

TANIA PAOLA LEDESMA ARANGO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE MOTORES DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E UMA
PROPOSTA DE REGULAMENTAÇÃO PARA SEU
ACESSO ÀS REDES DE BAIXA TENSÃO**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutora em Engenharia.

São Paulo
2009

TANIA PAOLA LEDESMA ARANGO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE MOTORES DE
INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E UMA
PROPOSTA DE REGULAMENTAÇÃO PARA SEU
ACESSO ÀS REDES DE BAIXA TENSÃO**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutora em Engenharia.

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Hernán Prieto Schmidt

São Paulo
2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 24 de setembro de 2009.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Ledesma Arango, Tania Paola

Avaliação do impacto de motores de indução trifásicos em redes de distribuição de energia elétrica e uma proposta de regulamentação para seu acesso às redes de baixa tensão / T. P. Ledesma Arango -- ed. rev. -- São Paulo, 2009.

111 p.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Energia elétrica 2. Motores de indução 3. Rede de distribuição de energia elétrica (Regulamentação) 4. Planejamento energético I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

*A mi madre Amparo por toda la fortaleza que ha
tenido y sigue teniendo;
A mi hermana Ana Judith por ser la niña de mis
ojos;
A mi amado esposo André por estar presente
siempre;
A mi familia que siempre me apoyó y confió en mí.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Hernán Prieto Schmidt, meu orientador, pelo apoio e pelas contribuições que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos professores Dr. Carlos Marcio Vieira Tahan e Dr. Marcos Roberto Gouvêa, pelas valiosas contribuições na etapa de Qualificação desta Tese e colaboração direta na realização deste trabalho.

Agradeço também, colaborando diretamente, a meu esposo André Meffe e ao amigo Fernando Locks Lange, pelo tempo dedicado no desenvolvimento dos módulos computacionais a partir da metodologia desenvolvida.

Aos meus amigos Alden, Fábio, Ferdinando, Paula, Mauro e Mário pelas dicas, paciência, apoio e incentivo.

À minha mãe Amparo, à minha irmã Anita, ao meu avô Jorge Enrique, à minha avó Ana Judith e a todos meus tios e tias que me apoiaram e me incentivaram durante essa e todas as outras etapas da minha vida.

À CNPq pelo apoio financeiro durante o programa de doutorado.

Agradeço igualmente a todos os outros que colaboraram de qualquer forma em algum momento deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Resumo

Abstract

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. AS CARGAS ESPECIAIS	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. INTRODUÇÃO.....	4
2.2. PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO	5
2.3. ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE	6
2.4. ASPECTOS REGULATÓRIOS DA PERTURBAÇÃO DE TENSÃO	10
2.4.1. <i>Legislação Nacional</i>	10
2.4.2. <i>Legislação Internacional</i>	13
2.5. CONCLUSÕES.....	16
3. ALGORITMO EVOLUTIVO.....	18
3.1. INTRODUÇÃO.....	18
3.2. INTRODUÇÃO AOS ALGORITMOS EVOLUTIVOS	18
3.3. OS PRINCIPAIS ALGORITMOS EVOLUTIVOS	21
3.3.1. <i>Algoritmos Genéticos</i>	21
3.3.2. <i>Programação Genética</i>	22
3.3.3. <i>Estratégias Evolutivas</i>	22
3.3.4. <i>Programação Evolutiva</i>	26
3.4. CONCLUSÕES.....	26
4. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE PARTIDA DE MOTORES.....	27
4.1. INTRODUÇÃO.....	27
4.2. MOTOR DE INDUÇÃO	28
4.2.1. <i>Obtenção do Circuito Elétrico Equivalente a partir dos Dados de Placa</i>	32
4.2.1.1. Parâmetros Variáveis	33
4.2.1.2. Leis de Variação de ΔR_2 e de ΔX_2	34
4.2.2. <i>Algoritmo Evolutivo Implementado</i>	35
4.2.3. <i>Função Objetivo</i>	37
4.3. REPRESENTAÇÃO DA REDE E DA CARGA	40
4.3.1. <i>Representação dos Trechos de Rede</i>	41
4.3.2. <i>Representação da Carga</i>	42
4.3.3. <i>Cálculo de Correntes e Tensões</i>	46
4.3.4. <i>Cálculo de Perdas nos Trechos de Rede</i>	49
4.4. CÁLCULO ELÉTRICO DO MOTOR DURANTE A PARTIDA	49
4.5. AVALIAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO.....	55
4.6. CONCLUSÕES.....	56
5. ASPECTOS REGULATÓRIOS SOBRE PARTIDA DE MOTORES.....	57
5.1. INTRODUÇÃO.....	57
5.2. IMPACTO DE MOTORES NA REDE ELÉTRICA	57
5.2.1. <i>Descrição do Módulo Computacional Desenvolvido</i>	58
5.2.2. <i>Casos Estudados</i>	59
5.2.3. <i>Caso 1</i>	61

5.2.4.	<i>Caso 2</i>	63
5.3.	SOLUÇÕES PARA O PROBLEMA	65
5.3.1.	<i>Partida Direta</i>	66
5.3.2.	<i>Partida Estrela – Triângulo</i>	68
5.3.3.	<i>Partida por Autotransformador</i>	70
5.3.4.	<i>Soft-Start (Partida Progressiva)</i>	72
5.3.5.	<i>Chave Série – Paralelo</i>	74
5.3.6.	<i>Chave de Resistência ou Reator</i>	74
5.3.7.	<i>Reostato</i>	75
5.4.	SENSIBILIDADE DE CARGAS E EQUIPAMENTOS	75
5.4.1.	<i>Curvas de Sensibilidade às Variações de Tensão de Curta Duração</i>	76
5.5.	PROPOSTA DE REGULAMENTAÇÃO	78
5.5.1.	<i>Regras Praticadas por Algumas Concessionárias Brasileiras</i>	80
5.5.2.	<i>Critério de Aceite</i>	82
5.5.3.	<i>Método de Avaliação Detalhada</i>	82
5.5.4.	<i>Método de Avaliação Expedita</i>	84
5.6.	CONCLUSÕES.....	89
6.	CONCLUSÕES E TÓPICOS PARA FUTURO DESENVOLVIMENTO.....	91
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Estratégia Evolutiva canônica.....	24
Figura 4.1. Circuito equivalente por fase do motor de indução.....	28
Figura 4.2. Circuito equivalente simplificado para um motor de indução.....	30
Figura 4.3. Impedância equivalente de Thévenin do circuito de entrada.....	31
Figura 4.4. Circuito Equivalente para motor de indução considerando parâmetros variáveis.....	34
Figura 4.5. Algoritmo Evolutivo proposto.....	37
Figura 4.6. Indivíduo típico.....	40
Figura 4.7. Trecho de rede primária.....	42
Figura 4.8. Correntes nos lados de baixa e média tensão.....	43
Figura 4.9. Curva de Carga – Consumidor Residencial.....	44
Figura 4.10. Cálculo de Corrente em um Trecho a Partir das Cargas a Jusante.....	47
Figura 4.11. O Método dos Trapézios aplicado à função $\omega(t)$	51
Figura 4.12. Diagrama de Processo.....	52
Figura 4.13. Curvas de Conjugado Motor e Corrente x Escorregamento.....	53
Figura 4.14. Curva de Corrente x Tempo.....	54
Figura 4.15. Curvas Velocidade e Conjugado Motor x Tempo.....	54
Figura 5.1. Dados de placa do motor de 110 kW.....	61
Figura 5.2. Distância da barra 9202 da Subestação.....	62
Figura 5.3. Queda de tensão causada pela partida do motor na barra 9202.....	62
Figura 5.4. Gráfico Flicker – 1 partida / hora.....	63
Figura 5.5. Gráfico Flicker – 6 partidas / hora.....	63
Figura 5.6. Distância da barra 9969 da Subestação.....	64
Figura 5.7. Queda de tensão causada pela partida do motor na barra 9969.....	64
Figura 5.8. Gráfico Flicker.....	65
Figura 5.9. Curvas de corrente e conjugado na partida direta.....	67
Figura 5.10. Curvas de corrente e conjugado na partida estrela-triângulo.....	70
Figura 5.11. Curvas de corrente e conjugado na partida com autotransformador.....	72
Figura 5.12. Curva conjugado X velocidade em partida soft-start.....	73
Figura 5.13. Ângulo de disparo.....	73
Figura 5.14. Curva corrente X velocidade em partida soft-start.....	74

Figura 5.15. Curva de sensibilidade para computadores (CBEMA).....	77
Figura 5.16. Curva de sensibilidade para equipamentos de tecnologia de informação (ITIC)	78
Figura 5.17. Rede de BT do exemplo apresentado	83
Figura 5.18. Curvas ISO transformador em função da potência do motor	85
Figura 5.19. Curvas ISO motor em função da potência da ET	86
Figura 5.20. Tempo de tensão abaixo de 80% em função da potência do motor.....	86
Figura 5.21. Curvas ISO motor para ET de 30 kVA em função da distância.....	87
Figura 5.22. Curvas ISO motor para ET de 45 kVA em função da distância.....	87
Figura 5.23. Curvas ISO motor para ET de 75 kVA em função da distância.....	88
Figura 5.24. Curvas ISO motor para ET de 112,5 kVA em função da distância.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Comparação dos erros na variável “torque”	55
Tabela 5.1 – Dados de placa do motor	59
Tabela 5.2 – Dados calculados	60
Tabela 5.3 – Resultados do exemplo apresentado	84

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar e discutir alguns modelos desenvolvidos para a avaliação do impacto de motores de indução trifásicos nas redes de distribuição de energia elétrica partindo de seus dados de placa e utilizando algoritmos evolutivos para o cálculo dos parâmetros elétricos do circuito equivalente do motor.

A discussão é de fundamental importância, na medida em que as distorções na onda de tensão impactam diretamente na qualidade do suprimento promovida por uma concessionária de energia elétrica, a qual deve fornecer aos seus consumidores uma tensão puramente senoidal, com amplitude e frequência constantes.

Destaca-se a importância da representação de alguns aspectos específicos na avaliação do impacto de motores trifásicos na rede de distribuição. Por exemplo, a representação correta dos motores de indução na sua partida permitirá a identificação de afundamentos momentâneos de tensão tanto em pontos da rede secundária quanto da rede primária.

Este trabalho apresenta o modelo de representação do motor de indução e dos elementos constituintes das redes de baixa e média tensão, incluindo os transformadores de distribuição, que possibilitam a análise do impacto desta carga perturbadora em toda a cadeia da rede, partindo-se do ponto de ligação do equipamento e analisando-se, dependendo do caso, a rede secundária, transformador de distribuição, rede primária e subestação de distribuição.

Com o módulo computacional desenvolvido a partir da metodologia proposta neste trabalho, foi possível propor critérios bem definidos para avaliar se a partida de motores causa algum prejuízo para a rede de baixa tensão e/ou aos demais consumidores. Foi apresentado um método detalhado e um método expedito que permitem avaliar a viabilidade da instalação de um motor em uma determinada barra dependendo de sua potência, da potência nominal do transformador de distribuição e da sua distância até o transformador. Os critérios e os métodos estabelecidos neste trabalho constituem-se em uma proposta de regulamentação para o acesso de motores de indução à rede de baixa tensão e representam a segunda grande contribuição deste trabalho.

ABSTRACT

Much research is currently being conducted on the subject of Power Quality in electrical systems. This stems from the widespread use of “polluting” devices that introduce distortions on voltage waveforms so these become increasingly different from pure sinusoidal. At the same time, there has also been an increase on the use of sensitive equipment that cannot operate properly when fed by a non-sinusoidal source.

This work focuses on the development of a few models aimed at evaluating the impact of electrical motors on electricity distribution networks. Motors have a direct impact on the quality of electrical energy provided to the network’s customers, mainly owing to voltage sags during the motors’ startup.

A detailed representation of all components (motors, primary circuits, distribution transformers and secondary circuits) has been developed. This allows a precise identification of critical points of the distribution system as to voltage sags. The first important contribution of this work refers to the computation of the motor’s equivalent circuit from its rated data using evolutionary algorithms.

With these models, two different methods for evaluating the impact of the connection of a motor at a given load point were developed. These methods take into account the motor’s rated power, the distance between the distribution transformer and the load point, and the transformer’s rated power. The methods constitute a proposal for a regulatory framework within this subject, and they represent the second major contribution of this work.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. AS CARGAS ESPECIAIS

Dentre os estudos técnicos de maior complexidade realizados no setor de distribuição de energia elétrica, encontra-se a análise de operação de cargas especiais, como os motores de indução. A principal característica de interesse relacionada a este equipamento é o seu comportamento durante os instantes iniciais de sua partida, uma vez que na maioria dos casos observa-se o surgimento de correntes elétricas muito maiores que os valores nominais considerados nos estudos de fluxo de carga em regime permanente.

Estas correntes elétricas elevadas durante um curto período de tempo podem ocasionar problemas ao sistema de distribuição, como acionamento indevido de equipamentos de proteção, grande flutuação de tensão em determinados pontos da rede, sobrecorrentes em trechos das redes primária ou secundária, ou até mesmo condições que impossibilitam a partida dos próprios equipamentos analisados, como é o caso dos motores de indução.

Neste trabalho, serão priorizadas as análises transitórias em frequência fundamental, com especificação dos modelos em regime permanente adaptados ao estudo de partida dos motores de indução. Serão dados de entrada dos estudos as informações de placa dos motores de indução (informações facilmente obtidas pela concessionária) e também as informações da rede elétrica, já modeladas de forma a proporcionar estudos trifásicos desequilibrados.

Será abordada também a avaliação e definição dos valores de tensão que podem ser considerados prejudiciais e que possam causar reflexos indesejáveis às demais cargas ligadas à rede, visando criar uma proposta de regulamentação que possibilite avaliar o acesso de motores de indução trifásicos à rede de distribuição de baixa tensão.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho visa, através do uso de algoritmos evolutivos, realizar a estimação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor de indução para posteriormente utilizá-lo para analisar a resposta da rede de distribuição ante a partida de motores de diferentes potências.

Delinearam-se alguns objetivos principais tais como:

- Definir os dados de entrada necessários para realizar o cálculo dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor.
- Definir o algoritmo evolutivo que será utilizado para a estimação dos parâmetros.
- Desenvolver os modelos que permitam avaliar os reflexos que a partida dos motores causa à rede de distribuição.
- Propor uma regulamentação que permita fixar os critérios de acesso à rede de distribuição de baixa tensão quando se deseja ligar um motor.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para tratar de todos os assuntos aqui mencionados, este trabalho foi dividido em seis capítulos.

O primeiro capítulo descreve as motivações e objetivos do trabalho, informando os módulos principais que o compõem.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre os trabalhos realizados na área de estimação de parâmetros elétricos dos motores de indução utilizando diferentes técnicas, tais como os algoritmos genéticos e os algoritmos evolutivos.

O Capítulo 3 apresenta uma abordagem mais profunda sobre os algoritmos evolutivos e descreve o algoritmo evolutivo canônico que será empregado para estimar os parâmetros elétricos do motor de indução.

O Capítulo 4 descreve a metodologia desenvolvida para abordar o problema do cálculo dos parâmetros elétricos do motor quando se dispõe apenas dos dados de placa e análise da sua partida.

O Capítulo 5 apresenta uma breve revisão dos impactos dos motores na rede elétrica, as soluções para os problemas causados por sua partida e uma proposta de regulamentação que permita avaliar a viabilidade do acesso de um motor à rede.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta a discussão dos resultados obtidos e as conclusões do trabalho com sugestões para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é apresentar o estado da arte sobre a estimação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor, tarefa fundamental para sua utilização em quaisquer tipos de simulações que se deseja realizar com um motor. Será apresentada uma análise crítica de algumas metodologias existentes para o cálculo dos parâmetros elétricos do motor.

Como poderá ser visto no decorrer deste capítulo as metodologias pesquisadas não levam em conta a variação dos parâmetros elétricos do motor causada pela saturação e que é considerada neste trabalho. A única metodologia encontrada e que leva em conta a variação dos parâmetros elétricos apresenta uma solução analítica a partir dos dados fornecidos pelo fabricante do motor. No procedimento descrito por Goldemberg [2] é necessário algum tipo de tratamento numérico para ajuste de parâmetros. Neste capítulo será abordado o problema da estimação dos parâmetros do circuito elétrico e os diferentes métodos utilizados. Na maioria dos casos será visto que os algoritmos genéticos são a base da metodologia.

Outro ponto a ser tratado neste capítulo está relacionado às questões regulatórias, ou seja, como os afundamentos de tensão e as flutuações de tensão provocados pela partida de motores são regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – e também por outros órgãos reguladores do mundo. Como poderá ser visto, tais fenômenos são tratados de forma genérica e não estão necessariamente associados à partida de motores.

2.2. PARTIDA DE MOTORES DE INDUÇÃO

Os motores de indução ligados nos sistemas de potência representam a mais extensa aplicação da potência elétrica, consumindo perto de 60% da energia elétrica gerada nos países industrializados [3].

A partida direta de motores de indução, ou seja, à plena tensão, é o método mais simples, confiável e econômico de colocá-los em operação. Porém, isto pode se tornar proibitivo em casos onde a corrente de partida afeta a rede de alimentação.

A corrente absorvida instantaneamente durante o processo de partida alcança picos entre cinco e oito vezes a corrente nominal. Os afundamentos de tensão produzidos pelas correntes de partida são uma das principais causas do mau funcionamento de cargas sensíveis, particularmente se o motor for muito grande quando comparado com a potência de curto-circuito na barra de ligação.

Caso a queda de tensão produzida pela partida do motor seja elevada, o conjugado de partida poderá ser inferior ao inicial da carga, fazendo com que o eixo do motor trave ou que o tempo de partida seja muito longo, tendo como consequência a atuação da proteção. Motores em funcionamento ligados na mesma rede poderão ter sua velocidade reduzida, além de aumento de corrente e sobreaquecimento, dependendo da carga que acionam.

A solução mais simples para mitigar o afundamento de tensão é usar um método de partida para o motor, o qual reduz a tensão no estator por um curto período de tempo variando entre poucos segundos e alguns minutos. A aceleração é então reduzida e o tempo de partida aumenta.

Os afundamentos de tensão também podem causar problemas no funcionamento de vários tipos de equipamentos, tais como controladores lógicos programáveis (CLP's) lâmpadas de descarga, contadores, microprocessadores, entre outros, cargas essas bastante sensíveis às variações de tensão.

