de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 - Classificação das variações de tensão de curta duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto	Superior a 1,1 p.u

Fonte: (ANEEL, 2012b)

Em geral, o transitório de acionamento ou “start” de cargas especiais pode provocar afundamentos momentâneos de tensão na rede.

2.3 ESTUDO E MODELAGEM DAS CARGAS ESPECIAIS ABORDADAS NO TRABALHO

Umas das principais cargas especiais encontradas em redes de distribuição e que são estudadas neste trabalho são: os Motores de Indução e as Máquinas de Soldagem a Arco. Estas cargas, apesar da não linearidade, possuem estágios bem definidos e particulares de funcionamento. Na literatura encontram-se modelos em potência constante que permitem calcular e/ou estimar as solicitações elétricas destas cargas em cada um destes estágios de funcionamento. A modelagem em potência constante, apesar da simplicidade, é de extrema importância para os estudos e projetos de circuitos, particularmente quando há a necessidade

do cálculo de fluxo de potência. Nas subseções a seguir estão descritas as particularidades de cada uma das cargas estudadas, assim como a modelagem em potência constante clássica de seus principais estágios de funcionamento.

2.3.1 MOTORES DE INDUÇÃO

O motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica de utilização. Existem vários tipos de motores empregados em instalações, sendo que os mais utilizados são os motores assíncronos ou de indução. Os motores de indução são amplamente utilizados devido à sua simplicidade de construção, vida útil longa, custo reduzido de compra e manutenção e grande robustez (FITZGERALD, 1975; KOSOW, 1979).

Existem dois tipos de motores de indução que são diferenciados pelo tipo de rotor utilizado: rotor bobinado e do tipo gaiola. O motor com rotor bobinado ou rotor enrolado possui seu rotor com enrolamento polifásico construído de forma similar ao do estator, com o mesmo número de pólos. Através de escovas de carvão apoiadas sobre anéis coletores isolados montados sobre o eixo do motor, tem-se o acesso aos terminais do enrolamento do rotor (FITZGERALD, 1975; SPEGGIORIN, 1998).

O outro tipo de motor é conhecido como “gaiola de esquilo” (SPEGGIORIN, 1998), sendo este o mais comum e o mais utilizado. O rotor em gaiola consiste de barras paralelas e condutoras, curto-circuitadas em cada extremidade por anéis condutores, sendo que essas barras são fixadas no ferro do rotor (FITZGERALD, 1975). O motor com rotor de gaiola possui outras variações, além desta que é denominada de rotor de gaiola simples. As outras variações são o rotor de gaiola dupla e o rotor de gaiola de barras profundas.

Geralmente, os motores são empregados com diversos tipos de funcionalidades, como mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Tipos de funcionalidades dos motores de indução

TIPO	FUNCIONALIDADE
BOMBA	Deslocamento de fluidos
COMPRESSORES	Compressão e transporte de gases
VENTILADORES	Aumento da energia cinética de fluidos
TRANSPORTES CONTÍNUOS	Transporte e despacho de materiais
BRITADORES	Quebrar e reduzir materiais
GUINDASTES	Levantar e transladar cargas

Fonte: o próprio autor

Existem dois estágios de operação de um motor que devem ser analisados: a partida do motor e a operação em regime permanente. A seguir descreve-se a modelagem clássica (literatura) em potência constante de cada um destes estágios.

2.3.1.1 MODELAGEM CLÁSSICA DA PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO

A partida de um motor de indução corresponde ao estágio mais crítico de seu funcionamento, uma vez que a corrente de partida chega a ser várias vezes maiores que a corrente nominal (FITZGERALD, 1975; KOSOW, 1979). Por conseguinte, a potência de partida solicitada da rede também será várias vezes maiores que a potência nominal ou de regime do motor. Os motores são dimensionados de forma a suportarem os esforços eletromecânicos da partida a plena tensão ou tensão nominal, porém, em alguns casos, é necessário utilizar-se de técnicas ou métodos que diminuam os esforços das instalações elétricas para que seja possível realizar a partida dos motores sem que ocorram prejuízos aos demais consumidores da rede e a necessidade de dimensionamento elétrico exagerado das instalações (MAMEDE FILHO, 1986; MAMEDE FILHO, 2007).

Os métodos de redução das solicitações de partida de um motor de indução determinam a potência total solicitada da rede para a partida do mesmo, considerando que esta potência se divide igualmente entre as fases de alimentação do motor. O fator de potência de partida, usado para determinação das potências ativa e reativa que o motor solicita na partida, pode ser obtido através da solução do circuito equivalente clássico do motor quando o escorregamento é unitário. Nos itens a seguir apresentam-se os modelos em potência constante encontrados na literatura para a partida de motores de indução, de acordo com o método de partida empregado (MAMEDE FILHO, 1986; MAMEDE FILHO, 2007; CPFL, 2000b; REDE ENERGIA, 2008; CEFET, 2005).

a) Partida Direta:

Este método é aplicado a pequenos motores monofásicos, bifásicos e trifásicos, geralmente com potência menor que 5 cv e consiste em aplicar tensão nominal nos terminais de alimentação do motor para realização da partida.

A potência aparente que o motor exige da rede na partida direta é a própria potência de partida do motor, conforme mostra a Equação (4).

$$\begin{cases} S_p = V_N I_p & (\text{motor monofásico ou bifásico}) \\ S_p = \sqrt{3} V_N I_p & (\text{motor trifásico}) \end{cases} \quad (4)$$

sendo:

S_p : potência aparente total de partida do motor em partida direta (VA);

V_N : tensão entre as fases de alimentação do motor informada na placa (V);

I_p : corrente de partida do motor informada na placa (A).

b) Chave Estrela/Triângulo:

Este tipo de acionamento é utilizado em motores trifásicos de porte maior que 5 cv para suavizar os efeitos da corrente de partida sobre as instalações. Este método consiste na partida do motor com seus enrolamentos conectados em estrela e após atingir uma velocidade próxima a nominal, as bobinas do motor são chaveadas para operar na configuração triângulo. Neste caso, a nova corrente de partida é 3 vezes menor que a original.

Desta forma, a potência aparente que o motor exige da rede na partida com a chave estrela/triângulo é:

$$S_{pY/\Delta} = \sqrt{3} V_N \frac{I_p}{3} \quad (5)$$

sendo:

$S_{pY/\Delta}$: potência aparente total de partida do motor com chave estrela-triângulo (VA).

c) Chave Compensadora:

A chave compensadora é composta basicamente por um autotransformador com várias derivações destinado a regular a tensão de partida. Esta técnica é utilizada para acionamento de motores trifásicos de grande porte através da regulação de tensão por *taps*. Neste método aplica-se tensão reduzida na partida e, através da variação de *taps*, aplica-se tensão nominal no motor em regime. Normalmente os autotransformadores podem regular a tensão em

$k = \{50\%, 65\%, 80\%\}$. A constante k é a razão entre a tensão regulada e a tensão nominal do motor, ou seja, $k = V_R / V_N$.

Desta forma, a potência aparente que o motor exige da rede na partida com a chave compensadora é:

$$S_{P \text{ compensadora}} = \sqrt{3} V_N k^2 I_P \quad (6)$$

sendo:

$S_{P \text{ compensadora}}$: potência aparente total de partida do motor com chave compensadora (VA).

d) Chave Série/Paralelo:

A chave série/paralelo é utilizada para acionamento de motores trifásicos de 12 pontas. Este método consiste na partida do motor com as bobinas de cada fase em série, reduzindo a tensão nas bobinas pela metade da nominal. Em seguida, quando o motor atingir velocidade nominal, muda-se a posição da chave para configurar as bobinas em paralelo, ou seja, à tensão nominal. Este procedimento reduz a corrente de partida a 25% de seu valor original.

Desta forma, a potência aparente que o motor exige da rede na partida com a chave série/paralelo é:

$$S_{P \text{ série/ paralelo}} = \sqrt{3} V_N \frac{I_P}{4} \quad (7)$$

sendo:

$S_{P \text{ série/ paralelo}}$: potência aparente total de partida do motor com chave série/paralelo (VA).

e) Soft-Starter e Inversor de Frequência

Os *soft-starters* e inversores de frequência são dispositivos eletrônicos que podem ser utilizados para redução das solicitações de partida de motores de indução monofásicos, bifásicos e trifásicos. Estes dispositivos regulam a tensão aplicada aos terminais de alimentação do motor, assim como as chaves compensadoras, mas possuem um ajuste mais fino e inteligente do controle de tensão. A tensão inicial ou regulada de partida pode ser

ajustada e verificada no próprio dispositivo, assim como os demais parâmetros de controle de partida e de funcionamento do motor.

A potência aparente que o motor exige da rede na partida usando *soft-starter* ou inversor de frequência pode ser calculada usando a relação $k = V_R / V_N$, assim como na chave compensadora, ou seja:

$$\begin{aligned} S_{P \text{ soft-stater/inversor}} &= V_N k^2 I_P \quad (\text{motor monofásico ou bifásico}) \\ S_{P \text{ soft-stater/inversor}} &= \sqrt{3} V_N k^2 I_P \quad (\text{motor trifásico}) \end{aligned} \quad (8)$$

sendo:

$S_{P \text{ soft-stater/inversor}}$: potência aparente total de partida do motor com *soft-stater* e/ou inversor de frequência (VA).

2.3.1.2 MODELAGEM CLÁSSICA DO REGIME PERMANENTE DE MOTORES DE INDUÇÃO

O regime permanente é definido como sendo uma condição em que as grandezas envolvidas não oscilem em relação à variável independente, geralmente o tempo. No caso de motores, o regime é atingido quando o motor passa a operar com sua rotação nominal e, a partir deste ponto, os efeitos do transitório de partida não são mais sentidos pelo sistema e o motor opera com valores de tensão e corrente nominais (FITZGERALD, 1975; KOSOW, 1979). A potência aparente que o motor de indução exige da rede quando em regime permanente é dada pela seguinte equação:

$$\begin{cases} S_N = V_N I_N & (\text{motor monofásico ou bifásico}) \\ S_N = \sqrt{3} V_N I_N & (\text{motor trifásico}) \end{cases} \quad (9)$$

sendo:

S_N : potência aparente total do motor em regime permanente ou nominal do motor (VA).

I_N : corrente nominal do motor informada na placa (A).

Neste caso, também se considera que a potência total solicitada pelo motor da rede é dividida igualmente entre as fases do mesmo. O fator de potência para determinação das potências ativa e reativa do motor neste estágio de funcionamento geralmente é fornecida pelos seus dados de placa.

2.3.2 MÁQUINAS DE SOLDAGEM A ARCO

São aparelhos usados para produzir altas temperaturas em pontos concentrados através da circulação de energia elétrica entre seus terminais por um arco (elétrico) de solda. Tais máquinas são utilizadas para fundir e unir materiais metálicos e são equipamentos presentes em oficinas, linhas de montagem e parques industriais em geral.

Um arco elétrico é uma descarga luminosa contínua de eletricidade através de uma lacuna em um circuito devido à incandescência dos vapores de condução. Um arco de solda é uma descarga elétrica controlada, contínua e estável entre o eletrodo e a peça de trabalho. Ele é formado e sustentado através do estabelecimento de um meio condutor gasoso chamado de *arco plasma*. Isto é feito por meio de uma fonte de potência de solda (WEMAN, 2003; MODENESI, 2009).

Existem dois tipos básicos de arcos de soldagem: o *arco de eletrodo não consumível*, que inclui soldagem a arco de plasma, com gás tungstênio e eletrodo de carbono, e o *arco de eletrodo consumível*, que inclui soldagem a arco com eletrodo revestido, gás com eletrodo metálico, submerso e eletrogás. Estes dois tipos de arco são totalmente diferentes. O eletrodo não consumível não derrete com o arco e o metal não é carregado através da lacuna. Já o eletrodo consumível funde com o arco e o metal derretido é carregado através da lacuna até a peça de trabalho (WEMAN, 2003; CARY, 1998).

A soldagem a arco exige um equipamento (fonte de energia, fonte de solda ou máquina de soldagem) especialmente projetado para esta aplicação e capaz de fornecer tensões e correntes cujos valores se situam, em geral, entre 10 e 40 V e entre 10 e 1200 A, respectivamente. Podem-se separar as fontes de energia em duas classes básicas: (a) máquinas convencionais, das décadas de 50 e 60 (ou antes), e (b) máquinas "eletrônicas", ou modernas, de desenvolvimento mais recente (MODENESI, 2009).

O funcionamento de uma fonte de energia depende fundamentalmente de suas características estáticas e dinâmicas. Ambas afetam a aplicabilidade da fonte para um dado processo de soldagem e a sua estabilidade, mas de uma forma diferente. As características estáticas se relacionam aos valores médios de corrente e tensão de saída da fonte

determinados, em geral, pela aplicação de uma carga resistiva. Para a fonte regulada em uma dada condição, as suas características estáticas podem ser representadas na forma de uma *curva característica estática*, obtida através de testes com diferentes cargas resistivas. Alterando-se a regulação da fonte uma nova curva característica pode ser obtida. Com base na forma de suas curvas características, uma fonte convencional pode ser classificada como CC (Corrente Constante) ou CV (Tensão Constante) (WEMAN, 2003).

Existem dois estágios de operação de uma máquina de soldagem a arco que devem ser analisados: o curto-circuito e o ponto de operação. A seguir descreve-se a modelagem clássica (literatura) em potência constante de cada um destes estágios de operação (CPFL, 2000a; REDE ENERGIA, 2008; WEMAN, 2003).

2.3.2.1 MODELAGEM CLÁSSICA DO CURTO-CIRCUITO DE MSA

O curto-circuito entre o eletrodo e a peça de metal soldada é o estágio mais crítico do funcionamento destas máquinas, pois a potência solicitada da rede neste instante pode ser várias vezes maior que a de soldagem (ponto de operação) da máquina. No curto-circuito a tensão dos terminais de soldagem da máquina é nula. Os fabricantes não fornecem nenhuma informação sobre o curto-circuito e na literatura não se dispõe de modelos e nem metodologias bem definidos que permitam estimar com boa precisão as solicitações das MSA funcionando neste estágio. Geralmente, em cálculos práticos, adota-se que a corrente de curto-circuito de uma MSA qualquer é duas vezes maior que a de soldagem no ponto de operação (CPFL, 2000a; REDE ENERGIA, 2008). Isto se reflete na corrente solicitada da rede. Apesar de não possuir fundamentação teórica alguma e não levar em conta as particularidades de cada tipo de fonte de solda, as considerações adotadas nestes cálculos práticos podem ser usadas para calcular a potência aparente que a máquina exige da rede no curto-circuito.

Assim sendo, a potência aparente de curto-circuito de uma máquina de soldagem a arco é dada pela seguinte equação:

$$\begin{cases} S_{CC} = 2V_N I_{LA} & (\text{máquina monofásica ou bifásica}) \\ S_{CC} = 2\sqrt{3}V_N I_{LA} & (\text{máquina trifásica}) \end{cases} \quad (10)$$

sendo:

S_{CC} : potência aparente de curto-circuito de uma máquina de soldagem a arco (VA);
 V_N : tensão entre as fases de alimentação da máquina informada na placa (V);
 I_A : corrente de soldagem ajustada ou do ponto de operação (A);
 I_{LA} : corrente (A) solicitada da rede por cada fase de alimentação da máquina operando com a corrente de soldagem ajustada, I_A .

O fator de potência para determinação das potências ativa e reativa que a máquina solicita neste estágio não são conhecidos e/ou fornecidos pelos fabricantes. Sabe-se apenas que ele possui um valor baixo e, na maioria das vezes, adota-se que o mesmo possui valor 0,7 (CPFL, 2000a; REDE ENERGIA, 2008).

2.3.2.2 MODELAGEM CLÁSSICA DO PONTO DE OPERAÇÃO DE MSA

O ponto de operação é o estágio de funcionamento em que a máquina opera com a corrente de soldagem ajustada, ou seja, em condições normais de solicitação de potência e de soldagem. Neste estágio o arco de solda encontra-se aberto.

Desta forma, a modelagem em potência constante clássica das MSA no ponto de operação é dada por:

$$\begin{cases} S_{PO} = V_N I_{LA} & (\text{máquina monofásica ou bifásica}) \\ S_{PO} = \sqrt{3} V_N I_{LA} & (\text{máquina trifásica}) \end{cases} \quad (11)$$

sendo:

S_{PO} : potência aparente total das MSA no ponto de operação (VA).

O fator de potência no ponto de operação, usado para calcular as potências ativa e reativa destas máquinas no ponto de operação, geralmente é fornecido em seus dados de placa.