A sensibilidade de equipamentos elétricos e eletrônicos face aos afundamentos de tensão está descrita em diversos trabalhos e foi sintetizada de uma forma muito clara em [4].

2.3. ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE

Em [31] os autores demonstraram a aplicabilidade dos algoritmos evolutivos no problema da determinação dos parâmetros do motor. O motor foi modelado usando o circuito elétrico equivalente. Os parâmetros são calculados usando algoritmos genéticos ou programação genética e os conjugados são calculados usando as equações do circuito. São calculados os erros entre os conjugados de entrada (dados fornecidos pelo fabricante) e os conjugados calculados. Este erro dá uma indicação da capacidade dos algoritmos genéticos ou da programação genética para determinar adequadamente ou exatamente os parâmetros elétricos do motor.

Nesta formulação os parâmetros são assumidos constantes porque a intenção do trabalho é usar os parâmetros para estudos que não exijam alta precisão. A formulação usando o modelo exato do circuito equivalente do motor tem como variáveis independentes as impedâncias do estator e do rotor e a reatância de magnetização (R_1 , R_2 , X_1 , X_2 e X_m). O algoritmo é implementado usando um *string* de 70 bits para representar os 5 parâmetros.

Usando esta técnica para um motor de 5 HP o cálculo foi realizado com um erro de 20% para o conjugado nominal e este erro se reduz ao utilizar o modelo de barras profundas.

Em [33], assim como no trabalho anterior, também são aplicados algoritmos genéticos para o problema da determinação dos parâmetros, mas neste trabalho as reatâncias do rotor X_2 e do estator X_1 são combinadas em uma só reatância X_1 , sendo calculadas depois da otimização da função objetivo conhecendo o tipo de projeto ou construção da máquina. A reatância de magnetização X_m é calculada usando a equação do fator de potência nominal depois de ter calculado os valores de R_1 , R_2 , e X_1 usando o algoritmo genético. Cada parâmetro é codificado como um número binário de 14 bits e juntos, os

3 parâmetros (de R_1 , R_2 , e X_1) formam um *string* de 42 bits. A função erro foi escolhida como a somatória dos quadrados dos erros das funções de torque, enquanto a função de avaliação (“fitness”) é definida pelo inverso do erro. Erros grandes são produzidos quando é usado o modelo de gaiola simples para representar o motor devido à não consideração da variação dos parâmetros e os efeitos das barras profundas no modelo.

Os autores também utilizaram o método de Newton-Raphson para obter os parâmetros do circuito equivalente, porém as soluções variam dependendo das estimativas iniciais dos parâmetros. O sucesso do método depende da seleção de uma boa estimativa inicial. Apesar de o processo de otimização poder durar apenas alguns minutos, tempo e esforço consideráveis podem ser necessários para selecionar a estimativa inicial, o que requer familiaridade com o tamanho do motor e seus parâmetros. Mesmo quando a estimativa inicial é razoável, o método ainda pode não convergir para a solução correta.

Em [34] os autores apresentam uma aplicação de algoritmos evolutivos para identificar os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução em estado estável. São pesquisadas algumas versões de mecanismos de mutação adaptativos e avaliadas em simulações. Cada algoritmo é representado pelo vetor de 5 características correspondentes com os valores dos 5 parâmetros do motor identificados: resistências do rotor e do estator (R_1 , R_2), reatâncias do rotor e do estator (X_1 , X_2) e reatância de magnetização (X_m). A função de avaliação é definida pela soma dos quadrados das diferenças entre as respostas do modelo computacional e os valores calculados com as experiências de laboratório. Esta função objetivo é minimizada. O foco dessa pesquisa foi a eficiência no tempo de processamento.

Em [35] os autores apresentam uma aplicação dos algoritmos genéticos para a identificação dos parâmetros elétricos do modelo de Park para uma máquina de indução. Tal modelo é usado em técnicas de controle para variadores de velocidade.

Desse estudo pode ser concluído que o algoritmo genético adaptativo é uma ferramenta promissora que pode ser usada para a otimização de problemas multidimensionais em engenharia com funções de múltiplos objetivos.

Em [36] o trabalho é direcionado à identificação dos parâmetros elétricos do motor, foram comparados os desempenhos de oito algoritmos estocásticos de otimização na identificação de dois motores de indução. Os oito algoritmos representam os quatro principais grupos de algoritmos freqüentemente usados para otimização numérica. Os quatro grupos são: busca local (LS), estratégias evolutivas (ESs), algoritmos evolutivos geracionais (EAs) e o algoritmo de otimização por enxame de partículas (PSOs). Os motores de indução foram representados por modelos dinâmicos com consideração do efeito da saturação e sem a consideração deste fenômeno.

Os algoritmos de buscas locais tiveram o pior desempenho dos oito algoritmos testados. Já os algoritmos evolutivos tiveram o melhor desempenho para os dois casos, ou seja, cálculo dos parâmetros considerando saturação e sem a consideração deste efeito.

Em [37] foi usado o Método dos Elementos Finitos em conjunto com o modelo convencional do circuito equivalente para determinar os parâmetros para um motor de indução trifásico. O método proposto é baseado no circuito equivalente convencional por fase junto com os modelos de campo dos elementos finitos para estator e rotor. O objetivo é calcular as melhores estimativas dos parâmetros do circuito equivalente para um dado escorregamento e uma tensão aplicada nos terminais do motor. Fundamentalmente, o método visa obter um conjunto de componentes do circuito equivalente que sejam compatíveis com as correntes por eles previstas.

Em [38] os autores tratam da identificação dos parâmetros do motor de indução usando a técnica dos mínimos quadrados e algoritmos genéticos usando as tensões e correntes do estator e a velocidade como dados de entrada e saída. O método de identificação baseado em algoritmos genéticos consiste na determinação dos melhores parâmetros, os quais devem coincidir com o comportamento entrada-saída do motor.

Os dados usados para a identificação dos parâmetros são obtidos realizando testes dinâmicos ao invés de testes estáticos. O objetivo deste trabalho é a estimação dos parâmetros eletromagnéticos e mecânicos, já que usando tanto as características estáticas como os dados adquiridos em regime permanente os parâmetros mecânicos não podem ser calculados. Os testes dinâmicos necessários para a identificação podem

ser facilmente realizados. A aquisição de dados também pode ser facilmente realizada usando instrumentos simples para medição de correntes, tensões e velocidade.

Em [39] apenas a eficiência dos motores de indução é estimada usando algoritmos genéticos. Esses resultados são comparados com os valores medidos de torque e potência. Os resultados apresentaram pequenos erros comparados com os procedimentos clássicos.

Em [40] é apresentada uma aplicação de algoritmos genéticos usando os dados de placa do motor e valores como tensões, correntes e torques para determinar os parâmetros desconhecidos do motor de indução. Para usar este algoritmo o usuário deve conhecer ou ter idéia dos valores máximos e mínimos das resistências e reatâncias do motor. Esses limites superiores e inferiores são usados como restrições no espaço de busca visando achar a solução em um tempo razoável.

Em [41] os autores propõem um novo método para estimar os parâmetros do motor de indução, baseado na análise de regime permanente do motor. Seu núcleo é a rotina de otimização não linear que permite, por sua flexibilidade, levar em conta diferentes tipos de dados, tais como os dados de placa e as características de desempenho do motor como condições de fronteira ou restrições, o que permite construir modelos do motor de indução a partir dos dados do fabricante: dados de placa e características de desempenho do motor. O método foi formulado utilizando modelos sem saturação e com saturação.

Em [42] apresentam-se duas ferramentas para identificar os parâmetros do motor de indução: os algoritmos genéticos e os algoritmos Quasi-Newton. Essas duas técnicas têm a vantagem de serem aplicadas a modelos lineares e não lineares. Os resultados experimentais provaram a efetividade desses dois algoritmos.

Nesse trabalho é mostrado que os algoritmos genéticos e os quasi-Newton são uma poderosa ferramenta para a identificação dos parâmetros de um motor de indução e que podem ser facilmente estendidos a muitos outros equipamentos elétricos. Apenas um número reduzido de gerações é necessário para resultados precisos, além de não precisar

de uma memória grande e do algoritmo ser facilmente implementado em qualquer linguagem de programação. Já com os métodos de segunda ordem que precisam da determinação da derivada de segundo grau e a inversão da matriz Hessiana alguns problemas clássicos acontecem. Mas, usando o algoritmo quasi-Newton não se teve esse problema graças à formula de BFGS (C. Broyden, R. Fletcher, D. Goldfarb et Shanno definida em 1970) amplamente usada na literatura do artigo. Esse trabalho não considerou os efeitos da saturação na estimação dos parâmetros do motor de indução.

2.4. ASPECTOS REGULATÓRIOS DA PERTURBAÇÃO DE TENSÃO

O gerenciamento da rede é muito importante para a qualidade de tensão. O planejamento e a operação da rede, a estratégia de proteção, aterramento, etc., são todos pontos chaves relacionados com distúrbios na qualidade da tensão. O papel e as ações das companhias de transmissão e distribuição são, por conseguinte, de muita importância.

Neste item é apresentado um resumo das principais normas e documentos que fazem referência à qualidade de energia elétrica e à qualidade de tensão que é hoje um dos temas mais importantes relacionados com a qualidade do fornecimento e do serviço. É importante destacar que, no âmbito brasileiro, o sistema regulatório ainda está em fase de consolidação havendo, portanto, alguns aspectos que ainda não foram completamente definidos.

2.4.1. Legislação Nacional

Em relação à legislação do setor elétrico nacional, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – editou diversas resoluções que abordam, entre outros temas, a conformidade do nível de tensão em regime permanente, a qualidade de energia elétrica e, portanto, relacionam-se direta ou indiretamente com a qualidade de tensão. As principais resoluções são apresentadas brevemente a seguir.

A Resolução ANEEL 505/2001 estabelece de forma atualizada e consolidada as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, a serem observados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS –, concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia [5].

A Resolução ANEEL 456/2000 estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica a serem observadas tanto pelas concessionárias como pelos consumidores [6]. Esta resolução não estabelece padrões de desempenho do sistema elétrico para os afundamentos de tensão, mas salienta que é de responsabilidade da concessionária a prestação de serviço adequado a todos os consumidores.

A Resolução ANEEL 024/2000 estabelece as disposições relativas à continuidade da distribuição de energia elétrica nos seus aspectos de duração e frequência, a serem observadas pelas concessionárias e permissionárias de serviço público de energia elétrica às unidades consumidoras [7].

A Resolução ANEEL 281/1999 estabelece as condições gerais de contratação do acesso ao sistema elétrico, definindo normas e padrões técnicos de caráter geral da concessionária que os acessantes devem observar para se conectarem no sistema elétrico [8]. Esta resolução observa que as concessionárias de energia devem estar atentas quanto à conexão de cargas que podem provocar afundamentos de tensão no sistema elétrico. A partir do momento em que a concessionária concede a conexão de uma carga que esteja provocando distúrbios no sistema, ela se torna responsável pelos eventuais problemas causados por ela.

As resoluções citadas anteriormente abordam questões referentes à importância da qualidade de energia elétrica – QEE –, de uma forma geral, não tratando especificamente dos fenômenos gerados pela partida de motores (afundamento e flutuação). Os documentos da legislação brasileira que abordam fenômenos como os afundamentos de tensão ou as flutuações de tensão são os documentos denominados “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST” da ANEEL [9] e “Procedimentos de Rede” do ONS [10].

O Módulo 8 do PRODIST estabelece os procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica – QEE –, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço. Neste módulo são caracterizados os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda da tensão. Até a presente data, não estão definidos padrões e indicadores de desempenho do sistema elétrico relativo aos afundamentos de tensão [9]. No caso de flutuações de tensão são fornecidos valores de referência a serem utilizados para a avaliação do desempenho de sistemas de distribuição. Entretanto, assim como no caso dos afundamentos, há menção que ainda será especificada uma resolução específica.

O Módulo 3 do PRODIST estabelece as condições de acesso aos sistemas de distribuição, compreendendo a conexão e o uso e define os critérios técnicos e operacionais, os requisitos de projeto, as informações, os dados e a implementação da conexão, aplicando-se aos novos acessantes bem como aos existentes. Na seção 3.2 – “Critérios Técnicos e Operacionais” – do item 3 – “Conexão de unidades consumidoras aos sistemas de distribuição de BT” – está estabelecido que o acessante deve garantir, ao conectar suas instalações, que não sejam violados os valores de referência no ponto de conexão que venham a ser estabelecidos em regulamentação específica para os seguintes parâmetros: distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão e variações de tensão de curta duração. O item 4 – “Conexão de unidades da categoria de consumo aos sistemas de distribuição de MT e AT” – regulamenta que o acessante deve se responsabilizar pela instalação dos equipamentos necessários à correção ou proteção para se evitar o comprometimento da segurança e a violação dos valores de referência da qualidade da energia elétrica definidos no Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica – ou naqueles que venham a ser estabelecidos em regulamentação específica.

No Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede estão definidas as bases conceituais e os procedimentos para a gerência dos indicadores de desempenho da rede básica, incluindo os de frequência, de tensão, e de continuidade do serviço [10]. São definidos os indicadores para avaliar flutuações de tensão e variações de tensão de curta duração (VTCD). Entretanto, apenas para as flutuações são definidos valores limites.

Dos documentos citados, verifica-se que ainda há muitas incertezas regulatórias com relação a afundamentos e flutuações de tensão.

Nos procedimentos de rede estão claramente estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, assim como os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão. No caso de flutuações de tensão são fornecidos valores de referência, mas que serão estabelecidos em resolução específica após o período experimental de coleta de dados, período que é no mínimo de três anos. Mas no caso de fenômenos como afundamentos de tensão não estão definidos valores de referência para os padrões e indicadores de desempenho para este fenômeno. Isto mostra que o sistema regulatório ainda está em fase de consolidação havendo muito trabalho para ser realizado para definir completamente todos os aspectos sobre a qualidade do produto.

2.4.2. Legislação Internacional

Na Europa, a norma mais importante que considera as características da tensão da eletricidade fornecida pelas distribuidoras públicas ou concessionárias é da CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) EN 50160 [11]. Esta norma define, descreve e especifica as principais características da tensão de alimentação no ponto de entrega ao cliente por uma rede de distribuição pública em baixa ou média tensão. A seguir são apresentadas algumas das características da tensão de alimentação estipuladas pela norma.

A frequência deve ser igual a 50 Hz. Em condições normais o valor médio em intervalos de 10 minutos deve estar:

- ✓ Entre 49,5 e 50,5 Hz durante 95% de uma semana;
- ✓ Entre 47 e 52 Hz durante 100% de uma semana.

No caso da variação da tensão de alimentação, não considerando as interrupções, 95% dos valores eficazes médios de 10 minutos para cada período de uma semana devem situar-se na faixa +/-10% da tensão nominal.

No caso da severidade do *flicker*, para qualquer período da semana a severidade de longa duração deve ser menor que 1,0 durante 95% do tempo.

Com relação ao desequilíbrio das tensões de alimentação, para cada período de uma semana, 95% dos valores eficazes médios de 10 minutos da componente de sequência inversa das tensões não devem ultrapassar 2% da correspondente componente de sequência direta.

A tensão harmônica é uma tensão senoidal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da tensão de alimentação e a taxa de distorção harmônica não deve ultrapassar 8% em 95% dos períodos de 10 minutos.

O cumprimento da norma não é uma garantia de que o utilizador final da energia elétrica não vai ter nenhum tipo de problema. Há um conjunto de perturbações que normalmente acontecem que são imprevisíveis e impossíveis de evitar. Esse conjunto de perturbações é definido da seguinte forma:

- ✓ Afundamento de tensão: queda do valor eficaz da tensão de alimentação para um valor situado entre 90% e 1% da tensão contratada (U_c) durante um período entre 10 ms e 1 minuto;
- ✓ Interrupção de alimentação: variação de tensão para menos de 1% da tensão contratada:
 - Interrupção curta (menos de 3 min): defeito transitório;
 - Interrupção longa (mais de 3 min): defeito permanente;

Dada a aleatoriedade dos fenômenos que originam as perturbações, a norma não define o que é cumprimento ou não cumprimento para os afundamentos e as elevações de tensão. Limita-se a referir valores típicos e as origens destes fenômenos. Compete aos

utilizadores da energia munir-se dos meios técnicos necessários que garantam a imunidade das suas instalações [11].

A IEEE Std. 1159, 1995 – IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality – auxilia na monitoração e na interpretação de valores obtidos de medições de distúrbios eletromagnéticos que afetam a qualidade da energia elétrica. Aqui se encontra definido cada tipo de distúrbio elétrico em função das suas características tais como: faixas de frequência, duração e intensidade da magnitude da tensão [12].

Na IEE Std.446, 1995 – IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications –, o conceito de afundamento de tensão é apresentado dando ênfase à sensibilidade de equipamentos e impactos de partida de motores nas características do fenômeno [13].

A IEEE Std 1250, 1995 – IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances – apresenta as principais causas e respectivos métodos de mitigação de afundamentos de tensão e a sensibilidade de equipamentos eletrônicos [14].

A IEC 61000 é uma série de normas técnicas e relatórios de compatibilidade eletromagnética (EMC), as quais são muito completas e incluem referências sobre limites de distúrbios de tensão, imunidade e limites de emissão para equipamentos elétricos, medidas para parâmetros de qualidade de tensão entre outras [15].

Dentro dessa série, destaca-se a IEC 61000-2-1, 1990 – Voltage Dips and Short Supply Interruption –, que descreve o afundamento de tensão, considerando sua amplitude e duração, além de apresentar uma análise de causas e efeitos do fenômeno sobre cargas sensíveis [16].

Na IEC 61000-2-8, 2002 – Voltage Dips and Short Interruption on Public Electric Power Supply Systems with Statistical Measurement Results –, é descrito o afundamento de tensão em relação a suas causas e efeitos, cálculos de amplitude e métodos de medição e mitigação [17].

Em [17] são comparadas as regulamentações para qualidade de tensão usadas pelos países membros do Council of European Energy Regulators – CEER.

Com o passar dos anos, alguns reguladores introduziram limites para a qualidade de tensão que são diferentes dos indicados na EN 50160. Em outros casos essas regulamentações não foram adotadas pelo regulador.

Na França os limites da qualidade de tensão são estipulados em contratos entre os clientes e os operadores do sistema de distribuição ou transmissão. Através das condições dos contratos, os consumidores podem receber pagamentos de compensação em resposta se os limites de qualidade da tensão contratual não forem cumpridos. Por exemplo, um cliente com um nível contratual personalizado de afundamento de tensão pode receber compensação se o operador não respeita esta norma. Isto também é válido para a EN 50160, quando referido no contrato. Em outros países como Hungria e Romênia, nos casos nos quais as normas de qualidade de tensão não são cumpridas, uma punição financeira pode ser aplicada pelo regulador.

2.5. CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou algumas metodologias para obtenção dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor de indução. Como foi mostrado, a grande maioria dos autores utilizam algoritmos genéticos e não consideram a variação de parâmetros. Em alguns casos, recorre-se ao modelo de motor de barras profundas ou de dupla gaiola para melhorar a estimação dos parâmetros e obter maior precisão dos dados calculados com relação aos dados fornecidos pelos fabricantes.

Também foi apresentado como os fenômenos de afundamento e flutuação de tensão estão sendo tratados pelos órgãos reguladores do mundo. Nesse aspecto, verifica-se que o assunto ainda não está consolidado e que nem sempre as normas estabelecidas são seguidas.

O próximo capítulo apresentará alguns algoritmos evolutivos que podem ser utilizados para a estimação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor de indução.

CAPÍTULO 3

ALGORITMO EVOLUTIVO

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os diversos tipos de algoritmos evolutivos que podem ser utilizados na resolução dos mais complexos problemas de engenharia. Será mostrado que esses algoritmos possuem as mesmas raízes dos algoritmos genéticos e poderá ser vista a similaridade entre ambos.

Dentre os diversos tipos de algoritmos evolutivos, será apresentado com mais detalhes a estratégia evolutiva, bem como um breve histórico a seu respeito e suas diversas variantes existentes. Também será apresentada a estratégia evolutiva canônica a partir da qual será desenvolvida a estratégia evolutiva específica para o problema de obtenção dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor de indução.

3.2. INTRODUÇÃO AOS ALGORITMOS EVOLUTIVOS

Conceitos de Computação Evolutiva têm sido empregados em uma variedade de disciplinas desde ciências naturais e engenharia até biologia e ciência da computação. A idéia básica, surgida nos anos 50, é aplicar o processo de evolução natural como um paradigma de solução de problemas, a partir de sua implementação em computador. Os problemas de otimização são aqueles que vêm recebendo mais contribuições a partir de técnicas de computação evolutiva. Muitos problemas de engenharia podem ser adequadamente apresentados como problemas de otimização [18].

A vantagem mais significativa da computação evolutiva está na possibilidade de resolver problemas pela simples descrição matemática do que se quer ver presente na solução, não havendo necessidade de se indicar explicitamente os passos até o resultado,

que certamente seriam específicos para cada caso. É lógico que os algoritmos evolutivos correspondem a uma sequência de passos até a solução, mas esses passos são os mesmos para uma ampla gama de problemas, fornecendo robustez e flexibilidade. Sendo assim, a computação evolutiva deve ser entendida como um conjunto de técnicas e procedimentos genéricos e adaptáveis, a serem aplicados na solução de problemas complexos, para os quais outras técnicas conhecidas são ineficazes ou nem sequer são aplicáveis.

A computação evolutiva é o nome utilizado para descrever a linha de pesquisa que trata os algoritmos evolutivos. A Computação Evolutiva está baseada em algumas idéias básicas que, quando implementadas, permitem simular em um computador o processo de passagem de gerações da evolução natural. As idéias que permitem esta simulação são as seguintes:

- A criação de uma população de soluções, possivelmente obtida na sua primeira geração de modo aleatório, e na qual os indivíduos tenham registrado de modo intrínseco os parâmetros que descrevem uma possível solução do problema posto.
- A criação de uma entidade chamada *função de avaliação* ou *fitness* capaz de julgar a aptidão de cada um dos indivíduos. Essa entidade não precisa deter conhecimento sobre como encontrar uma solução para o problema, mas apenas atribuir uma “nota” ao desempenho de cada um dos indivíduos da população.
- A criação de uma série de operadores que serão aplicados à população de uma dada geração para obter os indivíduos da próxima geração. Estes operadores são baseados nos fenômenos que ocorrem na evolução natural. Os principais operadores citados na literatura são: (i) *seleção*: permite escolher um indivíduo ou um par deles para gerar descendência. Note-se que este operador simula a reprodução assexuada (no primeiro caso) e sexuada (no segundo) que ocorrem na natureza. Obviamente, a prioridade da escolha recai sobre indivíduos mais bem avaliados pela função de avaliação; (ii) *recombinação* ou *crossover*: operador que simula a troca de material genético entre os ancestrais que, por sua vez, determina a carga genética dos descendentes; (iii) *mutação*: operador que realiza mudanças aleatórias no material genético.

O conceito chave na Computação Evolutiva é o de *adaptação*, que unifica a abordagem quanto ao método de solução: uma população inicial de soluções que evolui ao longo das gerações que são simuladas no processo em direção às soluções mais adaptadas, isto é, com maior valor da função de avaliação, por meio de operadores de seleção, mutação e recombinação.

O conjunto de soluções iniciais pode ser aleatório ou pode ser obtido a partir de técnicas convencionais para resolver instâncias mais simples do problema que está sendo tratado.

Para definir a função objetivo é necessário encontrar uma maneira de codificar as soluções para o problema que se quer resolver. O resultado dessa codificação corresponde aos cromossomos na evolução natural e é chamado de *genótipo*. A partir desses cromossomos, a função de avaliação deve ser capaz de determinar a qualidade da solução.

As novas soluções podem ser geradas a partir de uma única solução (reprodução assexuada) ou a partir de duas soluções (reprodução sexuada). Depois de criado um conjunto novo de soluções (os descendentes), estas sofrem a ação dos operadores evolutivos mediante os quais os descendentes passarão a ser diferentes dos ascendentes. No caso da reprodução sexuada, há troca de material genético (recombinação) entre dois ou mais indivíduos pais. Durante o processo reprodutivo os filhos não apenas herdam características de seu(s) pai(s), como eles também podem sofrer uma *mutação* genética responsável pela alteração de seu código genético. A avaliação dos indivíduos em seu ambiente através de uma função de avaliação ou *fitness* resulta em um valor correspondente à adaptabilidade, qualidade ou *fitness* deste indivíduo. A comparação dos valores individuais de *fitness* resultará em uma competição pela sobrevivência e reprodução no ambiente, havendo uma vantagem seletiva daqueles indivíduos com valores elevados de *fitness*.

Quando todo o processo acima tiver sido executado, diz-se que ocorreu uma *geração*. Tal processo é repetido várias vezes, ou seja, a população da geração inicial evolui e nas gerações seguintes obtêm-se indivíduos cada vez melhores ou mais adaptados ao meio

em que vivem. O melhor indivíduo da última geração será considerado a solução do problema.

3.3. OS PRINCIPAIS ALGORITMOS EVOLUTIVOS

Os sistemas baseados em computação evolutiva mantêm uma população de soluções potenciais, aplicam processos de seleção baseados na adaptação de um indivíduo e também empregam outros operadores “genéticos”. Diversas abordagens para sistemas baseados em evolução foram propostas, sendo que as principais diferenças entre elas dizem respeito aos operadores genéticos empregados, que serão mais bem detalhados na sequência. As principais abordagens propostas na literatura são apresentadas nos próximos parágrafos.

3.3.1. Algoritmos Genéticos

Os *algoritmos genéticos* foram introduzidos por J. Holland em 1975 [19] com o nome de *planos adaptativos* com o objetivo de formalizar matematicamente e explicar rigorosamente processos de adaptação em sistemas naturais e desenvolver sistemas artificiais (simulados em computador) que retivessem os mecanismos originais encontrados em sistemas naturais. Enfatizam a *recombinação* como principal operador de busca e aplicam *mutação* com baixas probabilidades (operador secundário). Operam com recombinação binária de indivíduos e possuem seleção probabilística proporcional ao *fitness* (implementado a partir de um algoritmo denominado de roleta).

Os algoritmos genéticos empregam os operadores de *crossover* e *mutação* (a serem apresentados mais adiante).

3.3.2. Programação Genética

Uma extensão dos algoritmos genéticos, denominada *programação genética*, foi introduzida por Koza [20] e tem por objetivo básico propiciar a evolução de programas de computador (evoluir algoritmos) usando os princípios da evolução natural. As estruturas de dados são representadas utilizando *árvores* e os operadores de *crossover* e *mutação* adaptados para operarem com estruturas do tipo árvore são empregados. O processo de seleção segue aquele dos algoritmos genéticos, ou seja, a seleção é probabilística e proporcional ao *fitness*.

3.3.3. Estratégias Evolutivas

As estratégias evolutivas constituem uma classe de algoritmos evolutivos, principalmente para resolver problemas de otimização de parâmetros. Elas foram desenvolvidas por Rechenberg [21], Schwefel [22] e Bienert na Universidade Técnica de Berlim por volta de 1964. Eles inicialmente trataram problemas de otimização em mecânica de fluidos, e em seguida passaram a tratar problemas de otimização de funções de forma mais genérica, focando-se no caso das funções reais. Os primeiros algoritmos da estratégia evolutiva operavam com um único indivíduo na população, sujeito a mutação e seleção. Uma idéia importante introduzida nos algoritmos mais recentes é a adaptação on-line (auto-adaptação) dos parâmetros da estratégia durante o processo evolutivo, através de sua introdução na representação genética dos indivíduos.

Atualmente, Estratégias Evolutivas (EE) são simbolicamente representadas por uma notação introduzida em 1977, por Schwefel. A abreviação $(\mu + \lambda)EE$ denota uma EE que gera λ indivíduos descendentes de μ indivíduos genitores, e seleciona, a cada geração, os μ melhores indivíduos do total de $\mu + \lambda$ indivíduos existentes, constituídos por genitores e descendentes.

Esta notação pode ser utilizada para representar a Estratégia Evolutiva Simples, conhecida por $(1 + 1)EE$, e a primeira Estratégia Evolutiva Multi-Membros, também

conhecida por $(\mu + 1)$ EE. Como esta última está em desuso, é convenção denominar uma Estratégia Evolutiva por $(\mu + \lambda)$ EE, de acordo com a relação $1 \leq \mu \leq \lambda < \infty$.

Por outro lado, a abreviação (μ, λ) EE denota uma Estratégia Evolutiva que gera λ indivíduos descendentes de uma população de μ indivíduos genitores e seleciona, a cada geração, μ indivíduos do total dos λ indivíduos descendentes. Contudo, já que a igualdade $\mu = \lambda$ representa, para o caso de um único indivíduo, um deslocamento aleatório pelo domínio da função objetivo, é convenção para este caso considerar a relação $1 \leq \mu < \lambda < \infty$.

O primeiro passo para a implementação de uma Estratégia Evolutiva é a determinação do processo de representação dos indivíduos, o qual promove a conexão entre o problema de fato e sua codificação. Não menos importante é a escolha da função objetivo a ser otimizada, pois através dela os indivíduos serão avaliados e posteriormente selecionados de forma a proporcionar, geração a geração, a adequação das variáveis objetivas à solução ótima local ou global [23].

A estrutura de uma Estratégia Evolutiva canônica pode ser descrita simplificada através da Figura 3.1, na qual são considerados μ indivíduos pais e λ indivíduos descendentes a cada geração. Todos os λ indivíduos descendentes são obtidos através dos processos de recombinação e mutação.

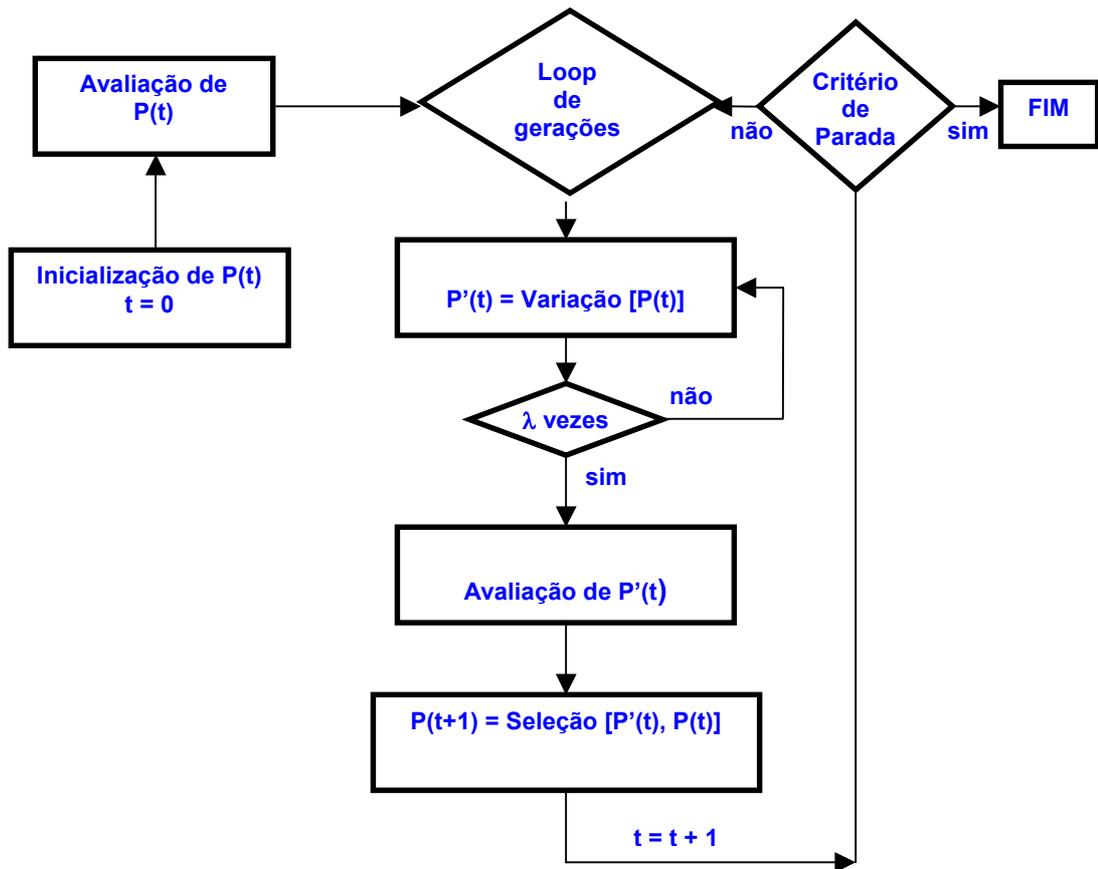


Figura 3.1. Estratégia Evolutiva canônica

Um indivíduo μ qualquer é composto por dois vetores de mesmo tamanho. O primeiro é $\vec{x} \in \mathcal{R}^n$, denominado vetor de variáveis objetivas, o qual representa todas as variáveis a serem otimizadas. O outro, $\vec{\sigma} \in \mathcal{R}^n$, denominado vetor de parâmetros estratégicos, representa o potencial de alteração das variáveis durante o processo de mutação.

A ideia básica em considerar variáveis e parâmetros estratégicos em um mesmo indivíduo é a de que a cada bom indivíduo encontrado durante o processo evolutivo, são encontrados também bons parâmetros estratégicos que o conduziram a esta posição de destaque. Em outras palavras, indivíduos bem avaliados possuem baixo potencial de alteração, uma vez que eles já estão bem adaptados ao meio em que vivem. Portanto, esses indivíduos devem sofrer pequenas alterações no processo evolutivo. Já indivíduos mal avaliados possuem grande potencial de alterações. Dessa forma, esses indivíduos podem apresentar grandes saltos no processo evolutivo.

O algoritmo canônico funciona basicamente da seguinte maneira:

1. Sorteiam-se aleatoriamente todos os primeiros μ indivíduos do tipo $(\vec{x}, \vec{\sigma})$, sendo \vec{x} o vetor de variáveis objetivas e $\vec{\sigma}$ o vetor de estratégias de evolução, pertencentes à população inicial $P(t)$, para a geração $t = 0$.
2. Avaliam-se todos os μ indivíduos da população inicial através da função objetivo $f(\vec{x})$.
3. São escolhidos aleatoriamente 2 ou mais indivíduos pertencentes à população de genitores para a Recombinação, da qual resulta um indivíduo descendente. A este indivíduo é aplicado o processo de *Mutação*, geralmente uma alteração de pequena proporção às variáveis objetivas do indivíduo. Este procedimento, também conhecido por *Variação*, é repetido λ vezes para a geração t .
4. Avaliam-se todos os λ indivíduos resultantes do processo de *Variação*, pertencentes a uma nova população $P'(t)$.
5. Selecionam-se os μ indivíduos melhores avaliados dentre a população de descendentes $P'(t)$ - (μ, λ) EE, ou da união desta com a população de genitores $P(t)$ - $(\mu + \lambda)$ EE.
6. Incrementa-se a geração t e repete-se o processo a partir do item 3, caso nenhum critério de parada tenha sido satisfeito.

A estratégia evolutiva utilizada neste trabalho é a Multi-membros (μ, λ) EE e o algoritmo evolutivo aplicado ao problema de obtenção dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor de indução será detalhado no próximo capítulo.

3.3.4. Programação Evolutiva

Formalizada por Fogel [25], a programação evolutiva enfatiza a mutação e não incorpora a recombinação. Assim como as Estratégias Evolutivas, quando aplicada a problemas de otimização de valores reais, a Programação Evolutiva também emprega mutações com distribuição normal e estende o processo evolutivo ao espaço de parâmetros. O operador de seleção é probabilístico e a maioria das aplicações atuais emprega vetores reais como codificação.

3.4. CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou os vários tipos de algoritmos evolutivos utilizados na resolução de complexos problemas de engenharia, como surgiram e quais as principais diferenças entre eles. De um modo geral, tais algoritmos utilizam operadores chamados recombinação, mutação e seleção em diversas proporções e de várias formas e visam a resolução de um problema a partir da evolução natural, fenômeno observado na evolução das espécies na natureza.

Dentre os algoritmos evolutivos, foram destacadas as estratégias evolutivas, bem como suas variantes, algoritmo que foi utilizado neste trabalho. Neste capítulo foi apresentada a forma canônica da estratégia evolutiva a partir da qual será desenvolvida uma estratégia evolutiva específica para o problema de obtenção dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor de indução. A estratégia evolutiva específica desenvolvida neste trabalho será apresentada no capítulo posterior.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE PARTIDA DE MOTORES

4.1. INTRODUÇÃO

Para possibilitar a análise do impacto de partida de motores de indução em redes de distribuição, será utilizado o circuito elétrico equivalente, o qual será amplamente apresentado neste capítulo e com o qual poderão ser obtidas as curvas características *Velocidade x Tempo*, *Corrente x Tempo* e *Conjugado x Escorregamento*.