3 METODOLOGIAS DE MODELAGEM PROPOSTAS

A modelagem clássica das cargas especiais estudadas, apesar da grande utilidade e/ou aceitação, não contemplam certas particularidades do comportamento real de algumas destas cargas. Mais especificamente, a modelagem clássica não contempla o desbalanceamento real de partida observado entre as fases de Motores de Indução Trifásicos e as solicitações reais que cada fonte de energia das Máquinas de Soldagem a Arco exige no curto-circuito. Neste capítulo apresentam-se a metodologia proposta para as modelagens em potência constante da partida desequilibrada de MIT e do curto-circuito de MSA-CC/CV.

3.1 MODELAGEM DA PARTIDA DESEQUILIBRADA DE MIT

As solicitações elétricas de partida ocorrem enquanto o motor ainda se encontra em repouso, no chamado transitório elétrico de partida. Em motores trifásicos este transitório é caracterizado pelo desbalanceamento entre as correntes e as potências solicitadas em cada uma de suas fases, o que obviamente não é verificado nos motores monofásicos e/ou bifásicos. A modelagem clássica da partida de MIT não contempla tal desequilíbrio, pois a corrente de partida é considerada a mesma para todas as fases do motor (ABNT, 1980).

Por este motivo, o estudo da partida de MIT é de grande utilidade para os diversos interesses técnicos de planejamento e projeto de circuitos elétricos. Sob o aspecto prático, entretanto, há certo grau de dificuldade em avaliar as correntes exigidas durante o transitório elétrico de partida, pois a maioria dos fabricantes de motores, quando não solicitado, fornece apenas os dados que constam na placa de identificação destes equipamentos. Estes dados de partida (corrente e o fator de potência ou deslocamento entre a componente fundamental de tensão e de corrente) são calculados usando o circuito equivalente clássico por fase do motor. Os parâmetros do circuito equivalente clássico são obtidos através de ensaios de curto-circuito e em vazio, com o motor magnetizado. No transitório elétrico de partida ainda não ocorre magnetizado do motor, fazendo com que os parâmetros do circuito equivalente clássico sejam diferentes do transitório, dificultando ainda mais sua análise.

O transitório elétrico de partida de MIT pode ser representado pelo seu modelo em componentes simétricas, considerando que o rotor esteja em repouso e que a constante de tempo mecânica seja muito maior que as constantes de tempo elétricas. Assim, o transitório das correntes se extingue antes que o motor comece a girar. Nesta modelagem o MIT (em

repouso) é subitamente alimentado por tensões cossenoidais balanceadas (BARBI, 1985; KRAUSE, 1986). Seja o modelo por fase do MIT em componentes simétricas instantâneas:

$$\begin{pmatrix} v_{s_+} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_S + L_S(p + j\dot{\psi}) & m_{SR}(p + j\dot{\psi}) \\ m_{SR}(p + j\dot{\psi} - j\dot{\theta}) & R_R + L_R(p + j\dot{\psi} - j\dot{\theta}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{s_+} \\ i_{r_+} \end{pmatrix} \quad (12)$$

sendo:

v_{s_+} : tensão de sequência positiva por fase de alimentação do motor (V);

R_S : resistência do estator (Ω);

R_R : resistência do rotor referida ao estator (Ω);

L_S : indutância cíclica do estator (H);

L_R : indutância cíclica do rotor referida ao estator (H);

p : coeficiente de variação no tempo d/dt ;

m_{SR} : indutância mútua cíclica (H);

$\dot{\psi}$: velocidade dos eixos dq (rad/s);

$\dot{\theta}$: velocidade do rotor (rad/s);

i_{s_+} : corrente de sequência positiva por fase do estator (A);

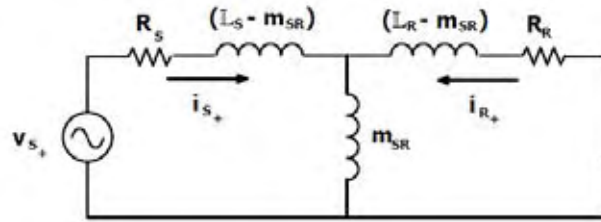
i_{r_+} : corrente de sequência positiva por fase do rotor e referida ao estator (A).

Como o motor encontra-se em repouso $\dot{\theta} = 0$. Adotando-se o estator como referência tem-se que $\dot{\psi} = 0$. Assim:

$$\begin{pmatrix} v_{s_+} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_S + pL_S & pm_{SR} \\ pm_{SR} & R_R + pL_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{s_+} \\ i_{r_+} \end{pmatrix} \quad (13)$$

O modelo de circuito elétrico da Figura 10 representa o modelo matemático dado pela Equação (13) com todos os parâmetros do motor referidos ao primário.

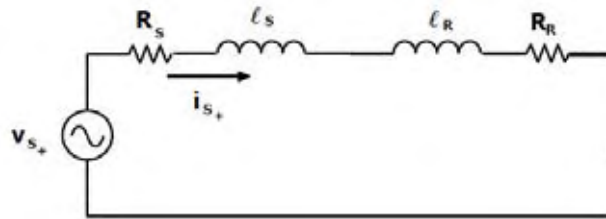
Figura 10 - Circuito equivalente para o motor de indução com operação balanceada



Fonte: (BARBI, 1985)

Simplificando o circuito, tem-se que $l_s = L_s - m_{SR}$ (indutância de dispersão primária) e $l_r = L_r - m_{SR}$ (indutância de dispersão secundária). Como l_s e l_r são muito menores que m_{SR} , a presença desta última indutância pode ser desprezada. Assim o circuito adquire a configuração representada na Figura 11.

Figura 11 - Circuito equivalente para o motor de indução simplificado



Fonte: (BARBI, 1985)

O modelo então passa a ser:

$$v_{s+} = (R_S + R_R)i_{s+} + p(l_s + l_r)i_{s+} \quad (14)$$

sendo:

$$R = R_S + R_R \quad \text{e} \quad l = l_s + l_r \quad (15)$$

Desta forma, obtém-se:

$$i_{s+}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} v_s \frac{1}{(R + j\omega l)} \left(e^{j\omega t} - e^{-\frac{R}{l}t} \right) \quad (16)$$

sendo:

$$R + j\omega l = \sqrt{R^2 + \omega^2 l^2} e^{j\phi_p} \Rightarrow \phi_p = \tan^{-1}\left(\frac{\omega l}{R}\right) \quad (17)$$

sendo:

ϕ_p : ângulo de deslocamento entre a corrente e tensão de fase na partida (rad), cujo cosseno do mesmo indica o fator de potência de partida;

ω : frequência angular da rede (rad/s).

Sabe-se que:

$$i_{s_d}(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} |i_{s_+}(t)| \quad \text{e} \quad |i_{s_d}| = \left| \sqrt{\frac{3}{2}} i_{s_1} \right| \quad (18)$$

Sendo que $\operatorname{Re} |i_{s_+}(t)|$ significa adotar a parte real da equação $i_{s_d}(t)$ (componente de eixo direto da corrente por fase do estator). Então:

$$i_{s_1}(t) = \frac{\sqrt{2}v_s}{\sqrt{R^2 + \omega^2 l^2}} \left(\cos(\omega t - \phi_p) - e^{-\frac{R}{l}t} \cos(-\phi_p) \right) \quad (19)$$

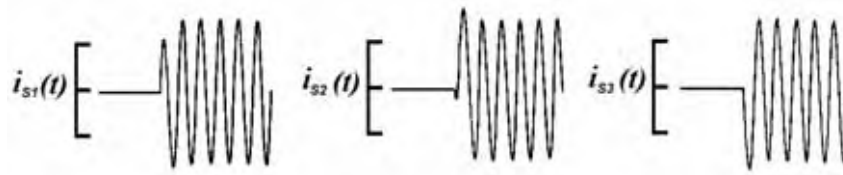
Analogamente, obtêm-se as expressões das correntes transitórias nas fases 2 e 3 do motor (KRAUSE, 1986).

$$i_{s_2}(t) = \frac{\sqrt{2}v_s}{\sqrt{R^2 + \omega^2 l^2}} \left(\cos\left(\omega t - \phi_p - \frac{2\pi}{3}\right) - e^{-\frac{R}{l}t} \cos\left(-\phi_p - \frac{2\pi}{3}\right) \right) \quad (20)$$

$$i_{s_3}(t) = \frac{\sqrt{2}v_s}{\sqrt{R^2 + \omega^2 l^2}} \left(\cos\left(\omega t - \phi_p + \frac{2\pi}{3}\right) - e^{-\frac{R}{l}t} \cos\left(-\phi_p + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \quad (21)$$

Estas correntes possuem uma componente cosenoidal e uma exponencial, e são caracterizadas pelo desequilíbrio entre si nos primeiros ciclos do transitório elétrico de partida. O comportamento de cada uma destas correntes está ilustrado através da Figura 12.

Figura 12 - Correntes nas fases 1,2 e 3 de MIT no transitório elétrico de partida



Fonte: (KRAUSE, 1986)

Após o transitório, as correntes são limitadas somente pelos parâmetros referentes às resistências do estator, do rotor e reatâncias de dispersão do motor (BARBI, 1985). É importante frisar que estes parâmetros são diferentes dos parâmetros do circuito equivalente do motor em regime permanente, pois neste transitório o MIT sofre grande influência do efeito pelicular (BARBI, 1985; FITZGERALD, 2006; SILVA, 2007).

As Equações (19), (20) e (21) representam o transitório elétrico de partida e, em seu próprio equacionamento, denotam claramente o desequilíbrio real existente entre as fases de alimentação do motor na partida. Neste trabalho, a metodologia proposta para modelagem em potência constante da partida desequilibrada de MIT é dividida em três etapas: determinação dos parâmetros do circuito equivalente do motor no transitório elétrico de partida, cálculo das correntes solicitadas em cada fase do motor na partida desequilibrada e equacionamento do modelo em potência constante da partida desequilibrada dos MIT. No entanto, para isto, são adotadas as seguintes hipóteses:

- O período transitório elétrico de partida T_t é considerado como sendo o tempo equivalente aos três primeiros ciclos da rede elétrica, ou seja, $T_t = 3/60 = 0,05$ segundos (tempo suficiente para as parcelas exponenciais das correntes transitórias do MIT serem extintas);
- A corrente de partida fornecida na placa do motor, I_p (A), é adotada como sendo a média aritmética dos valores *rms* das correntes nas três fases do motor durante o período do transitório elétrico de partida.

Nas subseções a seguir, descrevem-se todas as etapas da modelagem proposta.

3.1.1 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE MIT NO TRANSITÓRIO ELÉTRICO DE PARTIDA

A determinação dos parâmetros do circuito equivalente por fase do MIT no transitório elétrico de partida consiste na obtenção de R (Ω) e l (H), através da solução de um modelo de otimização usando AG. O modelo de otimização desenvolvido para determinação destes parâmetros associa as equações de corrente e as hipóteses apresentadas anteriormente às seguintes informações do motor: I_N (A), I_p (A), V_N (V, onde $v_s = V_N / \sqrt{3}$), ω (rad/s), $\cos \phi_N$ (fator de potência nominal) e $\cos \phi_p$ (fator de potência de partida). Este modelo de otimização é dado pelo seguinte conjunto de equações:

$$\begin{aligned} \text{Max } F(\mu) &= \left(\prod_{i=1}^2 \mu_i \right)^{\frac{1}{2}} \\ \text{s.a.} \\ I_N &< I_p^{\text{mod}} \leq I_p \\ \cos \phi_p &\leq \cos \phi_p^{\text{mod}} < \cos \phi_N \\ \bar{X} &\geq 0 \end{aligned} \tag{22}$$

sendo:

μ_i : i -ésimo termo da função objetivo do modelo de otimização;

$F(\mu)$: função objetivo do modelo de otimização;

I_p^{mod} : corrente de partida (A) obtida na solução do modelo de otimização que representa ou corresponde à I_p ;

$\cos \phi_p^{\text{mod}}$: fator de potência de partida obtido na solução do modelo de otimização que representa ou corresponde a $\cos \phi_p$;

$\bar{X}$: vetor que representa a solução do modelo de otimização, $\bar{X} = [R, l]^T$.

A seguir estão detalhadas a função objetivo, as restrições e as particularidades da técnica usada para solução deste modelo de otimização.

a) *Função Objetivo*

A função objetivo desenvolvida relaciona I_p e $\cos \phi_p$ com os seus correspondentes, I_p^{mod} e $\cos \phi_p^{\text{mod}}$, calculados através $\bar{X}$. O objetivo é minimizar o erro entre cada informação (dado de placa) e sua correspondente (calculada), de modo que $\bar{X}$ seja o resultado otimizado. Desta forma são criados dois termos para composição de função objetivo:

$$\mu_i = 1 - \delta_i, \text{ para } i = 1, 2 \quad (23)$$

sendo:

δ_i : erro relativo entre o i -ésimo dado de placa considerado na função objetivo e seu correspondente obtido na solução do problema de otimização.

Impõe-se que cada termo da função objetivo possua como domínio o intervalo $[0,1]$. Isto faz com que o erro relativo δ_i também seja sempre positivo e varie no mesmo intervalo. Para isto, os valores de I_p^{mod} e ϕ_p^{mod} devem ser tais que:

$$0 < I_p^{\text{mod}} \leq I_p \quad \text{e} \quad 0 < \cos \phi_p^{\text{mod}} \leq \cos \phi_p \quad (24)$$

O valor máximo de um termo é alcançado quando $\delta_i^{\text{min}} = 0$, ou seja, $\mu_i^{\text{max}} = 1$. Por sua vez, o valor mínimo de um termo é alcançado quando $\delta_i^{\text{max}} = 1$, ou seja, $\mu_i^{\text{min}} = 0$.

O termo μ_1 que avalia o erro entre as correntes I_p e I_p^{mod} é dado por:

$$\mu_1 = 1 - \delta_1 = 1 - \left(\frac{I_p - I_p^{\text{mod}}}{I_p} \right) \quad (25)$$

Onde, por hipótese, tem-se que:

$$I_p^{\text{mod}} = \frac{1}{3} \left(\sqrt{\frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} [i_{s1}(t, \bar{X})]^2 dt} + \sqrt{\frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} [i_{s2}(t, \bar{X})]^2 dt} + \sqrt{\frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} [i_{s3}(t, \bar{X})]^2 dt} \right) \quad (26)$$

O termo μ_2 que avalia o erro entre $\cos \phi_p$ e $\cos \phi_p^{\text{mod}}$ é dado por:

$$\mu_2 = 1 - \delta_2 = 1 - \left(\frac{\cos \phi_p - \cos \phi_p^{\text{mod}}}{\cos \phi_p} \right) \quad (27)$$

sendo:

$$\cos \phi_p^{\text{mod}} = \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{\omega l}{R} \right) \right) \quad (28)$$

A função objetivo do modelo de otimização proposto é formulada como sendo a maximização da média geométrica dos termos μ_1 e μ_2 , ou seja:

$$F(\mu) = \left(\prod_{i=1}^2 \mu_i \right)^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

A média geométrica representa de maneira mais coesa o objetivo do problema. Diferentemente da média aritmética ou média ponderada, a média geométrica atinge seu valor máximo somente quando ambos os valores são elevados, caso contrário, o resultado será baixo. Desta forma, o valor ótimo da função objetivo é obtido quando os seus dois termos da contemplam simultaneamente seus valores máximos. Desta forma, o valor máximo ou ótimo da função objetivo é 1 (um). Já o mínimo ou pior valor da função objetivo é 0 (zero).

b) Restrições

A corrente I_p é sempre maior que I_N e o domínio de μ_1 não deve ser violado:

$$I_N < I_p^{\text{mod}} \leq I_p \quad (30)$$

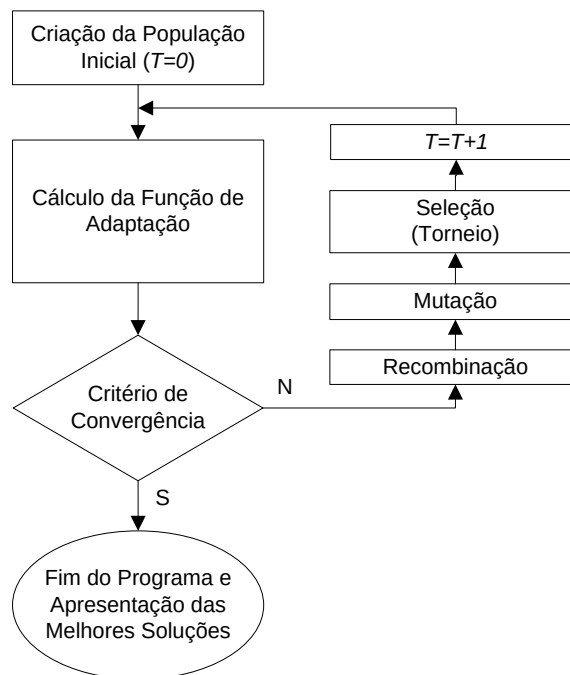
O fator de potência $\cos \phi_p$ é sempre menor que $\cos \phi_N$ e o domínio de μ_2 não deve ser violado:

$$\cos \phi_p \leq \cos \phi_p^{\text{mod}} < \cos \phi_N \quad (31)$$

c) Técnica de Solução

O modelo de otimização desenvolvido para determinação dos parâmetros do circuito equivalente do MIT no transitório elétrico de partida é resolvido usando um AG dedicado (REEVES, 2003; GOLDBERG, 1989). A estrutura deste algoritmo está representada no diagrama de blocos da Figura 13.