Com o conhecimento da curva de corrente no tempo durante a partida do motor, será possível realizar um cálculo de fluxo de potência na rede de distribuição para cada instante de tempo pertencente ao período da partida. Dessa forma, será possível analisar as condições de sobrecarga dos trechos e subtensão das barras do sistema que alimenta o motor.

Um dos principais problemas para a aplicação de tal metodologia reside no fato de que não são conhecidos os parâmetros do circuito elétrico equivalente de um motor, os quais são geralmente obtidos por meio de ensaios. De um modo geral, são conhecidos apenas os dados fornecidos por seu fabricante. Assim, a obtenção dos parâmetros do circuito elétrico será realizada a partir dos dados de placa do motor com a utilização de um algoritmo evolutivo, o qual também será apresentado neste capítulo.

Este capítulo também abordará a representação da rede e da carga que será utilizada no cálculo de fluxo de potência das redes de distribuição.

4.2. MOTOR DE INDUÇÃO

O efeito da partida de grandes motores sempre foi um tema de interesse para os engenheiros de sistemas de potência e é por isso que se encontra na literatura uma significativa quantidade de pesquisas conduzidas nessa área produzindo uma grande variedade de modelos.

Vários tipos de modelos têm sido utilizados para estudar o comportamento dos motores de indução. Entre estes, diagramas vetoriais, equações diferenciais e circuitos equivalentes são os mais significativos [1].

Estudos estáticos e dinâmicos de motores de indução usualmente requerem o estabelecimento de um circuito elétrico equivalente.

Tem-se a seguir o circuito equivalente utilizado para o cálculo das características de motores de indução, tais como o torque [1].

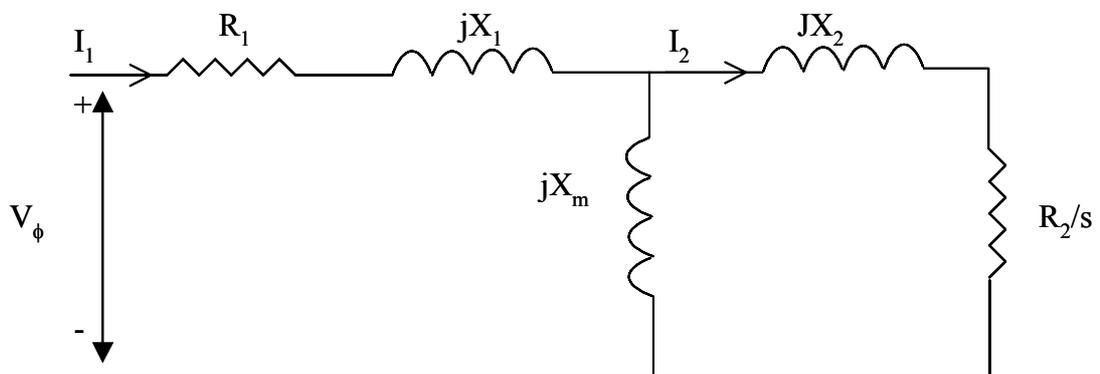


Figura 4.1. Circuito equivalente por fase do motor de indução

Sendo:

V_ϕ : Tensão de fase aplicada ao motor;

R_1 : Resistência do estator;

X_1 : Reatância do estator;

X_m : Reatância de magnetização;

R_2 : Resistência do rotor;

X_2 : Reatância do rotor;

s : Escorregamento.

É possível usar o circuito equivalente do motor de indução para encontrar uma expressão geral do torque induzido em função da velocidade.

O torque induzido no motor de indução é dado pela equação

$$\tau_{in} = \frac{P_{AG}}{\omega_{Sinc}} \quad (4.1)$$

sendo P_{AG} a potência no entreferro e ω_{Sinc} a velocidade síncrona do motor.

Do circuito equivalente da Figura 4.1, a potência no entreferro fornecida por uma fase do motor pode ser vista como:

$$P_{AG,1\phi} = \frac{I_2^2 R_2}{s} \quad (4.2)$$

Portanto, a potência total no entreferro é

$$P_{AG} = \frac{3I_2^2 R_2}{s} \quad (4.3)$$

sendo I_2 a corrente no rotor, R_2 a resistência do rotor e s o escorregamento.

Se I_2 for determinada, a potência no entreferro também poderá ser conhecida. Existem diferentes formas de resolver o circuito da Figura 4.1. Talvez a mais simples seja determinar o equivalente de Thévenin de uma parte do circuito. Fazendo isso com o circuito equivalente do motor de indução, o circuito resultante pode ser uma simples combinação série de elementos, como é mostrado na Figura 4.2.

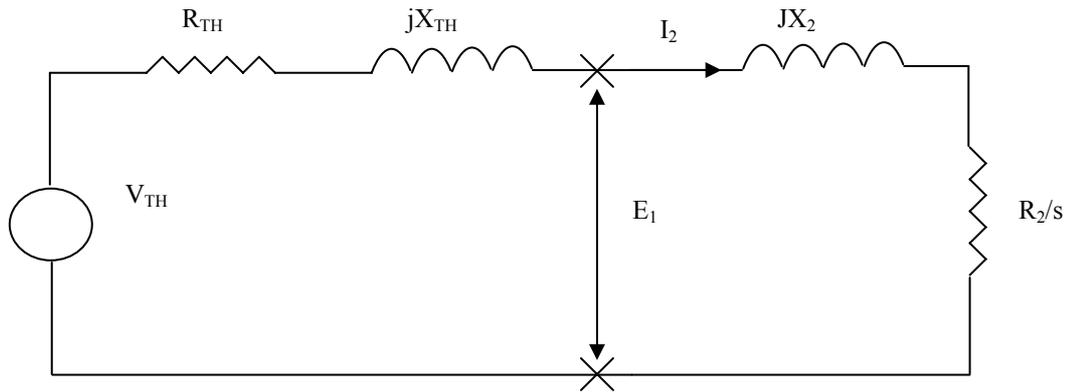


Figura 4.2. Circuito equivalente simplificado para um motor de indução

A magnitude da tensão de Thévenin V_{TH} é:

$$V_{TH} = V\phi \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (4.4)$$

Desde que a reatância de magnetização $X_M \gg X_1$ e $X_M \gg R_1$, a magnitude da fonte de Thévenin [1] será aproximadamente:

$$V_{TH} = V\phi \frac{X_M}{X_1 + X_M} \quad (4.5)$$

O valor de R_1 é considerado desprezível comparado com o valor de X_M , levando à simplificação anterior, já que dentro do radical ficaria somente a expressão $(X_1 + X_M)^2$.

A Figura 4.3 mostra o circuito de entrada com a fonte de tensão de entrada curto-circuitada.

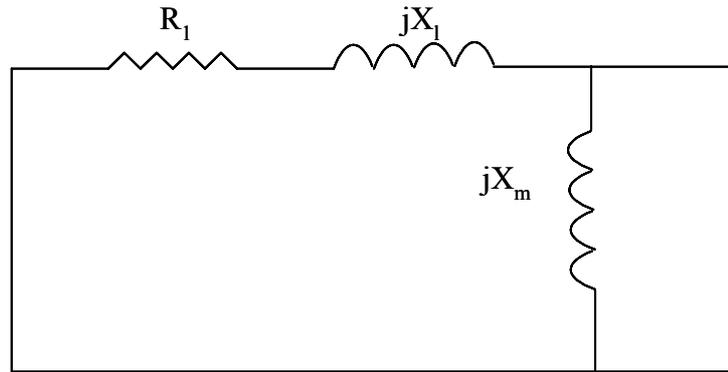


Figura 4.3. Impedância equivalente de Thévenin do circuito de entrada

A impedância de Thévenin, em função das impedâncias em paralelo, é dada por

$$Z_{TH} = \frac{Z_1 Z_M}{Z_1 + Z_M} \quad (4.6)$$

Essa impedância é reduzida para

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (4.7)$$

Considerando que $X_M \gg X_1$ e $X_M + X_1 \gg R_1$, a resistência e a impedância são dadas aproximadamente por:

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right) \quad (4.8)$$

$$X_{TH} = X_1 \quad (4.9)$$

O circuito equivalente resultante é o mostrado na Figura 4.2. Neste circuito, a corrente I_2 é dada por:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} \quad (4.10)$$

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_2 / s + jX_{TH} + jX_2} \quad (4.11)$$

e a magnitude da corrente será:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2 / s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (4.12)$$

A potência no entreferro é então dada por:

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (4.13)$$

$$P_{AG} = \frac{3V_{TH}^2 R_2 / s}{(R_{TH} + R_2 / s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (4.14)$$

Substituindo (4.1) em (4.14), tem-se:

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2 / s}{\omega_{\sin c} [(R_{TH} + R_2 / s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]} \quad (4.15)$$

4.2.1. Obtenção do Circuito Elétrico Equivalente a partir dos Dados de Placa

Um dos principais problemas para se utilizar o circuito elétrico equivalente descrito no item anterior reside no fato de que os parâmetros de tal circuito são obtidos por meio de ensaios e dificilmente são disponibilizados pelos fabricantes de motores. Por outro lado, os fabricantes disponibilizam uma série de outras informações nos dados de placa a partir das quais é possível obter os parâmetros desejados.

Goldemberg desenvolveu uma metodologia para obter os parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor a partir de seus dados de placa [2]. A metodologia envolve um

cálculo analítico e um cálculo numérico de extrema complexidade, que por sua vez, envolve cálculo de matrizes hessianas tendo como ponto de partida o conhecimento dos fenômenos físicos que ocorrem no motor. Neste trabalho, os conhecimentos apresentados por Goldemberg serão combinados com outras estratégias para a obtenção desses parâmetros.

Para a obtenção dos parâmetros do circuito elétrico equivalente será considerada a variação de alguns parâmetros, tais como a resistência do rotor e as reatâncias do estator e do rotor, cujo cálculo é exposto nos itens seguintes. Além disso, os parâmetros elétricos serão obtidos não de forma analítica e sim usando Algoritmos Evolutivos. A metodologia do cálculo dos parâmetros com algoritmos evolutivos será abordada em um dos itens seguintes, a qual tem como base os conhecimentos apresentados por Goldemberg. Depois de obter os parâmetros elétricos do motor, eles são utilizados como dados de entrada do método desenvolvido para a análise dinâmica do motor.

4.2.1.1. Parâmetros Variáveis

O circuito equivalente simplificado apresentado no item 4.2 desconsidera a variação dos parâmetros R_2 , X_1 , X_2 que variam de R_2 a $(R_2 + \Delta R_2(s))$, de X_1 a $(X_1 + \Delta X_1)$ e de X_2 a $(X_2 + \Delta X_2)$. Tais variações ocorrem devido a dois fenômenos físicos presentes nos motores de indução: o efeito pelicular e a saturação do núcleo.

Para representar as variações desses parâmetros, são procuradas funções de interpolação entre os valores limites mencionados acima, uma vez que não são dadas (nos catálogos dos fabricantes) informações que possam indicar leis de variação destes parâmetros.

Essas funções de interpolação deverão ter como variável independente unicamente o escorregamento s .

Conseqüentemente, o circuito do motor de indução passará a ser representado pelo circuito apresentado na Figura 4.4, que combina os circuitos válidos para condições próximas à região nominal de operação e para as condições de partida.

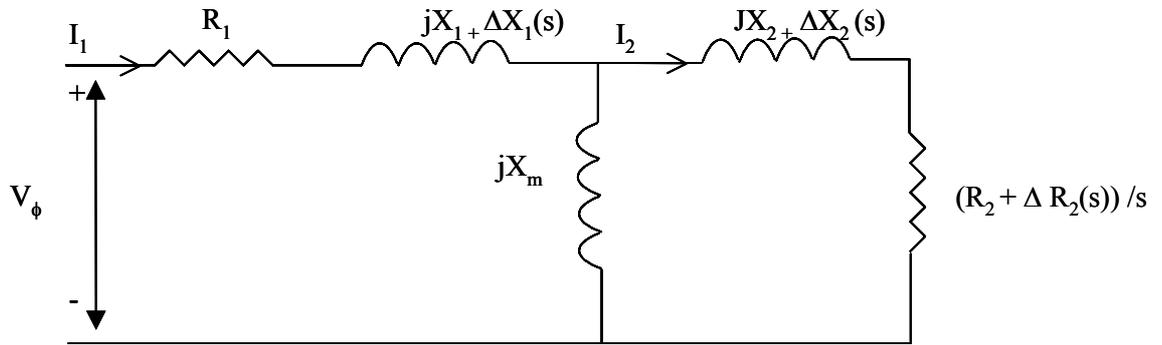


Figura 4.4. Circuito Equivalente para motor de indução considerando parâmetros variáveis

4.2.1.2. Leis de Variação de ΔR_2 e de ΔX_2

A resistência R_2 é afetada pelo efeito pelicular. Tal efeito depende da geometria, do material das barras do rotor, da temperatura e da frequência das correntes no rotor. A reatância X_2 depende do efeito pelicular e também da saturação [2].

Goldemberg assumiu um ponto de vista pragmático supondo que a variação ΔR_2 é uma função apenas do escorregamento s dada pela equação:

$$\Delta R_2 = \Delta R_2(1) * |s|^{3/2} \tag{4.16}$$

A reatância X_2 depende do efeito pelicular e também da saturação. Como não se têm as informações para estabelecer quanto de ΔX_2 é devido a cada um desses efeitos, assume-se que a combinação deles pode ser expressa como função apenas do escorregamento, sendo dada por:

$$\Delta X_2 = \Delta X_2(1) * (1 - e^{-5|s|})^2 \tag{4.17}$$

4.2.2. Algoritmo Evolutivo Implementado

O Algoritmo Evolutivo utilizado funciona da seguinte maneira:

1. Sorteiam-se aleatoriamente todos os primeiros μ indivíduos do tipo $(\vec{x}, \vec{\sigma})$, sendo \vec{x} o vetor de variáveis objetivas e $\vec{\sigma}$ o vetor de estratégias de evolução, pertencentes à população inicial $P(t)$, para a geração $t = 0$.
2. Avaliam-se todos os μ indivíduos da população inicial através da função objetivo $f(\vec{x})$.
3. Todos os μ indivíduos da população $P(t)$ sofrem n mutações, sendo que cada mutação produz um indivíduo descendente. Nesta etapa, $P'(t)$ conta com $n \cdot \mu$ indivíduos.
4. Com certa probabilidade M , são escolhidos aleatoriamente 2 indivíduos pertencentes a população de genitores $P(t)$ para a Recombinação, da qual resulta um indivíduo descendente acrescentado à população $P'(t)$. Este procedimento é repetido μ vezes, uma para cada par de indivíduos de $P(t)$.
5. Avaliam-se todos os λ indivíduos resultantes do processo de *Varição*, pertencentes a uma nova população $P'(t)$. É importante ressaltar que λ pode variar de acordo com as ocorrências de recombinação, sendo $n \cdot \mu \leq \lambda \leq (n \cdot \mu) + \mu$.
6. Selecionam-se os μ indivíduos melhores avaliados da união da população $P'(t)$ com a população de genitores $P(t)$, através do esquema similar ao (μ, k, λ) EE, descartando-se os indivíduos cuja idade ultrapassou k gerações.
7. Incrementa-se a geração t e repete-se o processo a partir do item 3, caso t não tenha excedido o número máximo de gerações.

Na escolha da forma básica de funcionamento do algoritmo proposto, são importantes as seguintes considerações:

1. O algoritmo proposto deve ter representação real, já que esta característica elimina a necessidade de codificação e decodificação de variáveis.
2. O algoritmo deve utilizar o processo de mutação com auto-adaptação para tornar a busca por soluções mais eficiente e, ainda, indicar convergência para que possíveis critérios de parada possam ser empregados.
3. Da mesma forma que no Algoritmo Genético básico, é interessante ao Algoritmo Evolutivo proposto que os processos de mutação e recombinação sejam independentes, não impondo, por exemplo, que a mutação ocorra somente aos indivíduos recombinados, como na EE canônica. A recombinação produz indivíduos novos, que concorrerão com indivíduos mutados.
4. O processo de mutação pode ocorrer n vezes para cada indivíduo genitor, tornando a variação em torno de um único indivíduo mais ampla, resultando assim, em mais opções de busca pela direção de melhor aproximação da solução.
5. O processo de seleção pode ser idêntico ao esquema (μ, k, λ) EE, já que este possui, ao mesmo tempo, características elitistas e um mecanismo que inibe a estagnação precoce em máximos ou mínimos locais.

Estas considerações delimitam o desenvolvimento do algoritmo proposto a um AE com processos de representação, mutação, recombinação e seleção derivados basicamente da Estratégia Evolutiva canônica, diferenciando-se na forma como o processo evolutivo será conduzido. A Figura 4.5 ilustra como será o algoritmo proposto.