Figura 13 - Estrutura do AG desenvolvido



Fonte: o próprio autor

A seguir estão descritas as particularidades de cada uma das etapas do AG dedicado à solução do modelo de otimização proposto:

- **Criação da População Inicial:** Inicialmente (geração $T=0$) é criada aleatoriamente uma população de n indivíduos, onde cada indivíduo v possui um cromossomo de valores reais com dois genes representando $\bar{X}$, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Representação da população inicial gerada

$$\left. \begin{array}{l} \text{Geração} \\ T = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} v_1^0 = \left(\begin{array}{|c|} \hline R_1 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline l_1 \\ \hline \end{array} \right) \\ v_2^0 = \left(\begin{array}{|c|} \hline R_2 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline l_2 \\ \hline \end{array} \right) \\ \vdots \\ v_{n-1}^0 = \left(\begin{array}{|c|} \hline R_{n-1} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline l_{n-1} \\ \hline \end{array} \right) \\ v_n^0 = \left(\begin{array}{|c|} \hline R_n \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline l_n \\ \hline \end{array} \right) \end{array}$$

Fonte: o próprio autor

- **Cálculo da Função de Adaptação:** A função de adaptação desempenha o papel do meio ambiente avaliando o potencial das soluções em termos de sua adaptação. Esta função é calculada para cada indivíduo (cromossomo) considerando as infactibilidades, caso existam. Para soluções factíveis a função de adaptação é a própria função objetivo do modelo de otimização. Por sua vez, para soluções infactíveis a função objetivo não pode ser calculada porque os domínios de seus termos foram violados. Desta forma, a função de adaptação destas soluções recebem o valor mínimo da função objetivo (zero) como forma de penalização.
- **Recombinação:** A recombinação é baseada na troca de material genético entre dois indivíduos para dar origem a dois novos indivíduos da população. Nesta etapa são realizados $n/2$ sorteios para que todos os indivíduos tenham chance de trocar material genético entre si. A cadeia de genes trocada entre dois indivíduos é definida através do sorteio dos pontos entre os genes. Neste trabalho, em particular, os cromossomos possuem apenas um ponto entre genes e este sorteio não é necessário. A recombinação ocorre se o valor gerado aleatoriamente por uma função randômica é menor que a taxa de recombinação T_R (%).
- **Mutação:** A mutação é responsável pela alteração da informação genética de um ou mais genes de um indivíduo. Neste trabalho, a mutação produz uma pequena alteração (aumento ou redução percentual aleatória) no valor do gene mutado, sendo definida para alterar até 30% do valor do mesmo. Todos os genes dos n indivíduos podem sofrer mutação. A mutação de um gene qualquer de um indivíduo ocorre se o valor gerado aleatoriamente por uma função randômica é menor que a taxa de mutação T_m (%).

- **Seleção por Torneio:** Nesta estratégia os indivíduos de uma geração T são escolhidos através da realização de n torneios para serem os pais de uma nova geração $T+1$, onde n é o tamanho da população. Em cada torneio é escolhido aleatoriamente um conjunto de k indivíduos, sendo que o indivíduo ganhador deste torneio é aquele que possui a função de adaptação de melhor qualidade. O valor de k é geralmente pequeno, tipicamente, $k \in \{2, 3, 4, 5\}$. O processo de seleção é finalizado após a realização de n torneios entre os indivíduos da população.
- **Critério de Convergência:** O critério de convergência avalia se a solução incumbente não apresenta melhoria de qualidade durante um número preestabelecido de iterações (T_{inc}) ou se é atingindo o número máximo de gerações (T_{max}) para que o processo seja considerado convergido.

3.1.2 CÁLCULO DAS CORRENTES SOLICITADAS PELAS FASES DO MIT NA PARTIDA DESEQUILIBRADA

A determinação de $\bar{X}$ permite o cálculo da máxima corrente *rms* solicitada em fase do motor na partida desequilibrada, ou seja, no transitório elétrico de partida. Estas correntes são calculadas para o primeiro ciclo completo da rede para obtenção do máximo desequilíbrio, de acordo com as Equações (32), (33) e (34):

$$I_{p1}^{\text{mod}} = \sqrt{\frac{1}{T_t/3} \int_0^{T_t/3} [i_{s1}(t, \bar{X})]^2 dt} \quad (32)$$

$$I_{p2}^{\text{mod}} = \sqrt{\frac{1}{T_t/3} \int_0^{T_t/3} [i_{s2}(t, \bar{X})]^2 dt} \quad (33)$$

$$I_{p3}^{\text{mod}} = \sqrt{\frac{1}{T_t/3} \int_0^{T_t/3} [i_{s3}(t, \bar{X})]^2 dt} \quad (34)$$

sendo:

I_{p1}^{mod} , I_{p2}^{mod} e I_{p3}^{mod} : corrente *rms* nas fases 1, 2 e 3 do motor trifásico para o primeiro ciclo do transitório elétrico de partida (A), respectivamente;

3.1.3 EQUACIONAMENTO DO MODELO EM POTÊNCIA CONSTANTE NA PARTIDA DESEQUILIBRADA DE MIT

Por sua vez, a obtenção das correntes (32), (33) e (34) permite o cálculo da máxima potência solicitada por cada fase do motor durante o transitório elétrico de partida (no primeiro ciclo completo da rede). O conjunto de equações formado por estas potências representa o modelo em potência constante proposto para a partida desequilibrada de MIT, ou seja:

$$S_{P1} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_N I_{P1}^{\text{mod}} \quad (35)$$

$$S_{P2} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_N I_{P2}^{\text{mod}} \quad (36)$$

$$S_{P3} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_N I_{P3}^{\text{mod}} \quad (37)$$

sendo:

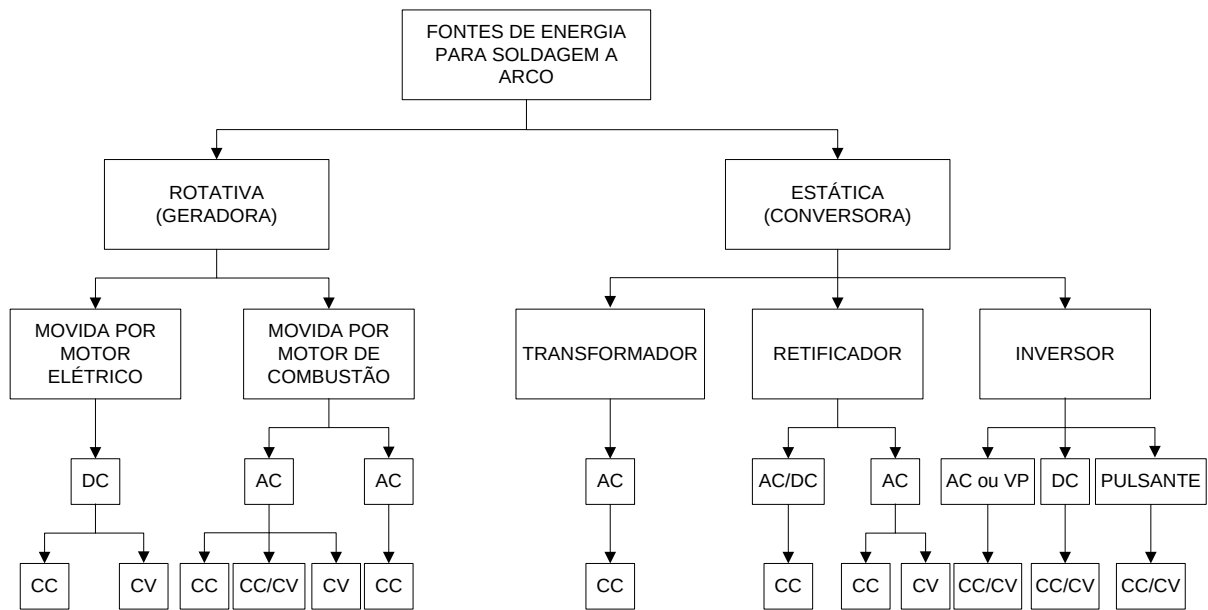
S_{P1} , S_{P2} e S_{P3} : potências solicitadas pelas fases 1, 2 e 3 do motor trifásico no primeiro ciclo do transitório elétrico de partida (VA), respectivamente.

Nota-se que a modelagem proposta contempla o desequilíbrio real de partida não abordado pela modelagem clássica.

3.2 MODELAGEM DO CURTO-CIRCUITO DE MSA-CC/CV

Existem diversos tipos e modelos de MSA e uma infinidade de tipos e técnicas de soldagem. Elas podem produzir o arco de solda tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua (retificada). Apesar desta diversidade as máquinas de soldagem a arco se resumem a soldar em corrente constante ou em tensão constante. Na Figura 15 ilustra-se a classificação das fontes de energia convencionais para soldagem a arco.

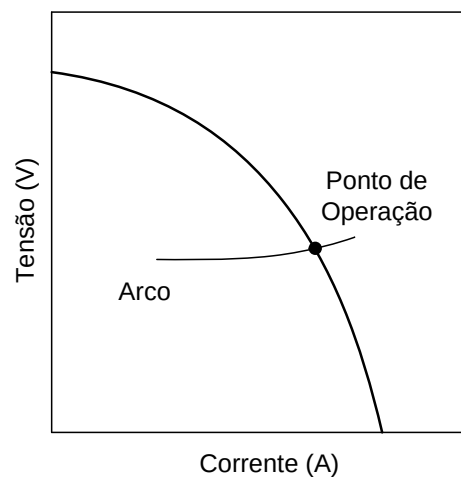
Figura 15 - Classificação das fontes de energia convencionais para soldagem a arco



Fonte: (CARY, 1998; MODENESI, 2009)

As MSA-CC permitem que, durante a soldagem, o comprimento do arco varie sem que a corrente de soldagem sofra grandes alterações. Eventuais curtos-circuitos entre o eletrodo e o metal da base não causam uma elevação importante da corrente. Elas são geralmente utilizadas quando a extensão do arco é controlada pelo soldador como, por exemplo, em máquinas de solda do tipo TIG. Se a extensão do arco é intencionalmente variada, a tensão também varia para manter a corrente de soldagem constante (WEMAN, 2003; MODENESI, 2009). O comportamento da curva característica estática destas máquinas está ilustrado através da Figura 16.

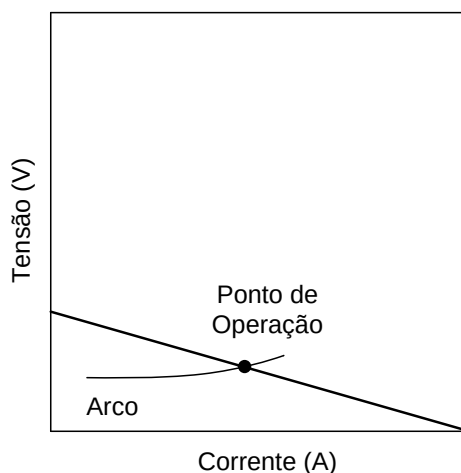
Figura 16 - Curva característica estática das MSA-CC



Fonte: (MODENESI, 2009)

Por outro lado, as MSA-CV fornecem a mesma tensão em toda a sua faixa de operação, cuja inclinação da curva característica (*slope*), ou seja, a variação de tensão destas máquinas situa-se entre 0,01 e 0,04V/A. Estas máquinas permitem grandes variações de corrente em resposta às mudanças do comprimento do arco durante a soldagem. Este comportamento permite o controle do comprimento do arco por variações da corrente de soldagem e, portanto, variações da taxa de fusão do eletrodo em processos de soldagem nos quais o mesmo é alimentado com uma velocidade constante, por exemplo, nos processos SAW e GMAW (MODENESI, 2009). A grande elevação de corrente durante um curto-circuito do eletrodo com o metal de base, facilita a fusão e a transferência do metal fundido do eletrodo para a poça de fusão na soldagem com transferência por curto-circuito (CARY, 2003; WEMAN, 2003). O comportamento da curva característica estática destas máquinas está ilustrado através da Figura 17.

Figura 17 - Curva característica estática das MSA-CV



Fonte: (MODENESI, 2009)

A modelagem clássica do curto-circuito destas máquinas não contempla o comportamento real de cada fonte de soldagem, sendo baseada apenas em algumas verificações práticas.

Neste trabalho, a metodologia proposta para modelagem em potência constante do curto-circuito das MSA-CC/CV é baseada no comportamento das curvas características estáticas de cada fonte de solda e utiliza os dados de placa fornecidos pelos fabricantes. Esta metodologia também é dividida em três etapas: estimativa da corrente nos terminais das MSA no curto-circuito, estimativa do fator de potência das MSA no curto-circuito e

equacionamento do modelo em potência constante das MSA no curto-circuito. Mas, para isto, são adotadas as seguintes hipóteses:

- O comportamento das curvas características estáticas das MSA-CC é equivalente a uma função do 2º grau (Figura 16);
- O comportamento das curvas características estáticas das MSA-CV é equivalente a uma função do 1º grau (Figura 17);
- O fator de potência das MSA varia conforme o comportamento estático de suas fontes de soldagem.

Nas subseções a seguir estão descritas cada uma das etapas da metodologia proposta para modelagem em potência constante do curto-circuito de MSA.

3.2.1 ESTIMAÇÃO DA CORRENTE NOS TERMINAIS DAS MSA NO CURTO-CIRCUITO

A estimação da corrente de curto-circuito das MSA-CC e MSA-CV exige a obtenção prévia da relação entre a tensão e a corrente dos terminais da fonte de solda, isto é, a obtenção das equações que descrevem o comportamento de suas curvas características estáticas. Esta relação pode ser obtida usando-se algumas informações sobre o ponto de operação desejado, fornecidas na placa destas máquinas, ou seja: a corrente de soldagem ajustada, I_A (A), a tensão nos terminais da fonte de solda em vazio, v_E (V), e a tensão do arco para a corrente ajustada, v_A (V); além das funções (1º ou 2º grau) características de suas fontes de soldagem, conforme descrito nas hipóteses adotadas acima. Assim sendo, tem-se que:

a) MSA-CC

A relação (2º grau) que descreve o comportamento estático das MSA-CC é dada pela seguinte equação:

$$v_T = - \left(\frac{v_E}{(I_{SC}^{est})^2} \right) I^2 + v_E \quad (38)$$

sendo:

v_T : tensão nos terminais da fonte de solda das MSA (V);
 I_{SC}^{est} : corrente de curto-circuito nos terminais da fonte de solda (A);
 I : corrente nos terminais da fonte de solda das MSA (A), cuja faixa de variação situa-se entre $0 \leq I \leq I_{SC}^{est}$.

Substituindo as informações de placa ($v_T = v_A$, $I = I_A$ e v_E) na Equação (38) é possível estimar a corrente de curto-circuito da máquina, ou seja:

$$I_{SC}^{est} = \left(\frac{v_E}{v_E - v_A} \right)^{\frac{1}{2}} I_A \quad (39)$$

b) MSA-CV

A relação (1º grau) que descreve o comportamento estático das MSA-CV é dada pela seguinte equação:

$$v_T = - \left(\frac{v_E}{I_{SC}^{est}} \right) I + v_E \quad (40)$$

Substituindo as variáveis ($v_T = v_A$, $I = I_A$ e v_E) na Equação (40), estima-se a corrente de curto-circuito da máquina:

$$I_{SC}^{est} = \left(\frac{v_E}{v_E - v_A} \right) I_A \quad (41)$$

3.2.2 ESTIMAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DAS MSA NO CURTO-CIRCUITO

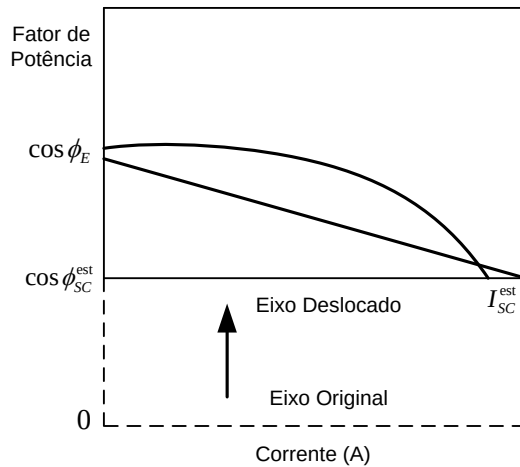
O fator de potência das MSA varia de forma similar ao comportamento estático de sua fonte de solda, conforme hipóteses adotadas acima. Desta forma, o fator de potência se comporta como uma função do 2º grau em MSA-CC e como uma função do 1º grau em MSA-CV. A estimação do fator de potência das MSA em curto-circuito exige, de forma similar à estimação da corrente de curto-circuito, a obtenção prévia da relação entre o fator de potência

e a corrente nos terminais da fonte de solda, usando as seguintes informações sobre o ponto de operação desejado: a corrente de soldagem ajustada, I_A (A), a corrente de curto-circuito estimada, I_{SC}^{est} (A), o fator de potência da máquina em vazio, $\cos \phi_E$, e o fator de potência da máquina funcionando com a corrente ajustada, $\cos \phi_A$.