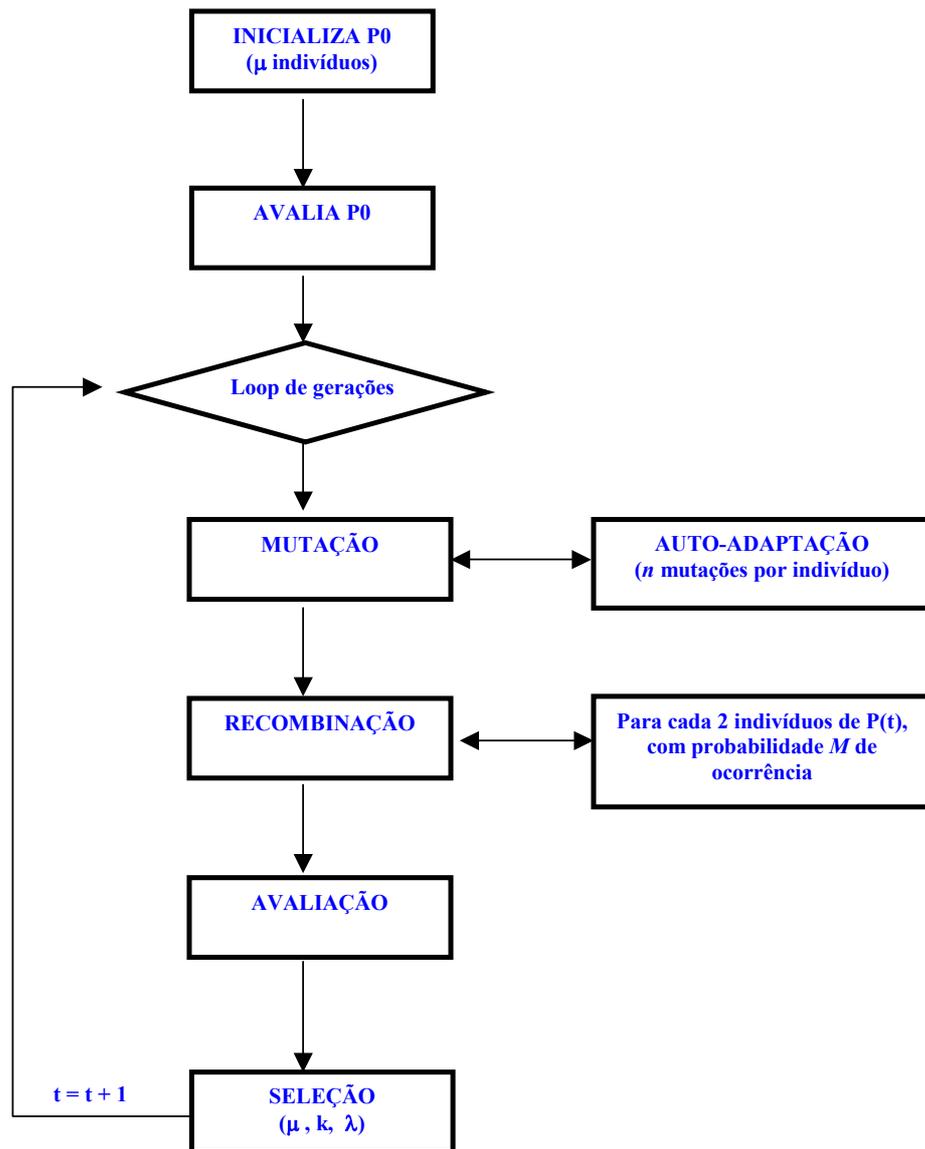


Figura 4.5. Algoritmo Evolutivo proposto

Para o caso específico do motor de indução, os genes de cada indivíduo serão os parâmetros do circuito elétrico equivalente, conforme mencionado anteriormente: R_1 , X_1 , R_2 , X_2 , R_M , X_M , ΔR_2 e ΔX_2 .

4.2.3. Função Objetivo

Geralmente, os problemas a serem resolvidos com os algoritmos evolutivos residem na necessidade de encontrar o máximo ou o mínimo de uma função objetivo. No caso específico da determinação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor de

indução, a função objetivo proposta visa relacionar da melhor forma possível os parâmetros que devem ser encontrados com os dados que se possuem. Essa função representa o somatório dos desvios das características do motor calculadas a partir do circuito elétrico equivalente com relação aos dados de placa. As diferenças entre os dados calculados e os dados de placa são elevadas ao quadrado, de forma que o problema a ser resolvido é encontrar o mínimo da função objetivo, ou seja, o menor erro com relação aos dados de placa.

A função objetivo é definida por:

$$f_{Objetivo} = [(T_{NomPlaca} - T_{NomCalc})^2 + (T_{75Placa} - T_{75Calc})^2 + (T_{50Placa} - T_{50Calc})^2 + (T_{PartidaPlaca} - T_{PartidaCalc})^2 + (T_{maxPlaca} - T_{maxCalc})^2 + (I_{NomPlaca} - I_{NomCalc})^2 + (I_{75Placa} - I_{75Calc})^2 + (I_{50Placa} - I_{50Calc})^2 + (I_{PartidaPlaca} - I_{PartidaCalc})^2] / 9 \quad (4.18)$$

na qual:

$T_{NomPlaca}$: Torque nominal ou a plena carga (placa);

$T_{NomCalc}$: Torque nominal ou a plena carga (calculado);

$T_{75Placa}$: Torque a 75% da carga (placa);

T_{75Calc} : Torque a 75% da carga (calculado);

$T_{50Placa}$: Torque a 50% da carga (placa);

T_{50Calc} : Torque a 50% da carga (calculado);

$T_{PartidaPlaca}$: Torque de partida (placa);

$T_{PartidaCalc}$: Torque de partida (calculado);

$T_{maxPlac}$: Torque máximo (placa);

$T_{maxCalc}$: Torque máximo (calculado);

$I_{NomPlaca}$: Corrente nominal ou a plena carga (placa);

$I_{NomCalc}$: Corrente nominal ou a plena carga (calculada);

$I_{75Placa}$: Corrente a 75% da carga (placa);

I_{75Calc} : Corrente a 75% da carga (calculada);

$I_{50Placa}$: Corrente a 50% da carga (placa);

I_{50Calc} : Corrente 50% da carga (calculada);

$I_{PartidaPlaca}$: Corrente de partida (placa);

$I_{PartidaCalc}$: Corrente de partida (calculada).

Os dados de placa são fornecidos pelo fabricante do motor. Já os dados calculados são obtidos a partir dos parâmetros do circuito elétrico equivalente e das expressões associadas a ele. Explicando com outras palavras, o algoritmo evolutivo fará a simulação da evolução de uma população de indivíduos. Cada indivíduo da população é composto pelos genes R_1 , X_1 , R_2 , X_2 , R_M , X_M , ΔR_2 e ΔX_2 , que são as variáveis que se deseja encontrar. Tais variáveis são os parâmetros do circuito elétrico equivalente. A partir da expressão (4.15), é possível calcular os torques de partida máximo e nominal e compará-los com os dados de placa, calculando o valor da função objetivo. Se a função objetivo resultar em um valor alto (desvio alto), o indivíduo analisado não representa bem o motor de indução. Caso contrário, se a função objetivo resultar em um valor baixo (desvio baixo), o indivíduo analisado representa bem o motor de indução, ou seja, as características dele se aproximam das características anunciadas pelo fabricante. Nesse caso os genes desse indivíduo serão os parâmetros do circuito elétrico que se deseja encontrar.

É importante observar que os dados calculados permitirão avaliar todos os indivíduos da população, os quais são caracterizados por seus genes (parâmetros do circuito elétrico equivalente). Como os genes de cada indivíduo (genótipo) guardam uma relação com suas características físicas (fenótipo), é avaliando os dados calculados que será possível encontrar o indivíduo que minimiza o valor da função objetivo.

Os termos escolhidos para fazer parte da função objetivo estão relacionados diretamente com os parâmetros elétricos a serem estimados. O torque é influenciado fortemente por R_1 , R_2 , X_1 , X_2 , X_M . A corrente, além de estar influenciada por todos os parâmetros anteriores, também é fortemente influenciada por R_M .

A simulação do algoritmo evolutivo será realizada com os seguintes dados:

- Número de gerações: 1000;
- Número de indivíduos por geração: 50;
- Número de locos (parâmetros): 8;
- Probabilidade de cruzamentos: 0,5;
- Idade máxima dos indivíduos: 200;

- Probabilidade de Mutação: 1,0;
- Mutações por indivíduo: 20.

A Figura 4.6 apresenta um indivíduo típico composto por seus *loci* (genes).

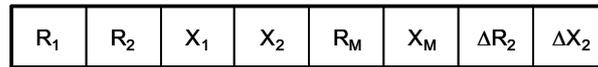


Figura 4.6. Indivíduo típico

4.3. REPRESENTAÇÃO DA REDE E DA CARGA

Para realizar o cálculo elétrico na rede, parte-se do princípio de que a rede é radial, e representa-se a rede trecho a trecho. A representação trifásica da rede, isto é, através dos condutores de fase e de neutro (fases A, B, C e neutro N), permite que seja avaliado o possível impacto das cargas sobre a rede, considerando os desequilíbrios inerentes da carga e da rede. Alguns modelos mais simples, dependendo do fenômeno, podem utilizar uma representação simplificada da rede, por meio, por exemplo, do diagrama de sequência positiva da rede.

Assim, de forma a tratar os desequilíbrios da carga e da rede, o cálculo elétrico da rede será feito através de fluxo de potência trifásico, com a utilização da metodologia de curvas de carga e o respectivo estabelecimento das grandezas elétricas em intervalos predefinidos [26-29]. As curvas de carga disponíveis (curvas típicas de carga classificadas por classes de consumo e faixas de consumo) podem apresentar intervalos de 5 minutos, 15 minutos ou 1 hora, porém o cálculo será feito para número limitado de patamares. No caso do sistema de gerenciamento de redes de distribuição ou mesmo para estudos de planejamento de redes, é usual o estabelecimento de número menor de patamares, por exemplo, quatro patamares de carga, relativos aos períodos diários da madrugada, manhã, tarde e noite. Este é o caso típico de análise de cargas especiais no sistema elétrico, que podem apresentar ciclos de carga distintos ao longo do dia.

Para a atribuição da carga às fases da rede primária, são necessários os dados de carregamento dos transformadores de distribuição, dos consumidores primários e da carga de iluminação pública. Para o cálculo do fluxo de potência, é necessário ainda se dispor dos dados de bancos de capacitores, ou seja, ponto de conexão à rede, potência nominal e período de utilização ao longo do dia.

4.3.1. Representação dos Trechos de Rede

Para o cálculo elétrico da rede primária, os trechos de rede serão representados pelo modelo de linha curta, através da obtenção da matriz de impedâncias de cada trecho.

O cálculo dos elementos da matriz de impedâncias será feito adotando-se as seguintes hipóteses:

- circuito com até 3 condutores de fase (A, B, C) e neutro (N), sem transposição;
- condutores singelos;
- neutro aterrado no início do circuito.

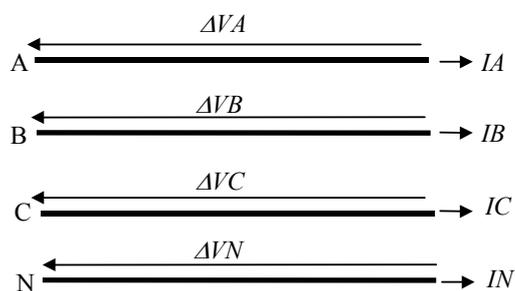
Para o cálculo das impedâncias próprias e mútuas, será utilizado o método das imagens. Os seguintes dados são necessários:

- configuração dos condutores no poste (altura de cada condutor em relação ao solo e distâncias entre os condutores A, B, C, N, em m);
- resistência ôhmica de cada condutor, para uma temperatura de referência, em ohm/km;
- raio médio geométrico (RMG) de cada condutor, em m;
- comprimento do trecho, em m.

Com estes dados, são calculados os valores de impedâncias próprias e mútuas, considerando-se nula a resistividade elétrica do solo [29].

Assim, é possível obter a matriz de impedâncias para cada trecho de rede (Figura 4.7) e, a partir dela, calculam-se as quedas de tensão conforme a equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_A \\ \Delta V_B \\ \Delta V_C \\ \Delta V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} & Z_{AN} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} & Z_{BN} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} & Z_{CN} \\ Z_{NA} & Z_{NB} & Z_{NC} & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_N \end{bmatrix} \quad (4.19)$$



///

Figura 4.7. Trecho de rede primária

A equação (4.19) relaciona as quedas de tensão dos elementos de fase e de neutro para um dado trecho da rede, em função das correntes correspondentes. Pela utilização deste equacionamento, é possível avaliar o impacto de redes assimétricas e com cargas trifásicas não equilibradas, como é o caso mais geral dos sistemas de distribuição, sobre o cálculo elétrico, avaliando-se principalmente os desequilíbrios de corrente e tensão correspondentes, por trecho e barra, respectivamente.

4.3.2. Representação da Carga

Para cada transformador de distribuição ou estação transformadora (ET), deverão ser obtidas as correntes, de cada fase e de neutro, no lado de baixa tensão, e refletidas convenientemente para o lado de média tensão.

As correntes no lado de baixa tensão da ET são calculadas a partir das demandas instantâneas dos consumidores secundários e da tensão nominal da rede secundária. Para atribuir as correntes às fases e neutro, são assumidas as seguintes hipóteses:

- Consumidores ligados a duas fases e neutro: carga igualmente distribuída entre as duas fases e neutro. Isto implica corrente de neutro igual (em módulo) à corrente de cada fase, para ET triângulo-estrela, e igual a zero para ET em delta.
- Consumidores ligados a três fases e neutro: carga trifásica equilibrada. Neste caso, a corrente de neutro é zero para qualquer ligação da ET, desde que as tensões aplicadas ao consumidor estejam equilibradas. Caso haja desequilíbrio nessas tensões, haverá corrente de neutro mesmo que a carga seja equilibrada.

Para refletir as correntes para o lado de média tensão, são necessárias as seguintes informações de cada ET:

- tipo da ET: monofásica, trifásica (triângulo no primário e estrela aterrada no secundário), banco em delta aberto ou delta fechado;
- fases de ligação nos lados de média e baixa tensão;
- tensões nominais nos lados de média e baixa tensão.

A Figura 4.8 ilustra o procedimento para a obtenção das correntes no lado de média tensão de uma ET trifásica na ligação triângulo-estrela.

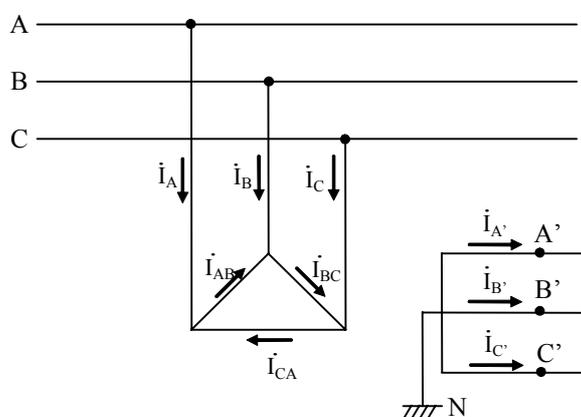


Figura 4.8. Correntes nos lados de baixa e média tensão

Para ilustrar o cálculo de demanda diversificada (contribuição de consumidor específico em uma ET) de um consumidor trifásico, considera-se conhecido o valor do seu consumo mensal típico. A partir deste consumo e a partir de sua curva de carga típica (obtida de acordo com sua faixa de consumo e classe de consumo), podem ser obtidos os valores de demanda em kW do consumidor para diferentes instantes do dia. Supondo ainda que este consumidor seja residencial e tenha consumo de 300 kWh (pertence ao estrato de 200 a 400 kWh mensais), pode-se utilizar a curva típica normalizada em pu da demanda média como, por exemplo, a curva típica apresentada na Figura 4.9 e transformá-la para kW, multiplicando todos os valores pelo fator multiplicativo (demanda média no mês).

$$D_{med} = \frac{300 \text{ kWh}}{30 * 24h} = 0,417 \text{ kW}.$$

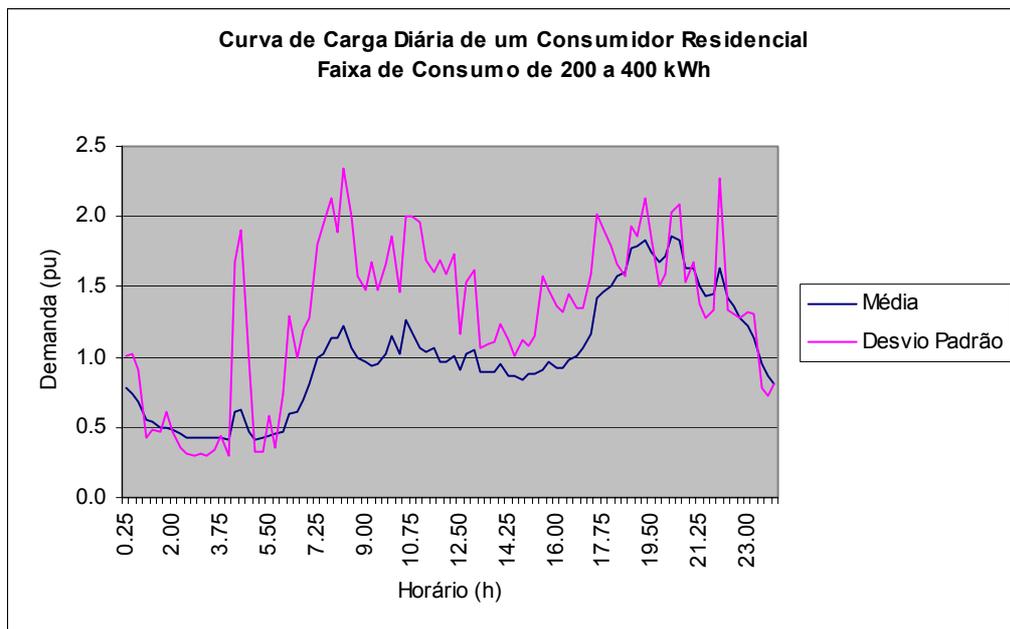


Figura 4.9. Curva de Carga – Consumidor Residencial

Para um determinado instante de tempo t , sejam os seguintes valores de potência obtidos conforme o equacionamento acima, nas fases A', B' e C', respectivamente:

- fase A: P_A , $\cos \varphi_A$ [kW];
- fase B: P_B , $\cos \varphi_B$ [kW];

➤ fase C: P_C , $\cos \varphi_C$ [kW].