As MSA são de natureza indutiva e, por isso, considera-se que o fator de potência varia entre o valor unitário (em vazio, considerando que a máquina é compensada reativamente) até o fator de potência em curto-circuito estimado.

Neste caso, o eixo das abscissas é deslocado até o fator de potência em curto-circuito, que é o menor que o valor de fator de potência da máquina, de modo que a corrente de curto-circuito também seja raiz das equações que representam o fator de potência. Na Figura 18 ilustra-se este deslocamento de eixo.

Figura 18 - Ilustração do deslocamento de eixo para as curvas de fator de potência das MSA-CC/CV



Fonte: o próprio autor

Levando em conta todas estas considerações, tem-se que:

a) *MSA-CC*

A relação (2º grau) que descreve o comportamento do fator de potência das MSA-CC é dada por:

$$\cos \phi = - \left(\frac{\cos \phi_E - \cos \phi_{SC}^{est}}{(I_{SC}^{est})^2} \right) I^2 + \cos \phi_E \quad (42)$$

sendo:

$\cos \phi$: fator de potência das MSA;

$\cos \phi_{SC}^{est}$: fator de potência de curto-circuito das MSA.

Substituindo as variáveis ($I = I_A$, I_{SC}^{est} , $\cos \phi_E$ e $\cos \phi = \cos \phi_A$) na Equação (42) se estima o fator de potência da máquina no curto-circuito, ou seja:

$$\cos \phi_{SC}^{est} = (\cos \phi_A - \cos \phi_E) \left(\frac{I_{SC}^{est}}{I_A} \right)^2 + \cos \phi_E \quad (43)$$

b) MSA-CV

A relação (1º grau) que descreve o comportamento do fator de potência das MSA-CV é dada por:

$$\cos \phi = - \left(\frac{\cos \phi_E - \cos \phi_{SC}^{est}}{I_{SC}^{est}} \right) I + \cos \phi_E \quad (44)$$

Substituindo as variáveis ($I = I_A$, I_{SC}^{est} , $\cos \phi_E$ e $\cos \phi = \cos \phi_A$) na Equação (44) se estima o fator de potência da máquina no curto-circuito, ou seja:

$$\cos \phi_{SC}^{est} = (\cos \phi_A - \cos \phi_E) \frac{I_{SC}^{est}}{I_A} + \cos \phi_E \quad (45)$$

3.2.3 EQUACIONAMENTO DO MODELO EM POTÊNCIA CONSTANTE DAS MSA NO CURTO-CIRCUITO

A obtenção dos parâmetros anteriores (corrente e fator de potência no curto-circuito) permite o cálculo das potências ativa e reativa solicitadas pelas MSA (CC ou CV) durante o estágio de curto-circuito. As equações abaixo representam a modelo em potência constante do curto-circuito de MSA, obtido a partir da metodologia proposta.

$$S_{SC} = \left(\frac{V_N}{k} \right) I_{SC}^{\text{est}} \quad (\text{máquina monofásica ou bifásica}) \quad (46)$$

$$S_{SC} = \sqrt{3} \left(\frac{V_N}{k} \right) I_{SC}^{\text{est}} \quad (\text{máquina trifásica}) \quad (47)$$

sendo:

$$k = \frac{I_A}{I_{LA}} \quad (48)$$

Lembrando que I_{LA} é a corrente solicitada da rede por cada fase de alimentação da máquina operando com a corrente de soldagem ajustada, I_A .

4 ALGORITMO DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS IMPACTOS DOS MIT E MSA NAS REDES SECUNDÁRIAS

Neste capítulo apresentam-se a metodologia utilizada para cálculo do fluxo de potência em redes de distribuição secundárias trifásicas e o algoritmo de simulação e análise dos impactos provocados pelo funcionamento das cargas especiais estudadas (MI e MSA) na qualidade da energia fornecida.

4.1 CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA EM REDES SECUNDÁRIAS

O cálculo do fluxo de potência em redes de distribuição de energia elétrica tem como objetivo determinar o estado da rede, ou seja, conhecer as tensões nas barras, as correntes nos ramos, além das perdas ativas e reativas.

As redes de distribuição de energia elétrica podem apresentar dois tipos de topologia, ou seja, radial e/ou malhada. Para cada topologia recomenda-se um tipo diferente de metodologia para solução do problema de fluxo de potência. Essas metodologias estão divididas em duas categorias:

- **Método de Varredura Direta e Inversa:** recomendados, principalmente, para sistemas puramente radiais, mas pode ser adaptada para redes com um pequeno número de malhas, ou seja, fracamente malhadas. Este método possui característica iterativa e representa a rede através de uma árvore orientada, onde a subestação corresponde à raiz, o tronco ao ramal principal e os ramos aos ramais laterais que partem do tronco. O processo de varredura inversa consiste no cálculo das correntes dos ramos, partindo das barras extremas em direção à subestação, estimadas as tensões iniciais das barras. A varredura direta é responsável pela atualização das tensões nas barras e o algoritmo converge quando o critério de convergência preestabelecido é atingido. Existem duas vertentes para esse tipo de método, sendo uma baseada em termos de corrente (Soma de Correntes) e a outra em termos de potência (Soma de Potências).
- **Métodos Baseados na Matriz de Impedância Nodal Implícita:** utilizam uma formulação adequada aos sistemas malhados baseada na formação e fatoração da matriz admitância nodal e injeções de corrente equivalentes, onde os efeitos da fonte e das cargas são representados separadamente por superposição.

Neste trabalho se utiliza a metodologia de varredura direta e inversa na vertente soma de correntes para redes radiais com adaptação para redes fracamente malhadas, devido aos possíveis arranjos topológicos das redes de distribuição secundárias.

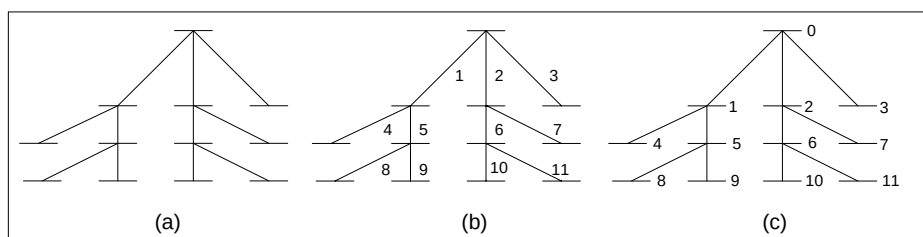
4.1.1 FLUXO DE POTÊNCIA RADIAL DE VARREDURA TRIFÁSICO A QUATRO FIOS

Um sistema de distribuição de energia elétrica está sujeito a uma distribuição desequilibrada de carga ao longo de sua topologia, fazendo com que a determinação do estado da rede seja realizada através de um fluxo de potência trifásico a quatro fios.

Para o cálculo do fluxo de potência trifásico a quatro fios para redes radiais foi utilizado um método de varredura simples, denominado *backward/forward*, o qual se enquadra na vertente de soma de correntes. O processo é caracterizado por varreduras diretas (da fonte para as barras extremas) e inversas (das barras extremas para a fonte) e converge quando atinge o critério de parada (CHENG; SHIRMOHAMMADI, 1995). No caso de redes secundárias a fonte é o transformador de distribuição (MT/BT).

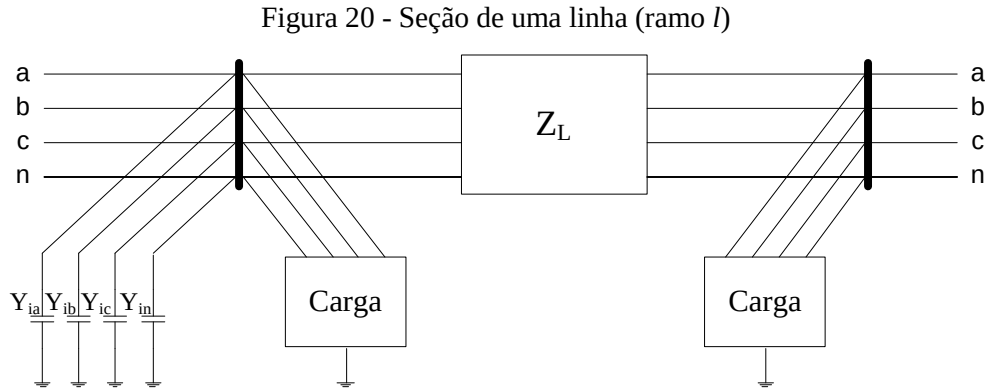
Este método é descrito como ramo-orientado e necessita de uma numeração correta e ordenada de seus ramos e nós. O sistema da Figura 19 (a) representa uma rede radial de distribuição com n nós e $r=(n-1)$ ramos com apenas uma fonte de alimentação localizada no nó raiz do alimentador. A numeração dos ramos deve necessariamente iniciar a partir do nó raiz (fonte) e seguir em direção aos nós extremos do alimentador organizando-se por camadas, como mostra a Figura 19 (b). A numeração dos nós deve seguir a numeração dos ramos que os conectam às camadas anteriores, como mostra a Figura 19 (c). Este processo de numeração é implementado na sub-rotina do fluxo de potência de modo a simplificar a programação e aumentar a rapidez dos cálculos.

Figura 19 - Numeração de um pequeno sistema de distribuição radial (a), (b) e (c)



Fonte: (MATHIAS-NETO, 2011)

O método de varredura simples (*backward/forward*) proposto envolve o equacionamento da rede através da teoria de circuitos elétricos – Leis de *Kirchhoff* e equações de potência. Na Figura 20 ilustra-se um alimentador radial em que os valores de tensões (*forward*) e correntes (*backward*) nas barras, assim como as perdas ativa e reativa são consideradas no modelo de circuitos usado pelo algoritmo.



Fonte: (COSSI, 2008)

A matriz de impedância série ($\mathbf{Z}$) para a seção da linha da Figura 20 pode ser representada por:

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} Z_{aa,L} & Z_{ba,L} & Z_{ca,L} & Z_{na,L} \\ Z_{ab,L} & Z_{bb,L} & Z_{cb,L} & Z_{nb,L} \\ Z_{ac,L} & Z_{bc,L} & Z_{cc,L} & Z_{nc,L} \\ Z_{an,L} & Z_{bn,L} & Z_{cn,L} & Z_{nn,L} \end{bmatrix} \quad (49)$$

O processo iterativo para o cálculo do fluxo de potência consiste em adotar valores de tensão e ângulo do nó de referência e atribuir valores de tensão para todos os outros nós do sistema. O algoritmo deste processo iterativo é descrito a seguir:

- i. Fixar as tensões nas barras como sendo iguais à tensão da barra de referência (subestação) ($V_i^{a,b,c,n} = V^{ref}$), sendo V^{ref} a magnitude de tensão na barra controlada. Fazer $S_{loss,abcn}^1 = 0$, ou seja, a potência que está saindo da subestação é o somatório de todas as cargas do alimentador;

ii. Iniciando das barras extremas, calcula-se a corrente de carga para cada nó da rede conforme Equação (50).

$$\begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \end{bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} (S_{ia} / V_{ia}^{(K)})^* \\ (S_{ib} / V_{ib}^{(K)})^* \\ (S_{ic} / V_{ic}^{(K)})^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ia}^* & & \\ & Y_{ib}^* & \\ & & Y_{ic}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^{(K)} \quad (50)$$

$$[I_{in}]^{(K)} = -[I_{ia} + I_{ib} + I_{ic}]^{(K)}$$

sendo:

$I_{i, abcn}$: injeção de corrente no nó i ;

$S_{i, abcn}$: injeção de potência especificada no nó i ;

$V_{i, abcn}$: tensão no nó i ;

$Y_{i, abcn}$: admitância de todos os elementos shunts conectados no nó i ;

K : contador do número de iterações;

$*$: operador complexo conjugado.

iii. Partindo-se dos ramos da última camada em direção às camadas conectadas ao nó de referência, calculam-se as correntes em cada ramo fazendo-se a soma da corrente do próprio nó com a corrente de todos os ramos que derivam até o mesmo nó, conforme Equação (51).

$$\begin{bmatrix} J_{La} \\ J_{Lb} \\ J_{Lc} \\ J_{Ln} \end{bmatrix}^{(K)} = - \begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \\ I_{in} \end{bmatrix}^{(K)} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} J_{ma} \\ J_{mb} \\ J_{mc} \\ J_{mn} \end{bmatrix}^{(K)} \quad (51)$$

sendo:

$J_{L, abcn}$: fluxos de corrente na respectiva seção da linha;

M : linhas da seção conectados ao nó i .

Observação: o sinal negativo na Equação (51) é para ficar consistente com a injeção de corrente na Equação (50).

iv. Partindo-se do nó de referência em direção às últimas camadas, calculam-se as novas magnitudes de tensões para cada nó de acordo com a Equação (52).

$$\begin{bmatrix} V_{Ja} \\ V_{Jb} \\ V_{Jc} \\ V_{Jn} \end{bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \\ V_{in} \end{bmatrix}^{(K)} - \begin{bmatrix} Z_{aa,L} & Z_{ba,L} & Z_{ca,L} & Z_{na,L} \\ Z_{ab,L} & Z_{bb,L} & Z_{cb,L} & Z_{nb,L} \\ Z_{ac,L} & Z_{bc,L} & Z_{cc,L} & Z_{nc,L} \\ Z_{an,L} & Z_{bn,L} & Z_{cn,L} & Z_{nn,L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{La} \\ J_{Lb} \\ J_{Lc} \\ J_{Ln} \end{bmatrix}^{(K)} \quad (52)$$

sendo:

- Z_{ii} : impedância própria da fase i do ramo l ;
- Z_{ji} : impedância mútua entre as fases i e j do ramo l ;
- J_{abcn} : nó receptor ou final do ramo l .

v. Calcular as perdas totais do alimentador usando a Equação (53). Fazer

$$S_{loss,abcn}^{2(K)} = S_{loss,abcn}^{(K)};$$

$$\begin{aligned} [S_{pfase}^{abcn}]^{(K)} &= \sum_{L=1}^{nramos} \left[[Z_L] [J_{L,abcn}] [J_{L,abcn}^*] \right]^{(K)} \\ S_{loss,abcn}^{(K)} &= \sum_i^{a,b,c,n} S_{pfase}^i \end{aligned} \quad (53)$$

vi. Se $K \geq 2$, realizar o teste de convergência do algoritmo de acordo com a equação:

$$\left| S_{loss,abcn}^{2(K)} - S_{loss,abcn}^{1(K)} \right| \leq \varepsilon \quad (54)$$

sendo:

ε : valor real próximo de zero utilizado como critério de parada do algoritmo.

- Se a desigualdade é atendida, parar o processo iterativo, convergência obtida.
- Caso contrário fazer $S_{loss,abcn}^{1(K)} = S_{loss,abcn}^{2(K)}$ e, com os valores das correntes de ramos I_{km} conhecidos, calculam-se os novos valores dos módulos de tensão das barras do sistema, iniciando o processo a partir da subestação (*forward*). Voltar ao passo *ii*.