Sendo V_{M1} e V_{N2} as tensões nominais (valores de linha) dos lados de média e baixa tensão da ET, respectivamente, resultam para as correntes do lado de baixa tensão os valores:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{A'} &= \frac{P_A}{V_{N2}/\sqrt{3}} \left| \underline{-\varphi_A} \right. \\ \dot{I}_{B'} &= \frac{P_B}{V_{N2}/\sqrt{3}} \left| \underline{-120 - \varphi_B} \right. \quad [\text{A}] \\ \dot{I}_{C'} &= \frac{P_C}{V_{N2}/\sqrt{3}} \left| \underline{120 - \varphi_C} \right. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Para a obtenção destes valores de corrente, foram assumidos os seguintes valores de tensões no lado de baixa tensão do transformador:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{A'N} &= \frac{V_{N2}}{\sqrt{3}} \left| \underline{0^\circ} \right. \\ \dot{V}_{B'N} &= \frac{V_{N2}}{\sqrt{3}} \left| \underline{-120^\circ} \right. \quad [\text{V}] \\ \dot{V}_{C'N} &= \frac{V_{N2}}{\sqrt{3}} \left| \underline{120^\circ} \right. \end{aligned} \quad (4.21)$$

Considerando-se o transformador ideal, com este único consumidor, resultam os seguintes valores de fase no lado de média tensão da ET:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{AB} &= \dot{I}_{A'} \left(\frac{V_{N2}/\sqrt{3}}{V_{M1}} \right) = \frac{P_A}{V_{M1}} \left| \underline{-\varphi_A} \right. \\ \dot{I}_{BC} &= \dot{I}_{B'} \left(\frac{V_{N2}/\sqrt{3}}{V_{M1}} \right) = \frac{P_B}{V_{M1}} \left| \underline{-120 - \varphi_B} \right. \quad [\text{A}] \\ \dot{I}_{CA} &= \dot{I}_{C'} \left(\frac{V_{N2}/\sqrt{3}}{V_{M1}} \right) = \frac{P_C}{V_{M1}} \left| \underline{120 - \varphi_C} \right. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Finalmente, os valores de linha no lado de média tensão são obtidos por:

$$\begin{aligned}I_A &= I_{AB} - I_{CA} \\I_B &= I_{BC} - I_{AB} \\I_C &= I_{CA} - I_{BC}\end{aligned}\tag{4.23}$$

Os consumidores de média tensão serão representados por curvas de carga disponibilizadas em função das demandas contratadas.

A presença de carga de Iluminação Pública (IP), suprida por transformador exclusivo ligado à rede primária, será representada por uma carga de valor constante, em kW, nas fases e nos períodos indicados, conforme informações existentes nos dados adquiridos da base de dados.

Os bancos de capacitores serão representados por uma carga trifásica equilibrada de valor constante, obtido pelos seus valores nominais de potência e tensão, nos períodos indicados nos dados adquiridos da base de dados.

4.3.3. Cálculo de Correntes e Tensões

Para o cálculo das correntes por fase nos trechos de rede e das tensões nas barras será utilizado o Método “Pai-Filho”, convenientemente estruturado para o tratamento de redes radiais.

Para uma rede radial, existe uma correspondência biunívoca entre barras e trechos. Considerando-se o sentido do fluxo de potência, dada uma barra qualquer, existe um único trecho que a precede, e dado um trecho qualquer, existe uma única barra terminal do mesmo.

Todas as cargas da rede (consumidores primários, transformadores de distribuição e iluminação pública) podem ser modeladas como cargas de corrente constante, potência constante ou impedância constante com a tensão.

As correntes nas fases e no neutro de todos os trechos de rede e as tensões em todas as barras são obtidas através dos seguintes passos:

- i. Calculam-se as correntes injetadas em todas as barras de carga (consumidores primários, transformadores de distribuição, iluminação pública e bancos de capacitores), por fase, utilizando os modelos de carga especificados pelo usuário (corrente, potência ou impedância constante), considerando-se que todas as barras estejam com a tensão nominal do circuito;
- ii. Partindo-se das barras terminais da rede, percorre-se uma lista ordenada de trechos, em direção ao início do alimentador, acumulando-se as correntes de cada trecho, por fase, no trecho imediatamente a montante, conforme ilustrado na Figura 4.10.

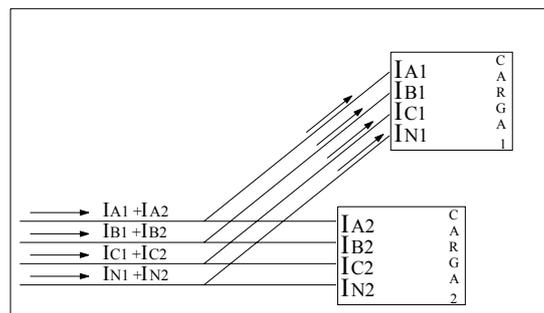


Figura 4.10. Cálculo de Corrente em um Trecho a Partir das Cargas a Jusante

- iii. Para cada trecho de rede, calculam-se as quedas de tensão, por fase, através da equação 4.19;
- iv. Partindo-se da barra inicial da rede, na saída da subestação, calculam-se as quedas de tensão acumuladas até cada uma das barras da rede, por fase, a partir dos valores de queda de tensão calculados no passo anterior;
- v. Repetem-se os passos i a iv corrigindo as correntes injetadas no item i e repetindo-se os processos dos itens ii, iii e iv até convergir em um valor de tensão, em cada barra e em cada fase, que respeite a tolerância predeterminada.

Através do procedimento acima de cálculo de fluxo de potência, avaliam-se os seguintes parâmetros elétricos:

- Tensões em todos os nós da rede, entre fases, e fase-neutro;
- Correntes em todos os trechos da rede, nos condutores das três fases e no neutro;
- Carregamento total da rede;
- Queda de tensão máxima na rede, que é o valor da mínima tensão na rede em questão.

A metodologia acima descrita pode ser aplicada para as redes de média tensão e para as redes de baixa tensão.

Para isso, conforme descrito para a média tensão são necessárias informações referentes à topologia da rede secundária, impedâncias dos transformadores de distribuição, trechos e pontos notáveis do sistema.

A diferença entre os dois métodos está no cálculo da demanda para os pontos de entrega, onde se concentram as conexões das cargas na rede secundária, ao invés do cálculo da demanda para os transformadores no caso da rede primária.

Ainda baseando-se nas curvas de carga típicas dos consumidores da baixa tensão, constroem-se as curvas diversificadas dos pontos de entrega somando-se os valores médios de cada demanda temporal para cada consumidor ligado ao mesmo ponto. Ou seja, através dos valores da energia medida para cada consumidor, obtém-se uma curva de carga, a qual fará parte da curva diversificada, ponto a ponto, do ponto de entrega em questão.

Uma vez que são conhecidas as fases de ligação dos diversos consumidores nos pontos de entrega, podem ser avaliadas as correntes de carga, por fase, permitindo o cálculo de quedas de tensão e correntes nos trechos, por fase.

Desta forma, também são avaliadas as correntes por fase no início da rede secundária, o que possibilita o cálculo de carregamento dos transformadores de distribuição (monofásicos, trifásicos, ou em bancos de monofásicos) e suas quedas de tensão.

4.3.4. Cálculo de Perdas nos Trechos de Rede

Conforme descrito anteriormente, o módulo de fluxo de potência, tanto para as redes de média tensão, como para as redes de baixa tensão, calcula as correntes (nas fases e no neutro) nos trechos elétricos, o que por sua vez, possibilita o cálculo da potência de perdas nos quatro patamares diários. As equações a seguir explicitam o cálculo das perdas em trechos da rede secundária ou primária, em um dado patamar de carga (madrugada, manhã, tarde e noite), em W :

$$P_{trecho}(pat) = r_A \cdot (I_A)^2 + r_B \cdot (I_B)^2 + r_C \cdot (I_C)^2 + r_N \cdot (I_N)^2 \quad (4.24)$$

sendo:

- r_A : resistência da fase A, em ohms;
- r_B : resistência da fase B, em ohms;
- r_C : resistência da fase C, em ohms;
- r_N : resistência de Neutro, em ohms;
- I_A : corrente na fase A, em ampères;
- I_B : corrente na fase B, em ampères;
- I_C : corrente na fase C, em ampères;
- I_N : corrente no Neutro, em ampères;
- pat : patamar de cálculo.

4.4. CÁLCULO ELÉTRICO DO MOTOR DURANTE A PARTIDA

Neste item, será apresentada a metodologia para levantar a curva *velocidade x tempo* do motor de indução, utilizada para os estudos de caso que serão realizados neste trabalho.

Para analisar a partida do motor, é preciso conhecer sua curva de corrente no tempo durante a partida. Para isso, é fundamental o conhecimento da curva de velocidade no tempo, pois a corrente durante a partida depende do escorregamento e o escorregamento depende da velocidade desenvolvida pelo motor. Portanto, o conhecimento da curva de velocidade leva ao conhecimento da curva de corrente.

Para levantar tal curva, parte-se da equação diferencial que relaciona torque e velocidade, dada pela expressão:

$$\tau_{ind} - \tau_{res} = \frac{1}{J} \frac{d\omega}{dt} \quad (4.25)$$

sendo τ_{res} o torque resistente e J o momento de inércia do conjunto motor-carga.

A equação diferencial acima é resolvida numericamente. Um dos métodos de integração numérica existentes é o Método dos Trapézios, o qual consiste em aproximar uma função $f(x)$ qualquer por segmentos de reta, aproximando a área abaixo da função por trapézios adjacentes.

No caso da aceleração do motor, a função a ser estudada é a função $\omega(t)$, conforme ilustrada na Figura 4.11, ou seja, é a velocidade em função do tempo.

Partindo-se da condição inicial, em $t = 0$, o motor está parado e, portanto $\omega = 0$. Ao aplicar a tensão da rede no motor, tem-se que o escorregamento inicial é $s = 1,0$. A partir das equações do motor, é possível calcular o torque induzido para escorregamento unitário. Supõe-se que o torque resistente também é conhecido. Assim, para saber qual a variação de velocidade $\Delta\omega$ em um determinado intervalo de tempo Δt , basta utilizar a expressão (4.25) que relaciona o torque e a velocidade do motor.

No entanto, como pode ser observado na Figura 4.11, a área do trapézio não é exatamente igual à área da função $\omega(t)$ no intervalo de tempo especificado. O Método dos Trapézios apresenta um erro em cada passo de integração que se soma aos erros dos

passos subseqüentes de integração. Para eliminar esse problema, é utilizada uma variante do Método dos Trapézios conhecida como o Método Modificado de Euler [30].

No caso específico do problema da partida do motor, a variação de velocidade no intervalo especificado foi obtida a partir do torque induzido para escorregamento unitário. No entanto, em $t + \Delta t$, quando a velocidade do motor passou a ser $\omega + \Delta\omega$, o escorregamento do motor mudou. Portanto, o torque induzido também mudou. Se o torque induzido se alterou, a aceleração do motor nesse mesmo intervalo de tempo não é a mesma que foi calculada anteriormente. Por isso, a variação de velocidade é recalculada para o mesmo passo de integração até que se atinja a convergência, quando então segue-se para o instante de tempo seguinte ($t + 2\Delta t$).

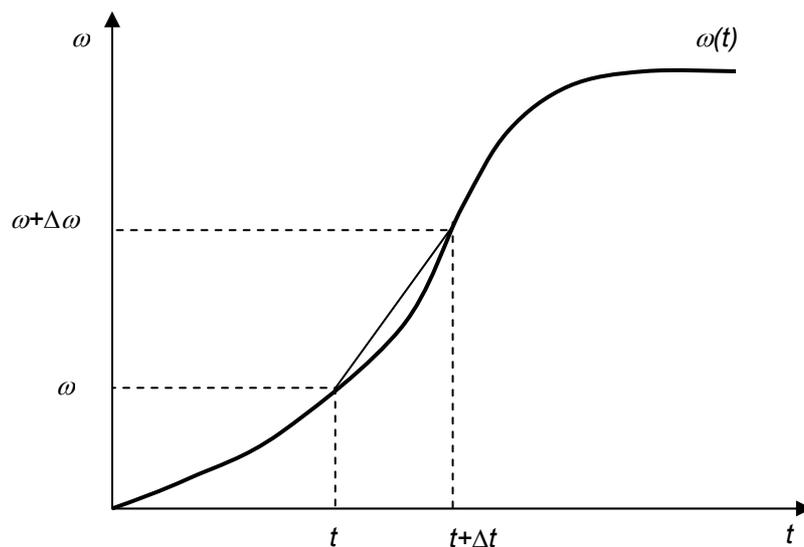


Figura 4.11. O Método dos Trapézios aplicado à função $\omega(t)$

Um diagrama de processo é apresentado na Figura 4.12 para melhor compreensão da forma como a curva de velocidade x tempo é levantada.

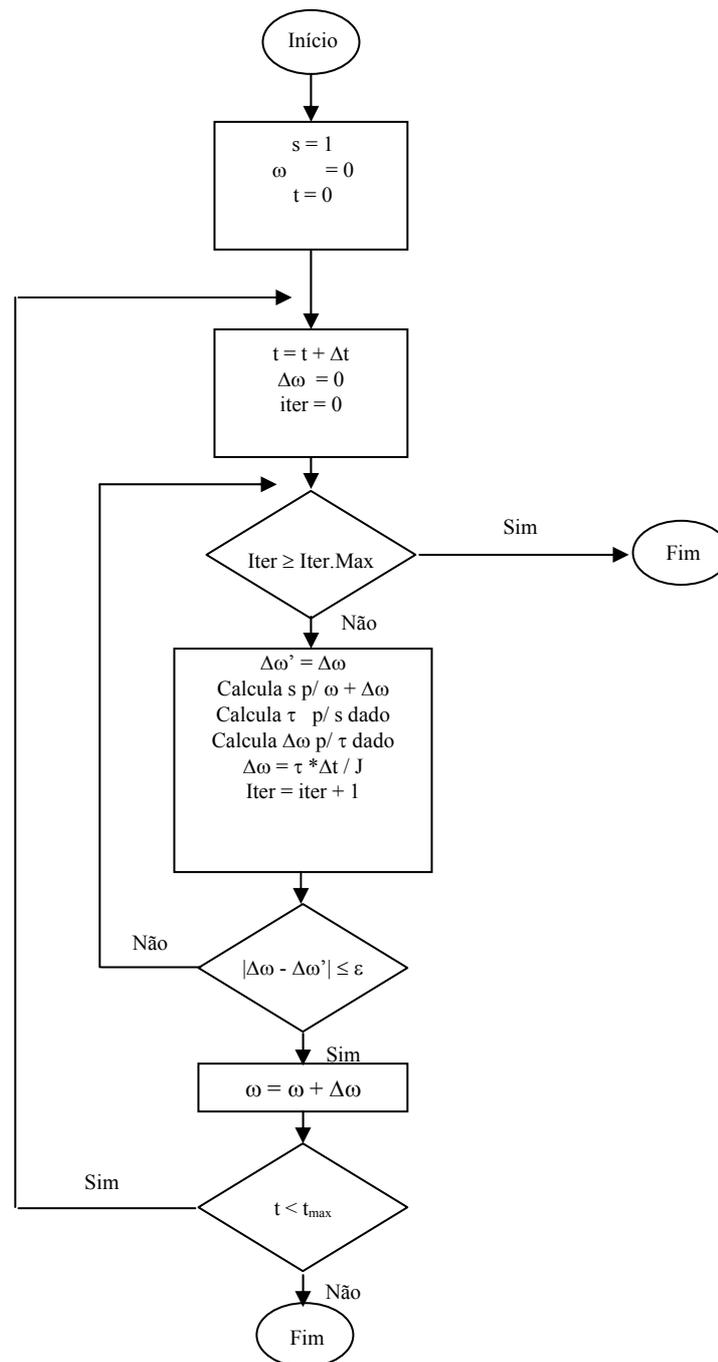


Figura 4.12. Diagrama de Processo

O Método Modificado de Euler foi aplicado para obter o comportamento dinâmico de um motor e, assim, conhecer como evolui sua velocidade em função do tempo. Fica evidente que tal método será de fundamental importância para analisar o impacto da partida de um motor em uma rede de distribuição, já que ele permite obter também a evolução da corrente no tempo.

A Figura 4.13 a seguir apresenta o gráfico da corrente e do conjugado em função do escorregamento. A Figura 4.14 e a Figura 4.15 a seguir apresentam os gráficos da corrente e da velocidade e conjugado em função do tempo, respectivamente. Para este exemplo, foi utilizado um motor de 55 kW com as seguintes características:

Dados elétricos:

Potência nominal [kW]	: 55,00
Tensão de linha [V]	: 380
Número de pólos	: 4
Frequência elétrica [Hz]	: 60,00
Escorregamento nominal	: 0,0111
Corrente nominal [A]	: 104,00
Corrente de partida [A]	: 790,40
Fator de potência plena carga	: 0,86
Rendimento plena carga	: 0,9410

Dados mecânicos:

Conjugado nominal [Nm]	: 290,08
Conjugado de Partida [Nm]	: 841,23
Conjugado máximo [Nm]	: 928,26
Momento de inércia [kgm ²]	: 0,486