4.1.1.1 REDES FRACAMENTE MALHADAS

O algoritmo de cálculo de fluxo de potência apresentado acima para redes radiais não pode ser aplicado diretamente em redes fracamente malhadas, é necessário primeiramente transformá-la em uma configuração radial aplicando alguns conceitos da teoria de circuitos com vistas a quebrar as interconexões da rede, criando os chamados *breakpoints* (pontos de ruptura). As correntes dos ramos interrompidos pela criação desses *breakpoints* são substituídas por injeções de correntes em ambos os seus nós finais, com polaridade oposta, sem afetar as condições de operação do sistema. A partir do cálculo das correntes dos *breakpoints* de cada malha, determinam-se as variações das tensões dos nós da abertura dos *breakpoints*, para cada iteração até a convergência, ou seja, até que a variação dessas tensões seja menor ou igual a uma tolerância preestabelecida (SHIRMOHAMMADI et al., 1998). Assim como para redes de distribuição radiais, os nós são numerados em camadas a partir do nó raiz (fonte).

Cada etapa da técnica de transformação de uma rede fracamente malhada em radial e do cálculo do fluxo de potência para tais redes são descritos a seguir:

- i. Quebrar laço, formando os chamados *breakpoints*: o sistema passa a ter a estrutura de uma rede radial;
- ii. Injetar corrente nos dois nós criados com a quebra do laço com polaridades opostas de acordo com as Equações (55) e (56), como mostra a Figura 21. As correntes nas outras barras serão zero.

$$\begin{bmatrix} I_{j1a} \\ I_{j1b} \\ I_{j1c} \end{bmatrix}^{(K)} = - \begin{bmatrix} J_{ja} \\ J_{jb} \\ J_{jc} \end{bmatrix}^{(K)} \quad (55)$$

$$\begin{bmatrix} I_{j2a} \\ I_{j2b} \\ I_{j2c} \end{bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} J_{ja} \\ J_{jb} \\ J_{jc} \end{bmatrix}^{(K)} \quad (56)$$

sendo:

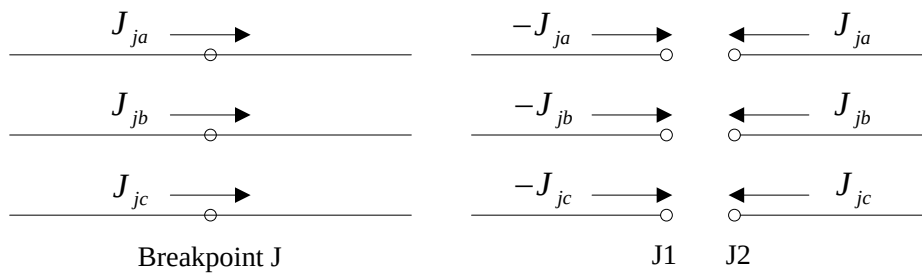
j_1 e j_2 : *breakpoints* (nós) criados com a quebra da interconexão do nó j ,
 $j=1,2,\dots,nb$;

$I_{j1,abcn}$ e $I_{j2,abcn}$: injeção de corrente nos nós $j1$ e $j2$, respectivamente;

J_j : corrente de *breakpoint*;

nb : número de *breakpoints*.

Figura 21 - Representação dos breakpoints usando injeção de corrente nodal



Fonte: (COSSI, 2008)

iii. Formar a matriz impedância dos *breakpoints* (Z_{abc}^B) de acordo com a Equação (57).

No algoritmo, Z_{abc}^B é formado e construído no começo, antes de qualquer iteração.

$$\begin{bmatrix} V_1^B \\ V_2^B \\ \vdots \\ V_{nb}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1j} & \cdots & Z_{1P} \\ Z_{j1} & \cdots & Z_{jj} & \cdots & Z_{jP} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{P1} & \cdots & Z_{Pj} & \cdots & Z_{PP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_j \\ \vdots \\ J_P \end{bmatrix} \quad (57)$$

- De acordo com a Equação (57), a coluna j será igual ao vetor de tensão *breakpoint* para $J_j=1$ e $J_i=0$, com $i=1,2,\dots,nb$ e $i \neq j$.
- Isto corresponde à aplicação de 1 pu de corrente de *breakpoint* J com todas as cargas e fontes removidas, o que é equivalente a injeção de corrente de 1 pu com polaridade oposta nos dois nós do *breakpoint*, Equações (55) e (56).

iv. Processar fluxo de potência para uma rede radial: processa-se o fluxo de potência calculando as equações apresentadas para uma rede radial considerando todos os nós da rede, incluindo os *breakpoints*;

v. Teste de convergência: além do teste de convergência normal para uma rede radial, para os *breakpoints* deve-se calcular também a variação das tensões ($\Delta V_{j1,2abc}^B$) nos nós de cada *breakpoint*, como mostra a Equação (58).

$$\left[\Delta V_{j1,2abc}^B \right]^{(K)} = \left[Z_{abc}^B \right] \left[J_{jabc} \right]^{(K)} \quad (58)$$

sendo:

$\Delta V_{j1,2abc}^B$: vetor de tensão da abertura dos *breakpoints* do circuito;

Z_{abc}^B : matriz não esparsa das impedâncias de *breakpoints*;

J_{jabc} : vetor das correntes de *breakpoints*.

Neste caso:

- Se $\Delta V_{j1,2abc}^B \leq$ referência, processo convergido;
- Caso contrário, atualizar as correntes dos *breakpoints* de acordo com as Equações (59) e (60). Continuar o processo até que todas as variações das tensões dos *breakpoints* sejam menores que a tolerância preestabelecida.

$$I_{j1abc} = I_{j1abc} - J_{jabc} \quad (59)$$

$$I_{j2abc} = I_{j2abc} + J_{jabc} \quad (60)$$

4.2 ALGORITMO DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE PROPOSTO

Para as concessionárias, a instalação ou alocação de uma carga em uma determinada unidade consumidora (barra de interesse) é vista como a necessidade de atender uma potência adicional, de modo que a qualidade da energia fornecida e a capacidade de fornecimento não sejam comprometidas. Em redes secundárias, os principais limitantes estruturais da instalação de novas cargas na rede são: a capacidade de potência dos transformadores de distribuição e de corrente nos cabos condutores. Para a permissão da instalação de novos consumidores de

característica residencial, geralmente, analisa-se apenas a capacidade da rede em suprir sua potência instalada e/ou a demanda máxima.

No entanto, a permissão da instalação de novos consumidores de característica industrial exige uma análise mais detalhada dos impactos que os mesmos irão provocar na qualidade da energia da rede, uma vez que estes consumidores são caracterizados pela grande utilização de cargas especiais em suas instalações. Os impactos do funcionamento destas cargas na qualidade da energia fornecida são analisados através da comparação entre o estado inicial da rede (antes da instalação da carga) com os estados obtidos para cada estágio de funcionamento da carga instalada, de acordo com as modelagens apresentadas anteriormente. Estas comparações permitem o cálculo e a análise da deterioração dos índices de QEE devido à instalação da carga na rede. Conforme já apresentado, o estado da rede é determinado através do cálculo do fluxo de potência.

A inexistência de uma ferramenta computacional específica pode atrasar de forma indesejada o processo de permissão da instalação de novos consumidores de característica industrial na rede, causando em algumas situações constrangimentos e até prejuízos ao consumidor interessado.

O algoritmo de simulação e análise dos impactos do funcionamento de cargas especiais proposto neste trabalho tem o intuito de facilitar e aumentar a rapidez do processo de permissão da instalação de novos consumidores industriais em redes secundárias. Este algoritmo é baseado na interface com o usuário, exigindo apenas o fornecimento dos dados de placa das cargas especiais e localização da barra de interesse. O fluxo de potência é calculado em três etapas, onde:

- **Etapas 1:** O estado da rede é determinado antes da instalação da carga especial na barra de interesse, ou seja, a potência que a carga solicita da rede é nula. Esta etapa é utilizada como referência para verificação dos impactos que cada estágio de funcionamento das novas cargas especiais irá provocar na rede;
- **Etapas 2:** o estado da rede é determinado com a carga especial em seu estágio mais crítico de funcionamento, ou seja, a partida de motores de indução e o curto-circuito de máquinas de soldagem a arco.
- **Etapas 3:** o estado da rede é determinado com a carga especial em seu estágio de funcionamento normal ou nominal, ou seja, o regime de motores de indução e o ponto de operação de máquinas de soldagem a arco.

A potência solicitada da rede por uma carga especial instalada na barra de interesse em cada uma destas etapas pode ser representada pela seguinte equação:

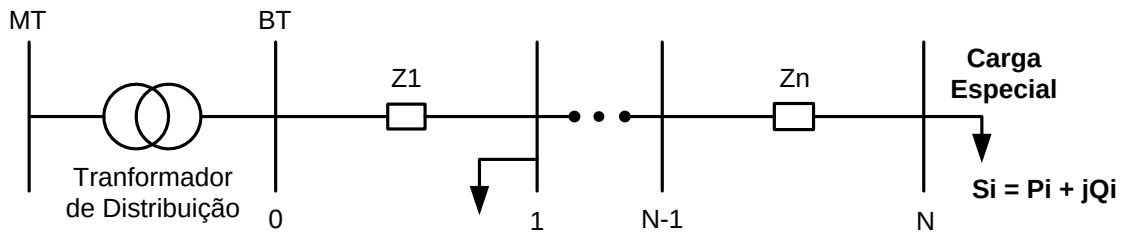
$$\dot{S}_i = P_i + j Q_i = S_i \cos \phi_i + j S_i \sin \phi_i, \quad i = 1, 2, 3. \quad (61)$$

sendo:

- i : etapa de cálculo de fluxo de potência;
- S_i : potência aparente solicitada pela carga especial da rede na etapa i (VA);
- P_i : potência ativa solicitada pela carga especial da rede na etapa i (W);
- Q_i : potência reativa solicitada pela carga especial da rede na etapa i (VAr);
- $\cos \phi_i$: fator de potência da carga especial na etapa i ;
- $\sin \phi_i$: seno do ângulo do fator de potência da carga especial na etapa i .

Na Figura 22 ilustra-se a representação de uma carga especial instalada na barra de interesse da rede secundária de distribuição de energia elétrica.

Figura 22 - Representação de uma carga especial instalada na barra de interesse da rede secundária



Fonte: o próprio autor

No caso de haver duas ou mais cargas especiais, a potência total da instalação será a soma das potências individuais solicitadas pelas cargas durante a etapa de cálculo do fluxo de potência, com possibilidade de aplicação de seus fatores de demanda. Nota-se que o pior caso de simulação é considerar que todas as cargas são acionadas simultaneamente e continuam a funcionar em condições normais sem serem desligadas, ou seja, que os fatores de demanda são unitários em todas as etapas.

A modelagem em potência constante dos principais estágios de funcionamento das cargas especiais estudadas permite a avaliação de alguns índices importantes de QEE (tensão em regime permanente, flutuação de tensão, desequilíbrio de tensão e variações de tensão a curta duração), conforme apresentado no Capítulo 2. No algoritmo proposto estes índices são

obtidos através da análise e comparação de etapas específicas do cálculo do fluxo de potência, sendo:

a) Tensão em Regime Permanente:

A tensão em regime permanente de cada barra da rede é obtida através da análise dos resultados obtidos nas Etapas 1 (pré-instalação da carga) e 3 (carga funcionando em condições nominais). Em cada uma destas etapas, verifica-se a quantidade de barras que se enquadram em cada nível de classificação da tensão em regime (adequada, precária ou crítica), de modo que os impactos das novas cargas especiais neste índice possam ser dimensionados.

b) Flutuação de Tensão:

O limite de flutuação de tensão é obtido com a definição do número máximo de acionamentos por intervalo de tempo das cargas especiais da instalação, conforme apresentado anteriormente. Este limite é usado para verificar se o afundamento máximo de tensão provocado pelas novas cargas especiais ultrapassa o limite de irritação dos consumidores (Figura 9). A violação deste limite é fundamental para direcionar o processo de permissão de instalação de novas cargas nas redes de BT existentes. O afundamento máximo de tensão no acionamento das cargas especiais é obtido através da comparação das tensões de todas as barras da rede entre as Etapa 1 (pré-instalação da carga) e 2 (carga no estágio de acionamento), de acordo com a Equação (62).

$$\Delta V_{1-2} = \max \left\{ \left(\frac{V_{etapa\ 1}^i - V_{etapa\ 2}^i}{V_{etapa\ 1}^i} \right) 100 \right\}, \quad i = 1, \dots, nbarras \quad (62)$$

sendo:

ΔV_{1-2} : afundamento máximo de tensão no acionamento de uma carga especial (%), calculado através da comparação entre as Etapas 1 e 2;

i : i-ésima barra da rede;

$nbarras$: número de barras da rede;

$V_{etapa\ 1}^i$: tensão da i-ésima barra da rede na Etapa 1;

$V_{etapa\ 2}^i$: tensão da i-ésima barra da rede na Etapa 2.

c) Desequilíbrio de Tensão:

O desequilíbrio máximo de tensão é obtido através da análise de todas as barras da rede e calculado em todas as etapas de simulação, conforme apresentado anteriormente. Apesar de não existirem limites de desequilíbrio de tensão definidos para redes secundárias, este índice também serve para verificar os impactos que cada estágio de funcionamento das cargas especiais provoca na rede.

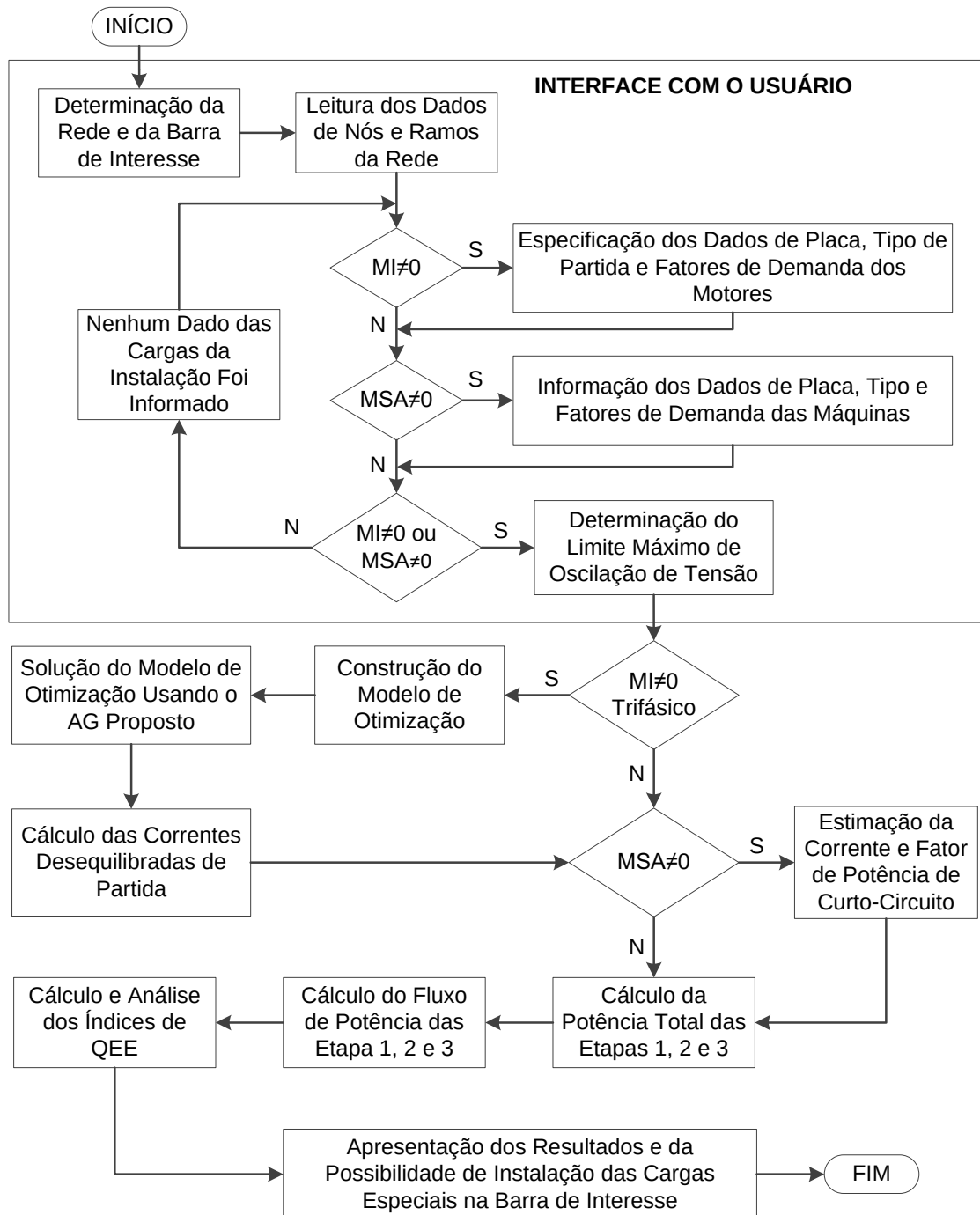
d) Variações de Tensão a Curta Duração

Conforme já visto no Capítulo 2, o acionamento ou transitório de “start” de cargas especiais podem provocar afundamentos momentâneos de tensão na rede elétrica. De acordo a ANEEL (2012b), as variações de tensão a curta duração são classificadas de acordo com o nível percentual de tensão em relação à tensão nominal da rede. No entanto, o próprio carregamento normal da rede em que a carga especial está instalada faz com que os níveis de tensão das barras sejam menores à medida que elas se distanciam da fonte. Neste trabalho, porém, deseja-se mensurar os impactos que o acionamento das cargas especiais provoca na tensão das barras da rede. Assim sendo, a tensão de referência usada é a própria da barra em que a carga será instalada e os afundamentos de tensão são classificados com base nos resultados da Equação (62). Observa-se que, neste caso, a classificação das possíveis variações de tensão a curta duração também dependem da comparação entre as tensões das Etapas 1 e 2.

Após o cálculo dos índices de QEE o algoritmo fornece resultados que permite analisar e definir a possibilidade de instalação da nova carga na barra de interesse da rede.

O fluxograma apresentado na Figura 23 mostra com maiores detalhes a estrutura do algoritmo desenvolvido para simulação e análise dos impactos da instalação de novas cargas especiais nas redes de distribuição secundárias.

Figura 23 - Fluxograma do algoritmo de simulação e análise proposto



Fonte: o próprio autor

5 TESTES, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresentam-se os testes de validação das metodologias de modelagem propostas para as cargas especiais estudadas e os resultados das simulações realizadas com algoritmo desenvolvido para análise dos impactos do funcionamento destas cargas em redes secundárias. O algoritmo de simulação e análise foi implementado em linguagem computacional C/C++ e todos os testes e simulações realizados em um computador Intel Core 2 Duo 2.0 GHz 3GB de RAM.

5.1 TESTES DE VALIDAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE MODELAGEM PROPOSTAS

Testes de validação são necessários e fundamentais para comprovação e aceitação de novas ideias e/ou metodologias. Neste trabalho, os testes de validação consistem na comparação entre os modelos obtidos através das modelagens propostas e os modelos clássicos (literatura) de um determinado estágio de funcionamento das cargas especiais estudadas. Conforme apresentado anteriormente, propõe-se metodologia para modelagens em potência constante mais coerente e precisa da partida de MIT e do curto-circuito de MSA-CC/CV.

Para realização dos testes de validação das metodologias de modelagem propostas são utilizados os dados reais de MIT's de 5 cv e 20 cv (dados de placa e parâmetros do circuito equivalente em regime permanente), de uma MSA-CC de 250 A monofásica (dados de placa) e de uma MSA-CV de 250 A trifásica (dados de placa). Os parâmetros do circuito equivalente em regime permanente dos motores são utilizados para obtenção de seus fatores de potência de partida. A seguir estão apresentados os resultados da modelagem em potência constante dos referidos estágios de funcionamento de cada uma destas cargas usando a modelagem clássica e as modelagens propostas, assim como os testes para validação das mesmas.

a) Modelagem da Partida Desequilibrada dos MIT's de 5 cv e 20 cv

Na Tabela 11 estão apresentados os dados necessários para construção do modelo de otimização da metodologia proposta para modelagem em potência constante da partida desequilibrada dos MIT's de 5 cv e 20 cv, além dos parâmetros de controle do AG.

Tabela 11 - Dados dos MIT's de 5 cv e 20 cv e parâmetros de controle do AG

Dados do MIT de 5 cv					
V_N (V)	ω (rad/s)	I_p (A)	$\cos \phi_p$	I_N (A)	$\cos \phi_N$
220 (Y)	377	44,8	0,32	14,2	0,74
Dados do MIT de 20 cv					
V_N (V)	ω (rad/s)	I_p (A)	$\cos \phi_p$	I_N (A)	$\cos \phi_N$
220 (Δ)	377	182,3	0,31	33,9	0,88
Parâmetros de Controle do AG					
n	T_{inc}	T_{max}	k	T_R (%)	T_m (%)
50	50	600	2	25	5

Fonte: o próprio autor

Para a solução do modelo de otimização do MIT de 5 cv foram necessários 0,645 segundos de processamento e de 126 gerações do AG. Já para o MIT de 20 cv foram necessários 1,003 segundos e 254 gerações do AG. Nas Tabelas 12 e 13 estão apresentados os resultados de cada etapa da metodologia proposta para modelagem em potência constante da partida desequilibrada dos MIT's de 5 cv e 20 cv, respectivamente.

Tabela 12 - Resultados obtidos na modelagem da partida desequilibrada do MIT de 5 cv

1. Parâmetros Obtidos na Melhor Proposta de Solução do AG					
v	$\bar{X} = \left[R(\Omega), l(mH) \right]^T$	μ_1	μ_2	$F(\mu)$	
39	$[0,91273; 0,00717]^T$	0,99999	0,99953	0,99976	
2. Correntes da Partida Desequilibrada					
I_{p1}^{mod} (A)		I_{p2}^{mod} (A)		I_{p3}^{mod} (A)	
45,2		67,3		72,2	
3. Equacionamento do Modelo em Potência Constante da Partida Desequilibrada					
S_{p1} (VA)		S_{p2} (VA)		S_{p3} (VA)	
5740		8547		9169	
P_{p1} (W)	Q_{p1} (VAr)	P_{p2} (W)	Q_{p2} (VAr)	P_{p3} (W)	Q_{p3} (VAr)
1837	5438	2735	8097	2934	8687

P_{p1} , P_{p2} e P_{p3} são as potências ativas solicitadas em cada fase do MIT na partida desequilibrada.

Q_{p1} , Q_{p2} e Q_{p3} são as potências reativas solicitadas em cada fase do MIT na partida desequilibrada.

Fonte: o próprio autor

Tabela 13 - Resultados obtidos na modelagem da partida desequilibrada do MIT de 20 cv

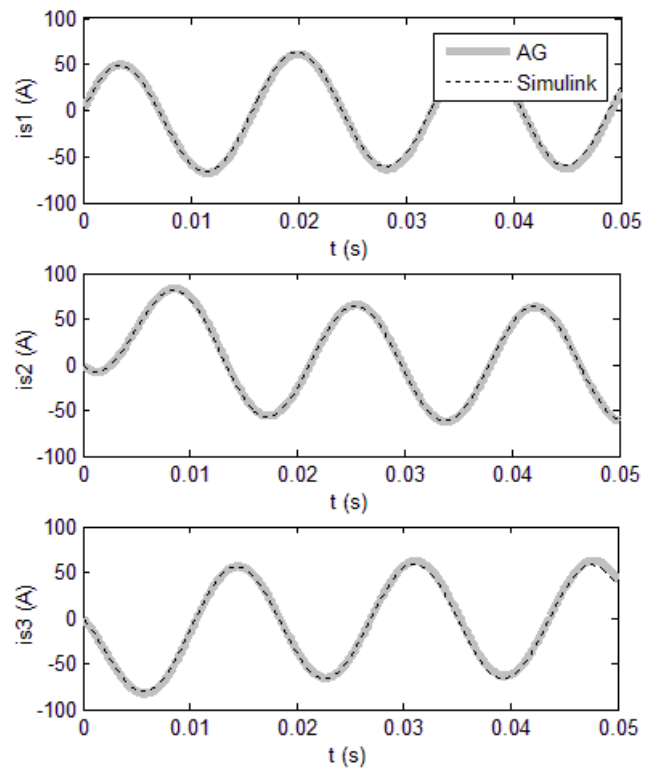
1. Parâmetros Obtidos na Melhor Proposta de Solução do AG					
v	$\bar{X} = \left[R(\Omega), l(mH) \right]^T$	μ_1	μ_2	$F(\mu)$	
46	$[0,376563; 3,063417]^T$	0,999999	0,999365	0,999682	
2. Correntes da Partida Desequilibrada					
I_{p1}^{mod} (A)		I_{p2}^{mod} (A)		I_{p3}^{mod} (A)	
183,8		272,5		293,4	
3. Equacionamento do Modelo em Potência Constante da Partida Desequilibrada					
S_{p1} (VA)		S_{p2} (VA)		S_{p3} (VA)	
23342		34607		37262	
P_{p1} (W)	Q_{p1} (VAr)	P_{p2} (W)	Q_{p2} (VAr)	P_{p3} (W)	Q_{p3} (VAr)
7236	22192	10728	32902	11551	35426

Fonte: o próprio autor

Os resultados de corrente e potência de partida em cada fase dos MIT's, conforme apresentado nas tabelas, mostram claramente que a metodologia proposta contempla o desequilíbrio de partida verificado na prática. É importante ressaltar que a modelagem clássica da partida de motores de indução possui grande aceitação e consolidação acadêmica. Desta forma, é fundamental que os resultados da metodologia proposta sejam validados com a maior segurança possível.

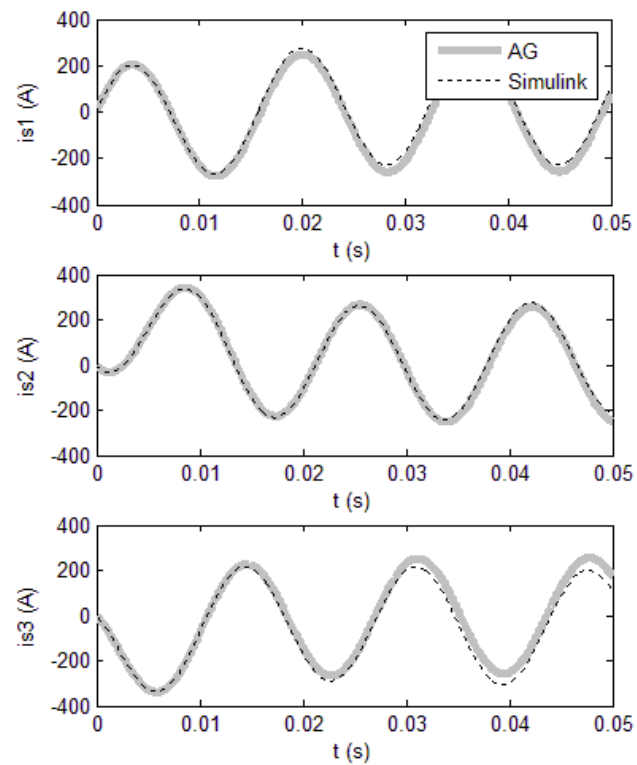
Os parâmetros R e l obtidos para cada motor e apresentados nas tabelas acima permitem avaliar o comportamento das correntes de cada fase dos motores no transitório elétrico de partida, conforme apresentado no Capítulo 3. Para uma melhor avaliação da precisão destes parâmetros, as correntes transitórias de cada um destes motores são comparadas com as obtidas para os mesmos na plataforma *Simulink*TM/*MatLab*[®] (SILVA, 2007). É importante ressaltar que os modelos disponibilizados por esta plataforma permitem analisar com excelente precisão e confiabilidade o comportamento e as solicitações reais de motores de indução. Nas Figuras 24 e 25 são ilustradas estas comparações e/ou testes de validação da metodologia proposta para os motores de 5 e 20 cv, respectivamente.

Figura 24 - Teste de validação da modelagem proposta para a partida desequilibrada do MIT de 5 cv



Fonte: o próprio autor

Figura 25 - Teste de validação da modelagem proposta para a partida desequilibrada do MIT de 20 cv



Fonte: o próprio autor

Nota-se que todas as correntes calculadas usando os parâmetros obtidos a partir da metodologia proposta são praticamente as mesmas obtidas na plataforma *Simulink*, deixando evidentes a precisão e robustez da metodologia proposta com relação ao comportamento real da partida de motores trifásicos.

Na modelagem clássica da partida de motores trifásicos, basicamente, a potência total de partida é dividida igualmente entre suas três fases. O mesmo não ocorre com modelagem proposta para a partida desequilibrada. Na Tabela 14 compara-se a modelagem clássica da partida dos MIT's de 5 e 20 cv com a modelagem obtida a partir da metodologia proposta.

Tabela 14 - Comparação entre as modelagens clássica e proposta para os MIT's de 5 e 20 cv

MIT de 5 cv			
Potência	Modelo Clássico (VA)	Modelo Proposto (VA)	Erro Relativo (%)
Fase 1	5689	5740	0,89
Fase 2	5689	8547	50,24
Fase 3	5689	9169	61,17
Total	17067	23456	37,43
MIT de 20 cv			
Potência	Modelo Clássico (VA)	Modelo Proposto (VA)	Erro Relativo (%)
Fase 1	23152	23342	0,82
Fase 2	23152	34607	49,48
Fase 3	23152	37262	60,94
Total	69456	95211	37,08

Fonte: o próprio autor

b) Modelagem do Curto-Circuito das MSA/CC-CV de 250 A

Na Tabela 15 estão apresentados os dados de placa necessários para utilização da metodologia proposta na modelagem em potência constante do curto-circuito das MSA-CC/CV de 250 A reais em um ponto de operação específico.

Tabela 15 - Dados de placa das MSA-CC/CV de 250 A

MSA-CC (NM 250 Turbo – Transformadora – Monofásica)					
V_G (V)	$\cos \phi_A$	I_{LA} (A)	I_A (A)	v_E (V)	v_A (V)
220	0,70	32,5	250	50	20
MSA-CV (Mega Plus 250 – MIG/MAG – Trifásica)					
V_G (V)	$\cos \phi_A$	I_{LA} (A)	I_A (A)	v_E (V)	v_A (V)
220	0,95	25	250	37	29

Fonte: o próprio autor

Na Tabela 16 apresentam-se os resultados obtidos em cada etapa da metodologia proposta para modelagem do curto-circuito destas máquinas.

Tabela 16 - Resultados obtidos na modelagem do curto-circuito das MSA-CC/CV de 250 A

MSA-CC		MSA-CV	
1. Corrente de Curto-Circuito Estimada			
I_{SC} (A)		I_{SC} (A)	
323		1156	
2. Fator de Potência de Curto-Circuito Estimado			
$\cos \phi_{SC}$		$\cos \phi_{SC}$	
0,50		0,77	
3. Equacionamento do Modelo em Potência Constante de Curto-Circuito			
S_{SC} (VA)		S_{SC} (VA)	
9238		44050	
P_{SC} (W)	Q_{SC} (VAr)	P_{SC} (W)	Q_{SC} (VAr)
4619	8000	33919	28106

P_{SC} é a potência ativa total solicitada pela MSA no curto-circuito.

Q_{SC} é a potência reativa total solicitada pela MSA no curto-circuito.

Fonte: o próprio autor

Observa-se através dos resultados apresentados na tabela acima que o comportamento real da corrente de curto-circuito de cada fonte de solda é contemplado pela metodologia de modelagem proposta. É importante destacar que a modelagem clássica destas máquinas não apresenta embasamento teórico algum e, portanto, a metodologia proposta pode ser validada pelo fato de contemplar o comportamento estático real de cada tipo de fonte de solda. Conforme já descrito anteriormente, na modelagem clássica se adota que a potência de curto-

circuito é o dobro da potência de soldagem no ponto de operação desejado. Na Tabela 17 os modelos obtidos para o curto-circuito das MSA-CC/CV de 250 A através da metodologia proposta são comparados com seus modelos clássicos.

Tabela 17 - Comparação das modelagens proposta e clássica para o curto-circuito das MSA-CC/CV de 250 A

MSA	Modelo Clássico (VA)	Modelo Proposto (VA)	Erro Relativo (%)
CC	14300	9238	35,40
CV	19050	44050	131,23

Fonte: o próprio autor

5.2 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS CARGAS ESPECIAIS NA REDE

Para simulação dos impactos do funcionamento das cargas especiais estudadas utiliza-se uma rede trifásica secundária real de distribuição de energia elétrica 220/127 V desequilibrada. Esta rede é composta por um total de 86 barras, das quais 38 são unidades consumidoras (UC's), e seus dados elétricos e topológicos estão apresentados no Anexo I.

Para fins de elucidação da utilização do algoritmo desenvolvido e das modelagens propostas, consideram-se dois estudos de caso para avaliação da possibilidade de instalação de novos consumidores de característica industrial na barra 27 da rede teste.

Inicialmente, os consumidores contatam a concessionária para dar início ao processo de permissão de instalação e informam as cargas especiais (dados de placa) que desejam instalar na barra de interesse. A concessionária, por sua vez, irá avaliar os impactos que o funcionamento que as novas cargas irão provocar na rede usando uma ferramenta computacional específica (algoritmo desenvolvido). Lembrando que o algoritmo usa as informações fornecidas pelo usuário para calcular a potência de cada estágio de funcionamento da carga. Então, os resultados da análise permitirão que a concessionária defina a possibilidade de instalação destas novas cargas especiais na rede.