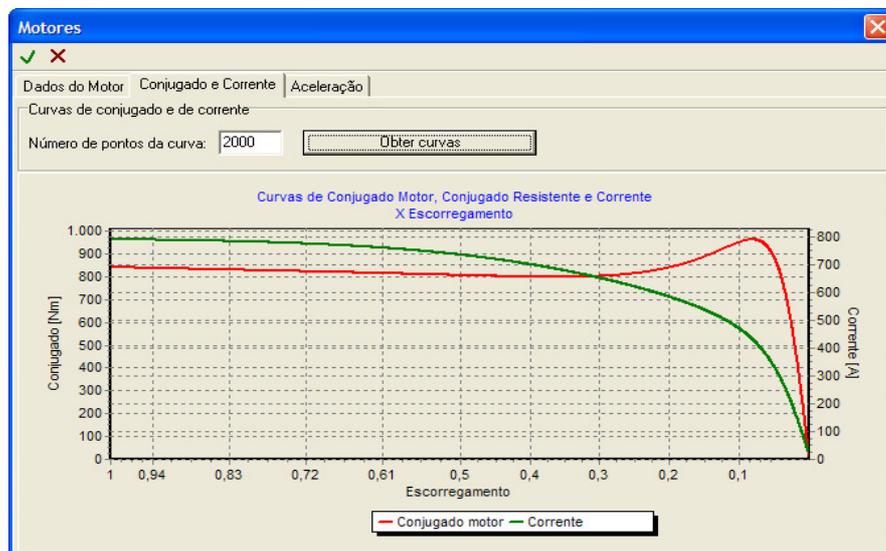


Figura 4.13. Curvas de Conjugado Motor e Corrente x Escorregamento

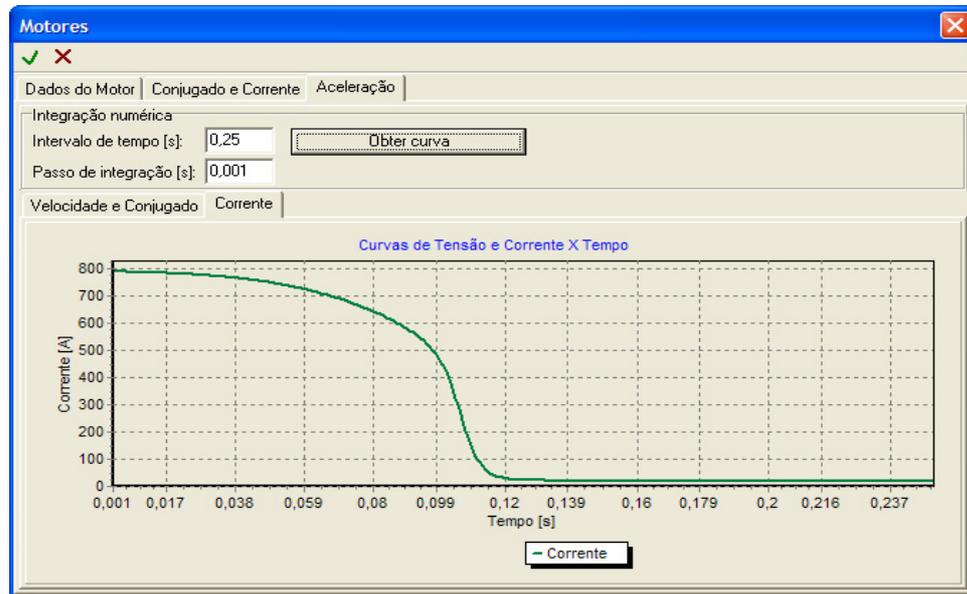


Figura 4.14. Curva de Corrente x Tempo

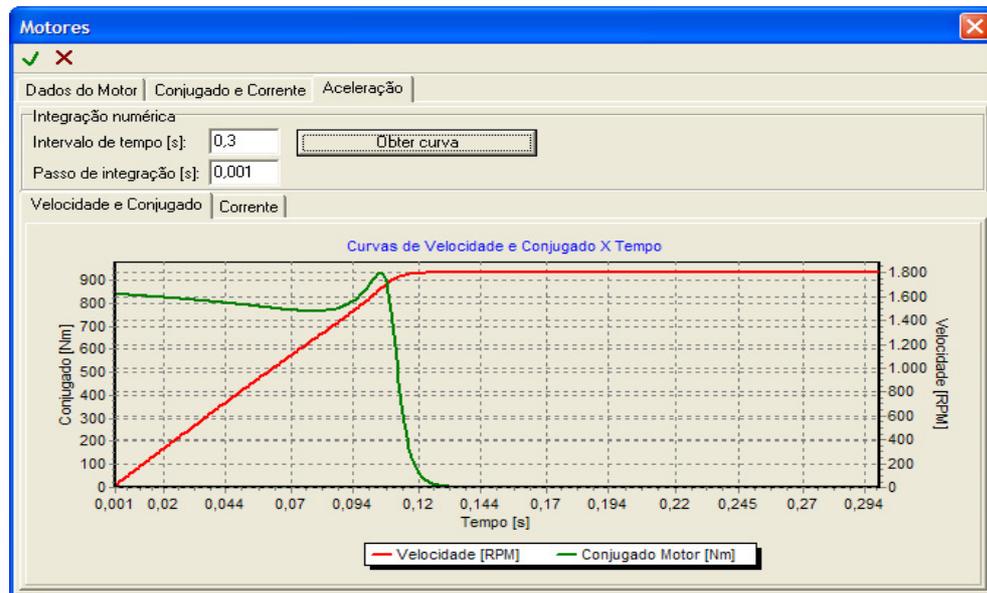


Figura 4.15. Curvas Velocidade e Conjugado Motor x Tempo

O principal problema para aplicar este método está no fato de que ele necessita do momento de inércia do conjunto motor-carga. O momento de inércia do motor em vazio é dado por seu fabricante. Já o conhecimento do momento de inércia da carga é particularmente difícil, uma vez que ele depende da carga acionada pelo motor bem como da existência ou não de caixas multiplicadoras e/ou redutoras de velocidade.

4.5. AVALIAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO

Usando como base o trabalho de Nangsue e Pillay [31], que utiliza algoritmos evolutivos e programação genética para o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do motor e, a partir deles, o cálculo das características do motor, entre elas os torques, foi realizada a comparação dos resultados obtidos usando a referida metodologia com aqueles obtidos aplicando a metodologia apresentada neste trabalho. Foram utilizados motores de três potências diferentes: 5 HP, 50 HP, 250 HP. Para cada um deles são apresentados os erros dos torques calculados em relação aos dados fornecidos pelo fabricante.

No trabalho de Nangsue e Pillay o tamanho da população foi de 500 indivíduos e o número de iterações foi de 25.000. Já para as simulações feitas utilizando a metodologia aqui apresentada o número de indivíduos foi de 20 e o número de iterações variou entre 500 e 1.000.

Na Tabela 4.1 são comparados os erros dos torques calculados com relação aos torques fornecidos pelos fabricantes para os casos da metodologia de Nangsue e Pillay (Metodologia 1) e também da metodologia desenvolvida neste trabalho (Metodologia 2).

Tabela 4.1 – Comparação dos erros na variável “torque”

Motor	Torque	Erros	
		Metodologia 1	Metodologia 2
5 hp	T _{Nominal}	-2,70%	1,82%
	T _{Partida}	11,10%	0,90%
	T _{Máximo}	-3,20%	-0,05%
50 hp	T _{Nominal}	-16,40%	-0,49%
	T _{Partida}	16,70%	0,01%
	T _{Máximo}	-3,30%	-0,01%
250 hp	T _{Nominal}	-28,00%	-0,63%
	T _{Partida}	3,60%	0,01%
	T _{Máximo}	3,70%	0,01%

4.6. CONCLUSÕES

Para cargas perturbadoras como os motores de indução na rede, foi estudado o modelo elétrico que poderia ser utilizado para a análise de impacto na rede elétrica de distribuição. Para o motor de indução, a corrente é facilmente determinada com boa precisão a partir de seu circuito equivalente.

Uma forma inédita do cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução foi introduzida no item 4.3, a qual faz uso dos *Algoritmos Evolutivos* para, a partir dos dados de placa do motor, obter os valores das resistências e reatâncias do rotor e do estator, já que o cálculo analítico seguido do cálculo numérico [2] implica em uma grande complexidade, apresentando erros maiores.

Pode-se observar que a metodologia aqui apresentada produz resultados mais próximos dos valores reais das características do motor se comparados com outras metodologias encontradas na bibliografia. Foi necessária uma população reduzida e um número de iterações bem menor comparada com a de outros estudos realizados anteriormente. Estas características fazem com que a metodologia apresentada tenha um tempo de processamento menor.

O próximo capítulo aborda as soluções para os problemas causados pela partida de motores e apresenta uma proposta de regulamentação que permita avaliar a viabilidade do acesso de um motor à rede.

CAPÍTULO 5

ASPECTOS REGULATÓRIOS SOBRE PARTIDA DE MOTORES

5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será abordada a análise dos efeitos da partida de motores trifásicos de indução ligados à rede de distribuição. Também será descrito o módulo computacional desenvolvido segundo a metodologia descrita nos capítulos anteriores.

Em seguida será apresentada uma proposta de regulamentação, cujo objetivo é padronizar os critérios adotados pelas concessionárias para permitir o acesso de um motor à rede de distribuição de baixa tensão.

5.2. IMPACTO DE MOTORES NA REDE ELÉTRICA

Este item ilustra as aplicações práticas relativas à metodologia concebida para avaliação dos impactos causados na rede devido à ligação de motores de indução. Diversos estudos foram efetuados em redes reais da área de concessão de uma distribuidora.

Foram desenvolvidos módulos computacionais que automatizam a metodologia concebida, amplamente exposta nos itens anteriores, e incorporados a um programa de planejamento integrado de redes.

O módulo computacional desenvolvido viabiliza os estudos de possíveis ligações de motores de indução na rede, permitindo avaliar o impacto da partida de um motor na rede de distribuição, bem como o melhor método de partida a ser usado.

Serão apresentados dois casos, nos quais o mesmo motor é ligado em duas barras com localizações diferentes. Uma das barras está localizada no final do alimentador, enquanto a outra se localiza a poucos metros da saída da subestação. Este teste é realizado com o objetivo de mostrar como, dependendo da localização da barra e dos níveis de curto-circuito, os efeitos da partida do motor são diferentes provocando em alguns casos quedas de tensão significativas que exigem ações corretivas.

5.2.1. Descrição do Módulo Computacional Desenvolvido

A metodologia apresentada neste trabalho foi desenvolvida em um módulo computacional que, por sua vez, foi incorporado a um software de planejamento de redes de distribuição. Esta ferramenta permite realizar estudos de planejamento em ambiente geo-referenciado para as redes de média e baixa tensão. Para isso, o software permite realizar o cálculo de fluxo de potência em 4 patamares de carga, os quais geralmente representam os períodos de madrugada, manhã, tarde e noite [32].

O editor gráfico desta ferramenta permite a inserção de um determinado tipo de motor na rede, bem como a inserção de medidores em qualquer barra que seja de interesse do usuário. O medidor serve para armazenar os resultados de cálculo, os quais permitirão conhecer como variam a tensão e a corrente em função do tempo durante a partida do motor. De posse da evolução da tensão no tempo e do conhecimento do ciclo de trabalho do motor (número de partidas por unidade de tempo), também é possível determinar se a ligação de um motor em uma determinada barra pode causar ou não *flicker* na barra de ligação ou em outras barras durante sua partida [4, 13]. O *flicker* é a impressão visual de uma variação na luminosidade, regular ou não, podendo dependendo do grau, causar irritações à visão do ser humano.

A ferramenta desenvolvida possui um módulo de cadastro de motores que permite calcular os parâmetros elétricos do motor a partir de seus dados de placa usando o algoritmo evolutivo. Esse cadastro permite agilizar a simulação, uma vez que o algoritmo evolutivo requer tempo considerável para sua execução e o armazenamento dos parâmetros por ele obtidos podem ser facilmente recuperados de uma base de dados

previamente processada. Em outras palavras, o algoritmo evolutivo será executado apenas uma vez, quando da inserção de um novo tipo de motor no banco de dados. Uma vez calculados os parâmetros do tipo de motor a partir do algoritmo evolutivo, tais dados são armazenados em um banco de dados. Posteriormente, para a simulação de um motor, deve-se informar o tipo correspondente para, dessa forma, recuperar os parâmetros calculados pelo algoritmo evolutivo.

Para a simulação de partida de um motor pode-se alterar o passo de integração e o tempo total da simulação, que deverá ser maior que o tempo que o motor leva para atingir o regime permanente. Também é possível avaliar alguns métodos de partida, tais como partida direta, chave estrela-triângulo, autotransformador e soft-start, de forma que se pode prever se um determinado motor conseguirá partir ou não.

5.2.2. Casos Estudados

Para ilustrar a aplicação da ferramenta desenvolvida com a metodologia apresentada no capítulo anterior serão realizadas duas simulações usando um motor de 110 kW ligado na rede de média tensão a diferentes distâncias da subestação.

Na Tabela 5.1 são apresentados os dados de placa do motor utilizado para os casos de estudo.

Tabela 5.1 – Dados de placa do motor

Dados Placa	Motor 110kW
Pólos	4
Tensão (V)	380
Potência (kW)	110
Frequência (Hz)	60
Escorregamento (%)	0,0061
Inom (A)	205
Ipartida (A)	1.722
Torque Nominal (Nm)	577,22
Torque Partida (Nm)	1.673,94
Torque Máximo (Nm)	1.962,55

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores de correntes e conjugados calculados pela ferramenta utilizando o algoritmo evolutivo, assim como o erro entre os valores de placa e os calculados.

Tabela 5.2 – Dados calculados

Dados Simulação	Motor 110kW	Erro %
Inom (A)	207,170	1,06
Ipartida (A)	1.721,997	0,0
Torque Nominal (Nm)	573,675	-0,61
Torque Partida (Nm)	1.673,956	0,00
Torque Máximo (Nm)	1.962,579	0,00

A seguir são exibidas as características do circuito utilizado para a simulação da partida de um motor de 110 kW ligado na rede de media tensão.

Características do circuito:

Extensão (km): 272,61

Tensão nominal (kV): 13,8

Carregamento (A): 304,14

Demanda máxima (kVA): 6.786,13

Tensão de fase mínima (%): 90,83

Circuito com tensões desequilibradas

Os outros parâmetros ou dados usados na simulação são mostrados a seguir:

Partidas por ciclo: 1 partida/hora

Momento de inércia da carga [pu]: 10,00

Conjugado resistente na partida [pu]: 0,20

Características da carga:

Carga quadrática - São cargas com baixo conjugado resistente na partida, tais como bombas centrífugas, compressores centrífugos e ventiladores - Conjugado resistente: 10% a 20% do conjugado nominal do motor.

Parâmetros de simulação:

Passo (ms): 5,00

Tipo de partida: Direta

5.2.3. Caso 1

Um motor de 110 kW com os seguintes parâmetros foi ligado na barra 9202 de um alimentador típico de uma concessionária brasileira.

Dados elétricos			
Descrição: Motor trifásico 4 pólos 380 V 110 kW /			
Dados gerais			
Potência nominal [cv]:	150.00		
Tensão de linha [V]:	380.00		
Número de pólos:	4		
Frequência elétrica [Hz]:	60.00		
Escorregamento nominal:	0.0061		
Corrente nominal [A]:	205.00		
Corrente de partida [A]:	1722.00		
Dados mecânicos			
Conjugado nominal [Nm]:	577.22		
Conjugado de partida [Nm]:	1673.94		
Conjugado máximo [Nm]:	1962.55		
Momento de inércia do motor [kgm²]:	1.7100		
Fator de potência e rendimento			
	Plena carga:	75% da carga:	50% da carga:
Fator de potência:	0.8500	0.8000	0.6900
Rendimento:	0.9510	0.9470	0.9350

Figura 5.1. Dados de placa do motor de 110 kW

A barra onde o motor foi ligado está localizada a 42,56 km de distância da subestação, e possui um nível de curto-circuito trifásico de 0,147 kA.

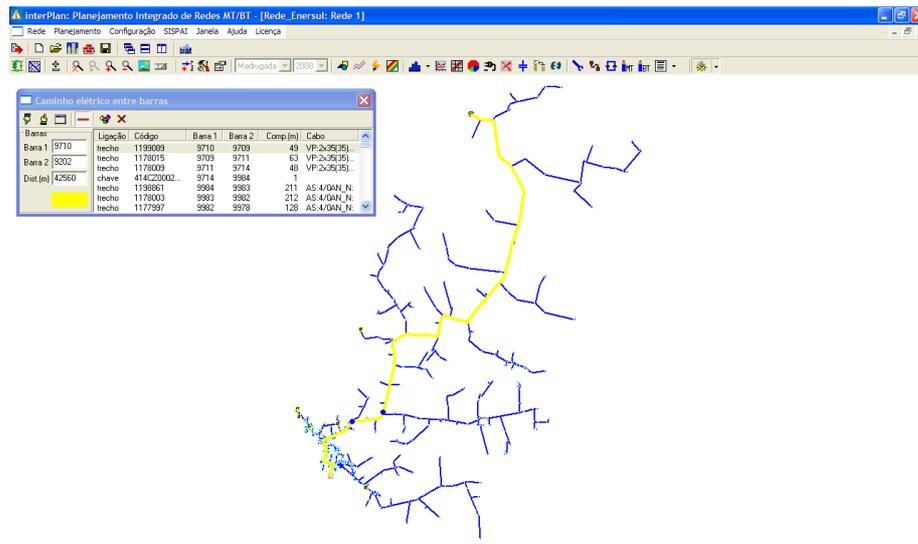


Figura 5.2. Distância da barra 9202 da Subestação

A partida direta de um motor de médio ou grande porte como o motor do exemplo causou uma grande queda de tensão na barra de ligação e nas barras adjacentes. A variação de tensão causada pelo motor chegou a ser de 19,30 %. No regime de trabalho de uma partida por hora não se constatou a presença de *flicker*, mas ao mudar o regime para 6 partidas por hora, por exemplo, o fenômeno se manifestou.

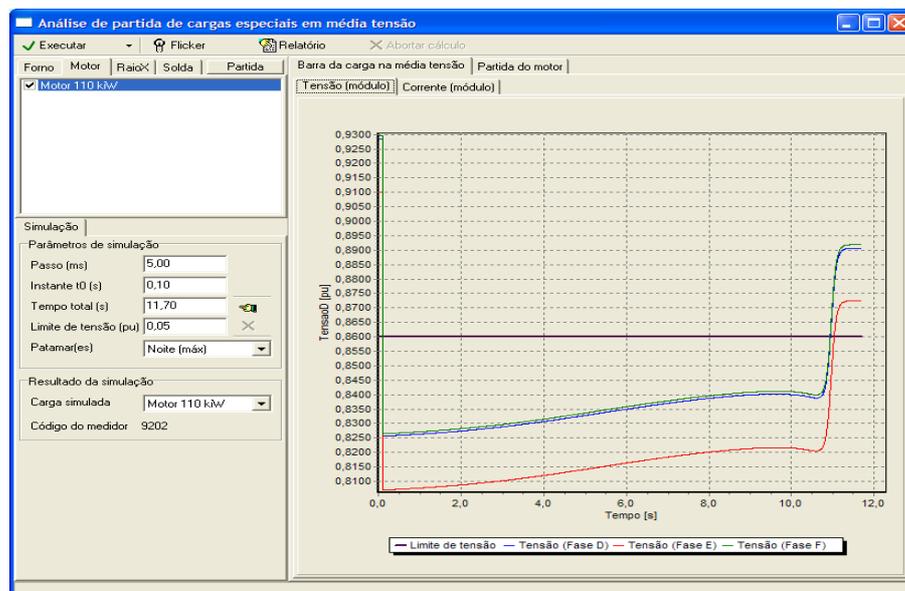


Figura 5.3. Queda de tensão causada pela partida do motor na barra 9202



Figura 5.4. Gráfico Flicker – 1 partida / hora

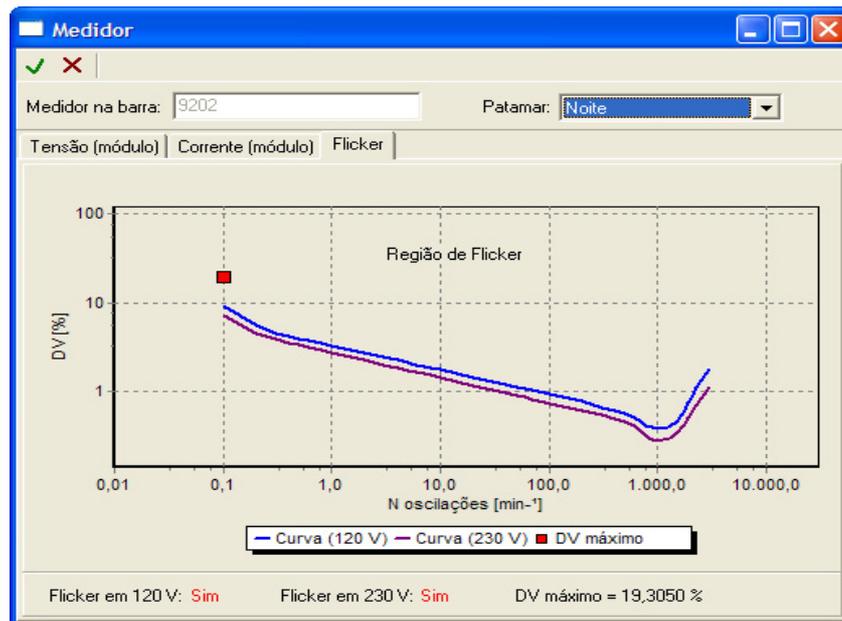


Figura 5.5. Gráfico Flicker – 6 partidas / hora

5.2.4. Caso 2

O mesmo motor de 110 kW é ligado na barra 9969 do mesmo circuito do exemplo anterior, mas desta vez a barra se encontra a uma distância de 1,068 km da subestação. O nível de curto-circuito trifásico desta barra é de 5,543 kA.