Adota-se em todas as simulações que o número máximo de acionamentos das cargas da instalação provoca 0,02 oscilações por minuto na rede. Desta forma, a máxima flutuação/afundamento de tensão admissível é de 5,0%. A análise deste índice, em especial, define a possibilidade de instalação da carga na barra de interesse, uma vez que ele tem relação direta com o nível de conforto dos consumidores da rede.

Conforme já visto anteriormente, as possíveis variações de tensão de curta duração provocadas na rede com o acionamento de cargas especiais são geralmente classificadas como afundamentos momentâneos de tensão (AMT) e, neste trabalho, são classificadas através da análise da máxima flutuação de tensão. Assim, de acordo com a Tabela 9, classifica-se como afundamentos momentâneos de tensão as flutuações superiores a 10%. A tensão em regime permanente é classificada através da Tabela 1. Os desequilíbrios máximos de tensão de cada etapa do cálculo do fluxo de potência também são apresentados nos resultados.

Nas simulações dos dois estudos de caso são utilizadas a modelagem clássica e as modelagens propostas para as cargas especiais estudadas, de forma que seja possível observar a influência da consideração do comportamento real das mesmas na tomada de decisões no processo de permissão de instalação de novos consumidores na rede. Além disso, considera-se o pior caso possível de simulação, em que todas as cargas são acionadas e também ficam ligadas simultaneamente.

A seguir estão descritos e apresentados os resultados obtidos na simulação dos dois estudos de caso realizados.

5.2.1 ESTUDO DE CASO 1

Neste primeiro estudo de caso considera-se que um dos consumidores solicitou a verificação da possibilidade de instalação na barra de interesse de três das cargas especiais modeladas anteriormente no teste de validação, ou seja: um MIT de 5 cv (partida direta), uma MSA-CC de 250 A e uma MSA-CV de 250 A.

Ele também informou ao atendente que a finalidade de sua instalação industrial depende de quais destas cargas terão permissão para serem instaladas na barra de interesse e que ele está ciente que poderá instalar somente as cargas que a concessionária permitir. Assim sendo, o atendente optou por analisar todas as sete possibilidades de combinação entre as três cargas do consumidor, de modo que sejam definidas quais as combinações permitidas ou não.

A seguir estão apresentados os resultados obtidos na simulação de cada uma das sete possibilidades de combinação entre as cargas do consumidor:

a) Combinação 1:

Neste caso, considera-se que apenas o MIT de 5 cv é instalado na barra de interesse. Desta forma, têm-se os seguintes resultados:

Tabela 18 - Resultados da simulação da combinação 1

Tensão em Regime Permanente	Etapa	Número de Barras Por Nível de Tensão		
		Adequada	Precária	Crítica
	1	76	10	0
	3	76	10	0
Máxima Flutuação de Tensão	Etapa	ΔV_{1-2} (%)		
		Modelagem Clássica	Modelagem Proposta	
	1-2	2,99	3,65	
		Classificação como Variação de Tensão a Curta Duração		
		-	-	
Máximo Desequilíbrio de Tensão	Etapa	FD (%)		
	1	0,17		
	2	Modelagem Clássica	Modelagem Proposta	
		0,18	0,68	
	3	0,18		

Fonte: o próprio autor

Analisando os resultados da tabela acima se pode concluir que a carga pode ser instalada na barra de interesse, pois o limite máximo de flutuação de tensão não é excedido mesmo analisando a partida desequilibrada. No entanto, observa-se claramente que os impactos da partida desequilibrada (modelagem proposta) são significativamente maiores que os da partida equilibrada (modelagem clássica).

b) Combinação 2:

Neste caso, considera-se que apenas a MSA-CC de 250 A (monofásica) é instalada nas fases *a* e *b* ou 1 e 2 da barra de interesse. Desta forma, têm-se os seguintes resultados:

Tabela 19 - Resultados da simulação da combinação 2

Tensão em Regime Permanente	Etapa	Número de Barras Por Nível de Tensão		
		Adequada	Precária	Crítica
	1	76	10	0
	3	76	10	0
Máxima Flutuação de Tensão	Etapa	ΔV_{1-2} (%)		
		Modelagem Clássica	Modelagem Proposta	
	1-2	2,42	1,75	
		Classificação como Variação de Tensão a Curta Duração		
		-	-	
Máximo Desequilíbrio de Tensão	Etapa	FD (%)		
	1	0,17		
	2	Modelagem Clássica	Modelagem Proposta	
		1,41	0,88	
	3	0,73		

Fonte: o próprio autor

Neste caso, nota-se que a carga também pode ser instalada na barra de interesse.

c) Combinação 3:

Neste caso, considera-se que apenas a MSA-CV de 250 A (trifásica) é instalada na barra de interesse. Desta forma, têm-se os seguintes resultados:

Tabela 20 - Resultados da simulação da combinação 3

Tabela 10 - Resultados da Simulação da Condição 3				
Tensão em Regime Permanente	Etapa	Número de Barras Por Nível de Tensão		
		Adequada	Precária	Crítica
	1	76	10	0
	3	76	10	0
Máxima Flutuação de Tensão	Etapa	ΔV_{1-2} (%)		
		Modelagem Clássica		Modelagem Proposta
	1-2	3,24		7,63
		Classificação como Variação de Tensão a Curta Duração		
		-		-
Máximo Desequilíbrio de Tensão	Etapa	FD (%)		
	1	0,17		
	2	Modelagem Clássica		Modelagem Proposta
		0,20		0,30
	3	0,20		

Fonte: o próprio autor

Os resultados acima permitem duas conclusões sobre a possibilidade de instalação da carga na barra de interesse. Se a análise for efetuada através dos resultados obtidos com a modelagem clássica, conclui-se que a carga pode ser instalada na barra de interesse. Por outro lado, os resultados obtidos com a modelagem proposta permitem concluir que a carga não pode ser instalada na barra de interesse, pois o limite máximo de flutuação de tensão é excedido. Isto mostra claramente que a precisão e coerência da modelagem influencia diretamente na tomada de decisões, podendo levar a erros que poderiam ser evitados.

d) Combinação 4:

Neste caso, considera-se que o MIT de 5 cv e a MSA-CC de 250 A (monofásica) são instalados na barra de interesse, sendo que a MSA-CC é instalada nas fases *a* e *b* ou 1 e 2 da rede. Desta forma, têm-se os seguintes resultados:

Tabela 21 - Resultados da simulação da combinação 4

Tensão em Regime Permanente	Etapa	Número de Barras Por Nível de Tensão		
		Adequada	Precária	Crítica
	1	76	10	0
	3	76	10	0
Máxima Flutuação de Tensão	Etapa	ΔV_{1-2} (%)		
		Modelagem Clássica	Modelagem Proposta	
	1-2	5,53	5,50	
		Classificação como Variação de Tensão a Curta Duração		
		-	-	
Máximo Desequilíbrio de Tensão	Etapa	FD (%)		
		1	0,17	
	2	Modelagem Clássica	Modelagem Proposta	
		1,56	1,03	
	3	0,77		

Fonte: o próprio autor

Nota-se que neste caso as cargas também não podem ser instaladas na barra de interesse, pois o limite máximo de oscilação de tensão aceitável foi violado em nenhum das simulações realizadas.

e) Combinação 5:

Neste caso, considera-se que o MIT de 5 cv e a MSA-CV de 250 A (trifásica) são instalados na barra de interesse. Desta forma, têm-se os seguintes resultados:

Tabela 22 - Resultados da simulação da combinação 5

Tensão em Regime Permanente	Etapa	Número de Barras Por Nível de Tensão		
		Adequada	Precária	Crítica
	1	76	10	0
	3	76	10	0
Máxima Flutuação de Tensão	Etapa	ΔV_{1-2} (%)		
		Modelagem Clássica	Modelagem Proposta	
	1-2	6,45	12,03	
		Classificação como Variação de Tensão a Curta Duração		
		-	AMT	
Máximo Desequilíbrio de Tensão	Etapa	FD (%)		
	1	0,17		
	2	Modelagem Clássica	Modelagem Proposta	
		0,23	0,81	
	3	0,21		

Fonte: o próprio autor

Analisando os resultados da tabela acima se conclui que as cargas não podem ser instaladas na barra de interesse, pois o limite máximo de flutuação de tensão é excedido tanto na simulação do curto-circuito com a modelagem clássica quanto com a modelagem proposta.

f) Combinação 6:

Neste caso, considera-se que as MSA-CC/CV de 250 A são instaladas na barra de interesse, sendo que a MSA-CC (monofásica) é instalada nas fases *a* e *b* ou 1 e 2. Desta forma, têm-se os seguintes resultados:

Tabela 23 - Resultados da simulação da combinação 6

Tabela 25 – Resultados da simulação da combinação 6				
Tensão em Regime Permanente	Etapa	Número de Barras Por Nível de Tensão		
		Adequada	Precária	Crítica
	1	76	10	0
	3	76	10	0
Máxima Flutuação de Tensão	Etapa	ΔV_{1-2} (%)		
		Modelagem Clássica		Modelagem Proposta
	1-2	5,83		9,67
		Classificação como Variação de Tensão a Curta Duração		
		-		-
Máximo Desequilíbrio de Tensão	Etapa	FD (%)		
	1	0,17		
	2	Modelagem Clássica		Modelagem Proposta
		1,59		1,23
	3	0,79		

Fonte: o próprio autor

Neste caso, observa-se que as cargas não podem ser instaladas na barra de interesse.

g) Combinação 7:

Neste caso, considera-se que o MIT de 5 cv e as MSA-CC/CV de 250 A são instalados na barra de interesse. A MSA-CC (monofásica) é instalada nas fases *a* e *b* ou 1 e 2. Assim:

Tabela 24 - Resultados da simulação da combinação 7

Tensão em Regime Permanente	Etapa	Número de Barras Por Nível de Tensão		
		Adequada	Precária	Crítica
	1	76	10	0
	3	76	10	0
Máxima Flutuação de Tensão	Etapa	ΔV_{1-2} (%)		
		Modelagem Clássica		Modelagem Proposta
	1-2	9,19		14,25
		Classificação como Variação de Tensão a Curta Duração		
		-		AMT
Máximo Desequilíbrio de Tensão	Etapa	FD (%)		
	1	0,17		
	2	Modelagem Clássica		Modelagem Proposta
		1,78		1,43
	3	0,82		

Fonte: o próprio autor

Analisando os resultados apresentados na tabela acima também se conclui que as cargas não podem ser instaladas na barra de interesse, pois o limite de flutuação de tensão é excedido na simulação do curto-circuito tanto com a modelagem clássica quanto com a modelagem proposta.

5.2.1.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise de cada uma das sete combinações possíveis deixa evidente que nem todas as cargas do consumidor interessado podem ser instaladas na barra de interesse da rede existente, ou seja, são permitidas apenas as combinações 1 e 2. Os resultados deste estudo de caso estão resumidos na Tabela 25.

Tabela 25 - Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 1

Combinação	MIT 5 cv	MSA-CC 250 A	MSA-CV 250 A	Permissão de Instalação
1	•			SIM
2		•		SIM
3			•	NÃO
4	•	•		NÃO
5	•		•	NÃO
6		•	•	NÃO
7	•	•	•	NÃO

Fonte: o próprio autor

No entanto, é obrigação da concessionária, de alguma forma, atender ao consumidor interessado. Assim sendo, para não inviabilizar as atividades deste consumidor, a concessionária deve providenciar uma solução para o problema. Por exemplo, ela pode instalar um transformador de distribuição exclusivo para atendê-lo. É importante ressaltar que a análise destas sete combinações foi feita apenas no estudo de caso elucidado neste trabalho, pois na prática as concessionárias não têm responsabilidade de fazer este tipo de análise e sim de verificar apenas a possibilidade de instalação do conjunto de cargas informadas na rede existente e, caso não seja possível, encontrar uma alternativa para não deixar de fornecer energia ao consumidor.

Dentre todas as simulações realizadas para cada um dos sete casos analisados, retirando o tempo de coleta dos dados de placa das cargas, o tempo máximo de processamento do algoritmo foi de 2,058 segundos. O tempo de coleta dos dados de placa também é bastante

reduzido devido à rapidez e objetividade da interface fornecida ao usuário pelo algoritmo desenvolvido. Desta forma, o usuário pode coletar os dados já no primeiro atendimento ao consumidor interessado e, em poucos segundos, dar-lhe a resposta sobre a possibilidade de instalação de suas cargas na rede.

Observou-se também que a tensão em regime das barras da rede não é deteriorada em nenhuma combinação analisadas. Apenas a flutuação e o desequilíbrio de tensão são afetados de forma significativa com o funcionamento destas cargas na rede.

5.2.2 ESTUDO DE CASO 2

Neste segundo estudo de caso considera-se que o outro consumidor solicitou a verificação da possibilidade de instalação de um MIT de 20 cv na barra de interesse. O atendente, por sua vez, já antecipou ao consumidor que a própria norma da concessionária não permite a instalação de motores de potência maior do que 5 cv em partida direta nas redes de baixa tensão (CPFL, 2000b; REDE ENERGIA, 2008). No entanto, o atendente irá analisar e orientar o consumidor para a instalação do MIT com algum dispositivo de redução das solicitações de partida para motores trifásicos, de modo que a instalação do motor na barra de interesse seja permitida pela concessionária.

O atendente se prontificou a analisar a viabilidade de todas as cinco técnicas de partida encontradas na literatura, ou seja: (a) Partida Direta, (b) Chave Estrela-Triângulo, (c) Chave Compensadora, (d) Chave Série/Paralelo e (e) *Soft-Starter* e Inversor de Frequência.

A seguir estão apresentados os resultados obtidos na simulação da viabilidade de instalação do motor na barra de interesse considerando a utilização de cada uma das técnicas de redução de partida apresentadas anteriormente:

a) *Partida Direta:*

Neste caso, considera-se que o MIT de 20 cv seja instalado na barra de interesse sem nenhum dispositivo de redução de partida, ou seja, em partida direta. Desta forma, têm-se os seguintes resultados:

Tabela 26 - Resultados da simulação do motor em partida direta

Tensão em Regime Permanente	Etapa	Número de Barras Por Nível de Tensão		
		Adequada	Precária	Crítica
	1	76	10	0
	3	76	10	0
Máxima Flutuação de Tensão	Etapa	ΔV_{1-2} (%)		
		Modelagem Clássica		Modelagem Proposta
	1-2	13,73		18,05
		Classificação como Variação de Tensão a Curta Duração		
		AMT		AMT
Máximo Desequilíbrio de Tensão	Etapa	FD (%)		
	1	0,17		
	2	Modelagem Clássica		Modelagem Proposta
		0,34		3,18
	3	0,20		

Fonte: o próprio autor

Os resultados apresentados na tabela acima mostram que o motor realmente não pode ser instalado na barra de interesse em partida direta, pois o limite máximo de oscilação de tensão aceitável é violado em ambas as modelagens, clássica e proposta. Além disso, estes resultados justificam as exigências das normas de concessionárias com relação à proibição de instalação de motores de grande porte em partida direta nas redes de distribuição de baixa tensão.

b) Chave Estrela-Triângulo:

Neste caso, considera-se que o MIT de 20 cv seja instalado na barra de interesse com a utilização de uma chave estrela-triângulo. Desta forma, têm-se os seguintes resultados:

Tabela 27 - Resultados da simulação do motor com chave estrela-triângulo

Tensão em Regime Permanente	Etapa	Número de Barras Por Nível de Tensão		
		Adequada	Precária	Crítica
	1	76	10	0
	3	76	10	0
Máxima Flutuação de Tensão	Etapa	ΔV_{1-2} (%)		
		Modelagem Clássica	Modelagem Proposta	
	1-2	4,11	5,00	
		Classificação como Variação de Tensão a Curta Duração		
		-	-	
Máximo Desequilíbrio de Tensão	Etapa	FD (%)		
	1	0,17		
	2	Modelagem Clássica	Modelagem Proposta	
		0,19	1,43	
	3	0,20		

Fonte: o próprio autor

Neste caso, o uso da chave estrela-triângulo viabiliza a instalação do motor.

c) Chave Compensadora:

Neste caso, considera-se que o MIT de 20 cv seja instalado na barra de interesse com a utilização de uma chave compensadora com regulação de tensão $k = 80\%$. Assim:

Tabela 28 - Resultados da simulação do motor com chave compensadora

Tensão em Regime Permanente	Etapa	Número de Barras Por Nível de Tensão		
		Adequada	Precária	Crítica
	1	76	10	0
	3	76	10	0
Máxima Flutuação de Tensão	Etapa	ΔV_{1-2} (%)		
		Modelagem Clássica		Modelagem Proposta
	1-2	3,05		3,70
		Classificação como Variação de Tensão a Curta Duração		
		-		-
Máximo Desequilíbrio de Tensão	Etapa	FD (%)		
	1	0,17		
	2	Modelagem Clássica		Modelagem Proposta
		0,18		0,69
	3	0,20		

Fonte: o próprio autor

Neste caso, nota-se também que a utilização da chave compensadora viabiliza a instalação do motor na barra de interesse.

d) Chave Série/Paralelo:

Neste caso, considera-se que o MIT de 20 cv seja instalado na barra de interesse com a utilização de uma chave série/paralelo. Desta forma, têm-se os seguintes resultados:

Tabela 29 - Resultados da simulação do motor com chave série/paralelo

Tensão em Regime Permanente	Etapa	Número de Barras Por Nível de Tensão		
		Adequada	Precária	Crítica
	1	76	10	0
	3	76	10	0
Máxima Flutuação de Tensão	Etapa	ΔV_{1-2} (%)		
		Modelagem Clássica		Modelagem Proposta
	1-2	3,05		3,70
		Classificação como Variação de Tensão a Curta Duração		
		-		-
Máximo Desequilíbrio de Tensão	Etapa	FD (%)		
	1	0,17		
	2	Modelagem Clássica		Modelagem Proposta
		0,18		0,69
	3	0,20		

Fonte: o próprio autor

Os resultados mostram que a utilização da chave série/paralelo viabiliza a instalação do motor na barra de interesse, pois o limite máximo de oscilação de tensão não foi violado em nenhum dos casos de simulação.

e) Soft-Starter e Inversor de Frequência:

Neste caso, considera-se que o MIT de 20 cv seja instalado na barra de interesse com a utilização de um *soft-starter* ou de um inversor de frequência com tensão de partida em 30% da nominal ($k = 30\%$). Assim:

Tabela 30 - Resultados da simulação do motor com *soft-starter* e inversor de frequência

Tensão em Regime Permanente	Etapa	Número de Barras Por Nível de Tensão		
		Adequada	Precária	Crítica
	1	76	10	0
	3	76	10	0

Máxima Flutuação de Tensão	Etapa	ΔV_{1-2} (%)	
		Modelagem Clássica	Modelagem Proposta
	1-2	1,07	1,29
		Classificação como Variação de Tensão a Curta Duração	
		-	-

Máximo Desequilíbrio de Tensão	Etapa	FD (%)	
		0,17	
	2	Modelagem Clássica	Modelagem Proposta
		0,17	0,34
		0,20	

Fonte: o próprio autor

Estes resultados mostram que a utilização da chave de um *soft-starter* ou um inversor de frequência com redução da tensão de partida para 30% da nominal também viabiliza a instalação do motor na barra de interesse.

5.2.2.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise de cada uma das cinco técnicas de partida deixou evidente que MIT's de potência elevada não devem ser ligados em partida direta nas redes de distribuição de BT existente, mas que a utilização de técnicas de redução de partida torna esta ligação viável. Os resultados obtidos neste estudo de caso estão resumidos através da Tabela 31.

Tabela 31 - Resumo dos resultados obtidos no estudo de caso 2

Partida	Ajuste	Permissão de Instalação
Direta	-	NÃO
Chave Estrela-Triângulo	-	SIM
Chave Compensadora	50%	SIM
Chave Série-Paralelo	-	SIM
Soft-Starter e Inversor de Frequência	30%	SIM

Fonte: o próprio autor

Os resultados mostram também que as técnicas de redução de partida podem ser utilizadas juntamente com a modelagem proposta para a partida desequilibrada de motores trifásicos sem quaisquer problemas. O desequilíbrio observado nos resultados obtidos com a modelagem proposta fica bastante evidente na comparação com os resultados provenientes da modelagem clássica.

Dentre todas as simulações realizadas para cada uma das cinco técnicas de partida analisadas, retirando o tempo de coleta dos dados de placa das cargas, o tempo máximo de processamento do algoritmo foi de 1,545 segundos. Pelo fato do tempo de coleta ser bastante reduzido por mérito da interface fornecida ao usuário, é possível analisar e orientar o consumidor em poucos segundos sobre as técnicas de partida que viabilizam a instalação de seu motor na barra de interesse da rede existente. Neste caso, a orientação para utilização de técnicas de redução de partida em motores de elevado porte é comumente realizada pelas concessionárias.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho baseou-se no desenvolvimento de um algoritmo para simulação e avaliação dos impactos provocados por cargas especiais na qualidade da energia elétrica de redes de distribuição secundárias, visando aumentar a rapidez e precisão do processo de permissão da instalação de novos consumidores de característica industrial na rede. As cargas especiais estudadas foram: Motores de Indução e Máquinas de Soldagem a Arco.

Foi proposta metodologia para modelagem em potência constante da partida desequilibrada de motores de indução trifásicos e do curto-circuito de máquinas de soldagem a arco, uma vez que os modelos encontrados na literatura não contemplam algumas particularidades do comportamento real destas máquinas. Os resultados dos testes de validação mostraram que as modelagens propostas apresentaram boa precisão e coerência com relação ao comportamento real esperado de cada máquina e, principalmente, com relação aos modelos clássicos da literatura. Além disso, a grande vantagem destas metodologias é que elas também necessitam apenas das informações geralmente fornecidas ou obtidas na placa das cargas especiais.

Os resultados obtidos nos dois estudos de caso mostraram a importância da análise prévia da instalação de novos consumidores de característica industrial em redes secundárias, visto os impactos que o funcionamento das cargas especiais podem provocar na qualidade da energia fornecida. O fato é que as flutuações de tensão causadas pelo acionamento destas cargas estão diretamente relacionadas com o nível de conforto dos demais consumidores da rede. Observa-se também que a utilização das modelagens propostas geram resultados distintos com relação à modelagem clássica, podendo mudar o curso de uma decisão no processo de permissão da instalação de novos consumidores na rede. Isto mostra claramente a importância de sua utilização.

A objetividade da interface criada para coleta de dados e a rapidez das simulações faz com que o tempo de análise e resposta da permissão de instalação de uma nova carga na rede seja praticamente imediato, permitindo até mesmo que a análise seja realizada em tempo real com o consumidor. Além disso, o planejamento da instalação de novos consumidores na rede ajuda a evitar a deterioração da qualidade da energia fornecida que, por sua vez, reflete na transmissão de uma imagem positiva das concessionárias perante os consumidores.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Adaptar as modelagens propostas para analisar comportamento dinâmico de MSA e de todo o processo de partida dos MIT's, de modo que seja possível um estudo mais detalhado e preciso do fenômeno *flicker* causado na rede.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5457: máquinas girantes**. Rio de Janeiro, 1980.

ANDERSON, P. M. **Power system protection**. New York: IEEE Press Series on Power Engineering, 1995. 513 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Módulo 1: introdução. In: _____. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST**. Brasília: ANEEL, 2012a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Módulo 2: planejamento da expansão. In: _____. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST**. Brasília: ANEEL, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Módulo 8: qualidade da energia elétrica. In: _____. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST**. Brasília: ANEEL, 2012b.

BAGGINI, A. **Handbook of power quality**. Chichester: John Wiley and Sons, 2008. 642 p.

BARBI, I. **Teoria fundamental do motor de indução**. Florianópolis: UFSC, 1985. 237 p.

BERNARDES, R.; AYELLO, F. **Sistema de monitoramento da qualidade de energia elétrica**. Lugar de Publicação: 2008. (Trabalho, PCIC BR 2008-12).

CARY, H. B. **Modern welding technology**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 780 p.

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA - CEFET. **Acionamentos elétricos**. Rio de Janeiro: Centro Federal de Ensino Tecnológico Celso Suckow da Fonseca, 2005. (Apostila).

CHENG, C. S.; SHIRMOHAMMADI, D. A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 10, n. 2, 1995.

COSSI, M. A. **Planejamento de circuitos secundários de distribuição usando algoritmo evolutivo especializado**. 2003. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2003.

COSSI, M. A. **Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão**. 2008. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2008.

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ - CPFL. **Critério para atendimento a aparelho de máquinas de solda**. Campinas: CPFL Setor de Distribuição de Energia Elétrica, 2000a. (Orientação Técnica).

COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ - CPFL. **Critério para atendimento a motores elétricos de indução**. Campinas: CPFL Setor de Distribuição de Energia Elétrica, 2000b. (Orientação Técnica).

Centrais Elétricas Brasileiras- ELETROBRÁS. **Controle de tensão de sistemas de distribuição**. Rio de Janeiro: Campus, 1985. v. 5, 144 p. (Coleção Distribuição de Energia Elétrica).

FITZGERALD, A. E. **Máquinas elétricas**. São Paulo: McGraw - Hill do Brasil, 1975. 321 p.

GOLDBERG, D. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. Boston: Addison-Wesley, 1989. 412 p.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 344 p.

KENNEDY, B. W. **Power quality contracts in a restructured competitive electricity industry**. Knoxville: Electrotek Concepts Harmonics And Quality of Power, 1998.

KOSOW, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 3. ed. Porto Alegre: Globo, 1979. 632 p.

KRAUSE, P. C. **Analysis of electric machinery**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1986. 564 p.

LABORATÓRIO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA - LAPSEE. **Rede de distribuição secundária real de 86 barras**. Ilha Solteira: UNESP, 2012. Disponível em:

<http://www.dee.feis.unesp.br/lapsee/interna_downloads_sistemastestes.php>. Acesso em: 17 maio 2012.

MAMEDE FILHO, J. Partida de motores elétricos de indução. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 7, n. 7, p. 61-65, 1986.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 930 p.

MATHIAS-NETO, W. P. **Restauração automática de redes de distribuição de energia elétrica de grande porte com geração distribuída**. 2011. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2011.

MEHL, E. L. M. **Qualidade da energia elétrica**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004. (Apostila).

MODENESI, P. J. **Fontes de energia para soldagem a arco**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. (Apostila).

PABLA, A. S. **Electric power distribution**. New York: McGraw-Hill, 2005. 878 p.

PEREIRA JUNIOR, B. R. **Alocação otimizada de bancos de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica através de metaheurísticas multiobjetivo**. 2009. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2009.

REDE ENERGIA. **Estudo para planejamento de novos consumidores industriais nas redes de distribuição de MT e BT**. Presidente Prudente: Rede Energia, Diretoria da Qualidade e Tecnologia da Informação, 2008.

REEVES, C. R. Genetic algorithms. In: GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. **Handbook of Metaheuristics**. Dordrecht: Kluwer, 2003. p. 55-82.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 3, n. 2, p. 753-762, 1988.

SHORT, T. A. **Electric power distribution handbook**. New York: CRC Press, 2004. 773 p.

SILVA, S. F. **Identificação de torque de carga em motores de indução usando abordagem baseada em sistemas fuzzy**. 2007. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2007.

SPEGGIORIN, F. P. **Instrumentação digital aplicada ao desenvolvimento de controladores para motores de indução**. 1998. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 1998.

WEMAN, K. **Welding processes handbook**. Sawston: Woodhead Publishing Limited, 2003. 193 p.

ANEXO I - TOPOLOGIA DA REDE SECUNDÁRIA REAL ANALISADA

Tabela 32 - Topologia da rede secundária real de distribuição de 86 barras (220/127 V)

Nó Inicial	Nó Final	Sa (W+jVAr)	Sb (W+jVAr)	Sc (W+jVAr)	Zaa=Zbb=Zcc (Ω)	Zab=Zbc=Zca (Ω)
1	2	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
64	3	438.72+j186.89	438.72+j186.89	438.72+j186.89	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
64	4	314.14+j133.82	314.14+j133.82	314.14+j133.82	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
54	5	410.28+j174.78	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
53	6	261.33+j111.33	261.33+j111.33	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
2	7	000.00+j000.00	480.69+j204.77	480.69+j204.77	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
55	8	475.28+j202.47	475.28+j202.47	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
35	9	000.00+j000.00	236.28+j100.66	236.28+j100.66	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
53	10	381.85+j162.67	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
45	11	83.95+j35.76	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
65	12	367.63+j156.61	367.63+j156.61	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
65	13	773.17+j329.37	773.17+j329.37	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
35	14	335.13+j142.77	335.13+j142.77	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
55	15	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
65	16	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
27	17	584.96+j249.19	584.96+j249.19	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
62	18	648.15+j276.11	648.15+j276.11	648.15+j276.11	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
26	19	180.77+j77.01	180.77+j77.01	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
2	20	000.00+j000.00	476.63+j203.04	476.63+j203.04	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
43	21	000.00+j000.00	453.61+j193.24	453.61+j193.24	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
65	22	000.00+j000.00	505.07+j215.16	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000

52	23	330.39+j140.75	330.39+j140.75	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
26	24	000.00+j000.00	305.34+j130.08	305.34+j130.08	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
26	25	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0313+j0.0297	0.0018+j0.0225
27	26	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0306+j0.0290	0.0018+j0.0220
28	29	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0434+j0.0412	0.0026+j0.0312
31	30	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0112+j0.0195	0.0012+j0.0152
30	32	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0144+j0.0252	0.0016+j0.0196
35	34	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0332+j0.0314	0.0020+j0.0238
36	35	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0346+j0.0328	0.0020+j0.0248
39	38	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
38	36	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0224+j0.0212	0.0013+j0.0110
38	37	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0062+j0.0059	0.0004+j0.0031
39	31	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0033+j0.0057	0.0004+j0.0031
33	39	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0090+j0.0158	0.0010+j0.0084
41	42	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0355+j0.0336	0.0021+j0.0255
42	43	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0339+j0.0321	0.0020+j0.0244
44	33	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0158+j0.0275	0.0018+j0.0214
47	46	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
46	27	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0190+j0.0180	0.0011+j0.0093
46	28	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0162+j0.0153	0.0009+j0.0079
47	44	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0091+j0.0158	0.0010+j0.0084
45	47	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0056+j0.0097	0.0006+j0.0052
2	45	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0103+j0.0179	0.0011+j0.0140
49	50	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
2	49	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0188+j0.0328	0.0021+j0.0256
49	48	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0027+j0.0047	0.0003+j0.0025

50	40	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0051+j0.0048	0.0003+j0.0025
50	41	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0146+j0.0138	0.0009+j0.0072
48	51	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0141+j0.0246	0.0016+j0.0192
51	52	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0132+j0.0231	0.0015+j0.0180
53	54	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0138+j0.0241	0.0015+j0.0188
54	55	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0166+j0.0290	0.0018+j0.0220
58	57	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0212+j0.0370	0.0024+j0.0288
60	61	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
55	60	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0112+j0.0195	0.0012+j0.0152
60	56	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0025+j0.0044	0.0003+j0.0023
61	58	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0104+j0.0182	0.0012+j0.0097
61	59	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0071+j0.0124	0.0008+j0.0066
59	62	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0170+j0.0297	0.0019+j0.0232
62	63	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0185+j0.0323	0.0021+j0.0252
65	64	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0297+j0.0282	0.0017+j0.0213
66	65	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0294+j0.0279	0.0017+j0.0211
67	68	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0338+j0.0320	0.0020+j0.0243
69	70	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
52	69	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0083+j0.0145	0.0009+j0.0113
69	53	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0093+j0.0162	0.0010+j0.0086
70	66	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0201+j0.0190	0.0012+j0.0099
70	67	000.00+j000.00	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0224+j0.0213	0.0013+j0.0110
33	71	000.00+j000.00	212.59+j90.56	212.59+j90.56	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
51	72	183.25+j78.06	183.25+j78.06	183.25+j78.06	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
30	73	000.00+j000.00	73.12+j31.15	73.12+j31.15	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
63	74	614.29+j261.69	614.29+j261.69	614.29+j261.69	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000

32	75	000.00+j000.00	431.95+j184.01	431.95+j184.01	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
53	76	204.46+j87.10	204.46+j87.10	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
25	77	29.11+j12.40	29.11+j12.40	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
64	78	597.14+j254.38	000.00+j000.00	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
2	79	000.00+j000.00	101.55+j43.26	101.55+j43.26	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
42	80	000.00+j000.00	60.93+j25.96	60.93+j25.96	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
62	81	000.00+j000.00	329.04+j140.17	329.04+j140.17	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
2	82	135.41+j57.68	135.41+j57.68	135.41+j57.68	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
2	83	000.00+j000.00	101.55+j43.26	101.55+j43.26	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
2	84	101.55+j43.26	101.55+j43.26	000.00+j000.00	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
2	85	000.00+j000.00	101.55+j43.26	101.55+j43.26	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000
2	86	000.00+j000.00	101.55+j43.26	101.55+j43.26	0.0000+j0.0000	0.0000+j0.0000

Fonte: (LAPSEE, 2012)