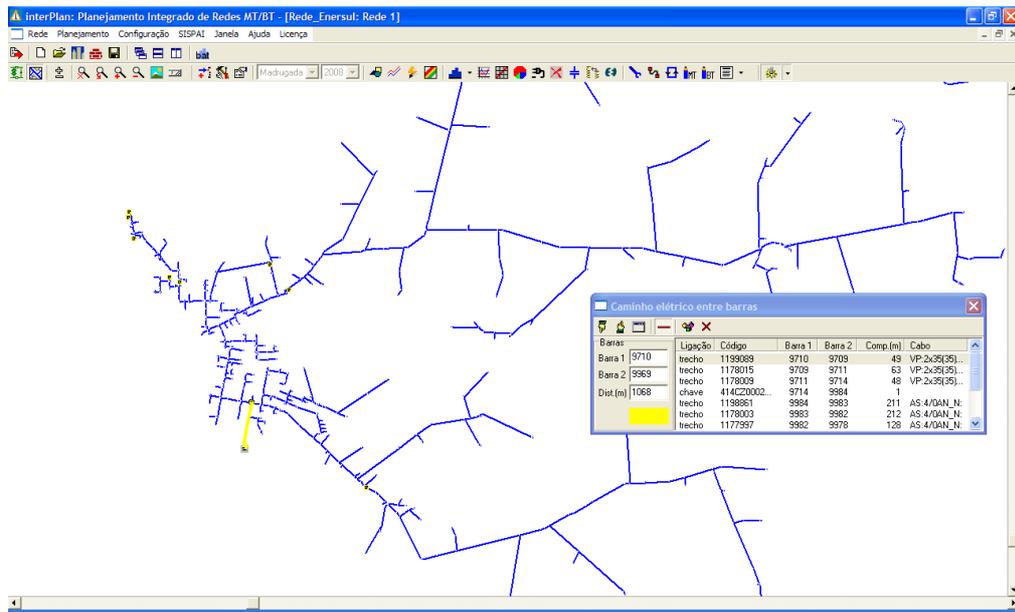


Figura 5.6. Distância da barra 9969 da Subestação

Neste caso a partida direta do motor não causou grandes transtornos na rede. A maior variação de tensão foi de 2,5263% e não causou flicker.

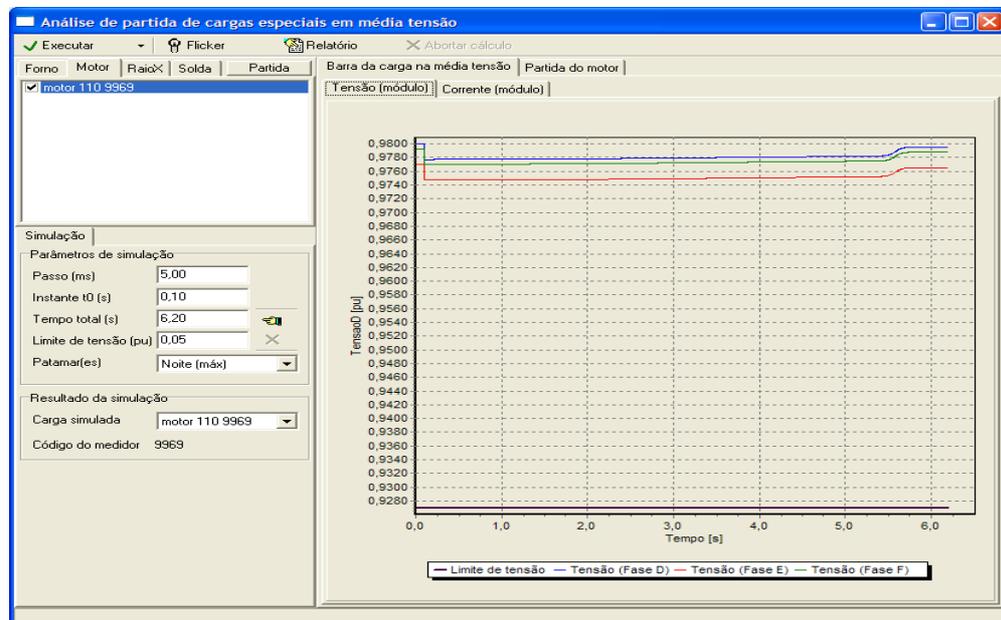


Figura 5.7. Queda de tensão causada pela partida do motor na barra 9969

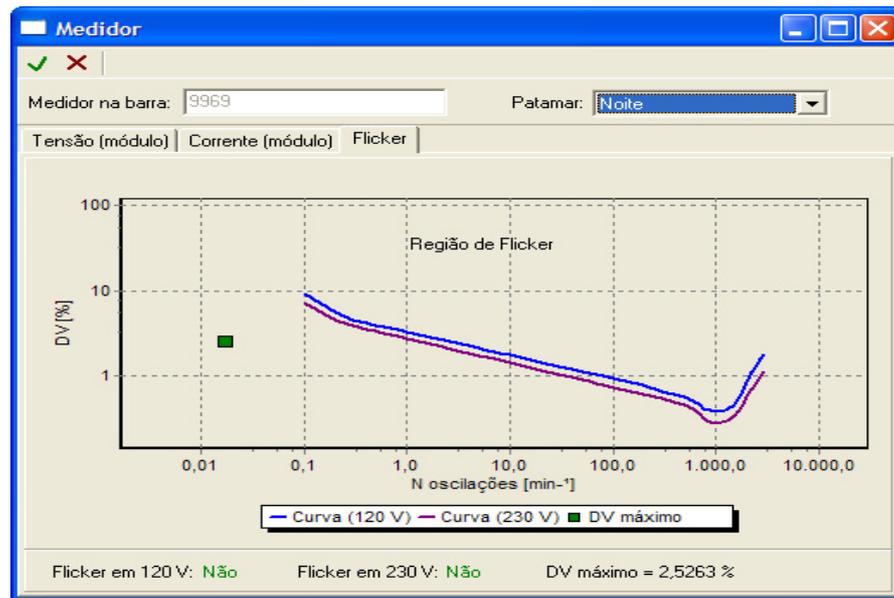


Figura 5.8. Gráfico Flicker

Os problemas verificados nos casos 1 e 2 apresentados anteriormente referem-se às redes de média tensão. Porém, problemas idênticos ocorrem nas redes de baixa tensão com motores de potência menor.

5.3. SOLUÇÕES PARA O PROBLEMA

Quando um motor é colocado em funcionamento, a corrente exigida (da rede) é aumentada e pode, sobretudo se a seção do condutor de alimentação for insuficiente, provocar uma queda de tensão susceptível de afetar o funcionamento das cargas. Por vezes, esta queda de tensão é tal que é perceptível nos aparelhos de iluminação.

Para evitar estes inconvenientes, os regulamentos de instalações de algumas concessionárias proibem, acima de uma determinada potência, a utilização de motores com partida direta. Outros limitam-se a impor, em função da potência dos motores, a relação entre a corrente de partida e a corrente nominal.

O motor pode ser ligado diretamente à rede por intermédio de aparelhos simples, pois apenas as extremidades dos enrolamentos do estator estão disponíveis na placa de

terminais. Uma vez que as características do rotor são determinadas pelo fabricante, os diversos processos de partida consistem essencialmente em variar a tensão nos terminais do estator. Neste tipo de motor, a redução do pico de corrente é acompanhada automaticamente de uma forte redução do conjugado.

Este item apresenta então os métodos de partida de motores de indução mais usados atualmente.

5.3.1. Partida Direta

É o modo de partida mais simples, com o estator ligado diretamente à rede. O motor parte com as suas características naturais como se vê na Figura 5.9.

No momento da colocação em funcionamento, o motor comporta-se como um transformador em que o secundário constituído pela gaiola do rotor, pouco resistiva, está em curto-circuito. A corrente induzida no rotor é elevada.

Sendo as correntes primária e secundária sensivelmente proporcionais, o pico de corrente resultante é elevado:

$$I_{\text{partida}} = 5,0 \text{ a } 7,5 I_{\text{nominal}}$$

O conjugado de partida é em média:

$$\text{Conj}_{\text{partida}} = 0,5 \text{ a } 1,5 \text{ Conj}_{\text{nominal}}$$

Apesar das suas vantagens (aparelhagem simples, conjugado de partida elevado, partida rápida, preço baixo), a partida direta só é interessante nos casos em que:

- A potência do motor é baixa, relativamente à potência disponível na rede, de modo a limitar as perturbações originadas pelo pico de corrente;

- A máquina movimentada não necessita de uma aceleração progressiva e está equipada com um dispositivo mecânico (reductor, por exemplo) que evita uma partida muito rápida;
- O conjugado de partida tem que ser elevado.

Em contrapartida, sempre que:

- A corrente exigida possa perturbar o bom funcionamento de outros aparelhos ligados ao mesmo circuito, provocado pela queda de tensão que ela causa;
- A máquina não agüente golpes mecânicos;
- O conforto ou a segurança dos usuários sejam considerados (caso das escadas rolantes, por exemplo);

torna-se necessário utilizar um artifício para diminuir a corrente exigida ou o conjugado de partida. O processo mais usado consiste em partir o motor sob tensão reduzida.

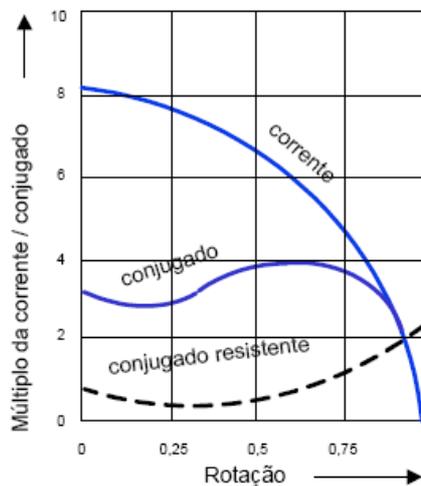


Figura 5.9. Curvas de corrente e conjugado na partida direta

De fato, uma variação da tensão de alimentação tem as seguintes conseqüências:

- A corrente de partida varia proporcionalmente à tensão de alimentação,
- O conjugado de partida varia proporcionalmente ao quadrado da tensão de alimentação.

5.3.2. Partida Estrela – Triângulo

Este processo de partida só pode ser utilizado num motor em que as duas extremidades de cada um dos três enrolamentos estatóricos estejam ligadas à placa de terminais. Por outro lado, o enrolamento deve ser feito de tal modo que a ligação triângulo corresponda à tensão da rede; por exemplo, para uma rede trifásica de 380 V, é necessário um motor bobinado em 380 V triângulo e 660 V estrela.

O princípio consiste em partir o motor ligando os enrolamentos em estrela à tensão da rede, o que é o mesmo que dividir a tensão nominal do motor em estrela por $\sqrt{3}$ (no exemplo dado acima, tensão da rede 380 V = 660 V / $\sqrt{3}$).

O pico de corrente de partida é dividido por 3:

$$I_a = 1,5 \text{ a } 2,6 I_{\text{partida direta}}$$

Efetivamente, um motor 380 V / 660 V ligado em estrela à tensão nominal de 660 V absorve uma corrente $\sqrt{3}$ vezes menor do que em ligação triângulo a 380 V. Sendo a ligação estrela feita a 380 V, a corrente é novamente dividida por $\sqrt{3}$, logo, no total, por 3.

Uma vez que o conjugado de partida é proporcional ao quadrado da tensão de alimentação, ele próprio também é dividido por 3:

$$\text{Conj}_a = 0,2 \text{ a } 0,5 \text{ Conj}_{\text{partida direta}}$$

A velocidade do motor estabiliza quando os conjugados motor e resistente se equilibram, geralmente entre 75 e 85% da velocidade nominal. Os enrolamentos são então ligados em triângulo e o motor recupera as suas características nominais. A passagem da ligação estrela à ligação triângulo é controlada por um temporizador. O fechamento do contator triângulo se dá com um atraso de 30 a 50 milisegundos após a

abertura do contator estrela, o que evita um curto-circuito entre fases, uma vez que os dois contatores não podem ficar fechados simultaneamente.

A corrente que atravessa os enrolamentos é interrompida pela abertura do contator estrela e volta a estabelecer-se quando o contator triângulo fecha. Esta passagem para triângulo é acompanhada de um pico de corrente transitória muito curto, mas muito elevado, devida à força contra-eletromotriz do motor.

A partida estrela-triângulo é indicada para as máquinas que tem baixo conjugado resistente, ou que partem em vazio. Em virtude do regime transitório no momento da ligação triângulo, pode ser necessário, acima de uma determinada potência, utilizar uma variante para limitar estes fenômenos transitórios:

- Temporização de 1 a 2 segundos na passagem estrela-triângulo. Esta temporização permite uma diminuição da força contra-eletromotriz e logo, do pico de corrente transitória. Esta variante só pode ser utilizada se a máquina tem inércia suficiente para evitar uma desaceleração excessiva durante a temporização.
- Partida em 3 tempos: estrela-triângulo+resistência-triângulo. O desligamento sub-existe, mas a resistência, ligada em série durante cerca de três segundos com os enrolamentos ligados em triângulo, reduz o pico de corrente transitória.
- Partida estrela-triângulo+resistência-triângulo sem desligamento. A resistência é ligada em série com os enrolamentos, imediatamente antes da abertura do contator estrela. Evita-se assim a interrupção da corrente e, portanto o aparecimento de fenômenos transitórios.

A utilização destas variantes exige a aplicação de componentes suplementares, o que pode ter como consequência um aumento considerável do custo de instalação.

Na Figura 5.10 são apresentadas as curvas de corrente e conjugado na partida estrela-triângulo.

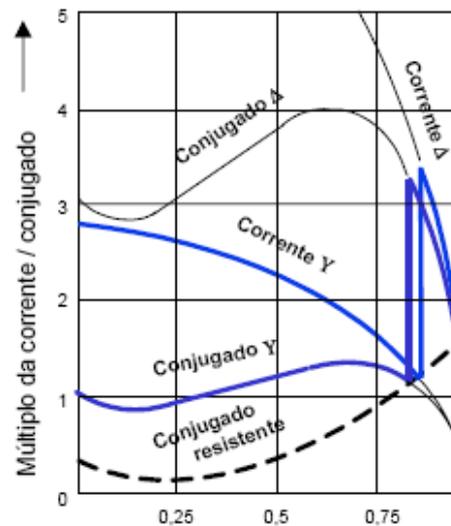


Figura 5.10. Curvas de corrente e conjugado na partida estrela-triângulo

5.3.3. Partida por Autotransformador

O motor é alimentado a tensão reduzida através de um autotransformador, que é desligado do circuito no final da partida.

A partida é feita em três tempos:

- No primeiro tempo, o autotransformador é ligado primeiro em estrela e em seguida o motor é ligado à rede, por intermédio de uma parte dos enrolamentos do autotransformador. A partida é feita com uma tensão reduzida, que é função da relação de transformação. O autotransformador está geralmente equipado com derivações, que permitem escolher a relação de transformação e, portanto, o valor da tensão reduzida mais apropriado.
- Antes de passar à ligação a tensão plena, a ligação em estrela é aberta. A fração do enrolamento ligada à rede constitui então uma indutância ligada em série com o motor. Esta operação é realizada quando se atinge a velocidade de equilíbrio, no final do primeiro tempo.

- A ligação a plena tensão é feita após o segundo tempo, que geralmente é muito curto (uma fração de segundo). As indutâncias ligadas em série com o motor são curto-circuitadas e em seguida o autotransformador é desligado do circuito.

A corrente e o conjugado de partida variam nas mesmas proporções. Dividem-se por $(U_{rede} / U_{reduzida})^2$. Obtêm-se os seguintes valores:

$$I_a = 1,7 \text{ a } 4 I_{partida \text{ direta}}$$

$$Conj_a = 0,5 \text{ a } 0,85 Conj_{partida \text{ direta}}$$

A partida é feita sem interrupção da corrente no motor. Assim, evitam-se os fenômenos transitórios resultantes da interrupção. Podem, no entanto, produzirem-se fenômenos transitórios da mesma natureza no momento da ligação à tensão plena, se não forem tomadas certas precauções. De fato, o valor da indutância ligada em série com o motor após a abertura da ligação estrela é elevado, relativamente ao do motor. Daí resulta uma queda de tensão elevada, que provoca um pico de corrente transitória no momento da ligação a plena tensão. Para evitar este inconveniente, no circuito magnético do autotransformador existe um entreferro, cuja presença dá lugar a uma diminuição do valor da indutância. Este valor é calculado de tal modo que, no momento da abertura da ligação estrela, no segundo tempo, não haja variação de tensão nos terminais do motor.

A presença do entreferro tem como consequência um aumento da corrente magnetizante do autotransformador, que aumenta a corrente exigida na rede durante o primeiro tempo de arranque. Este modo de partida é geralmente utilizado para motores com potência superior a 10 kW. Implica, no entanto, no emprego de equipamentos relativamente caros, devido ao preço elevado do autotransformador.

A Figura 5.11 mostra as curvas de corrente e conjugado na partida com autotransformador.

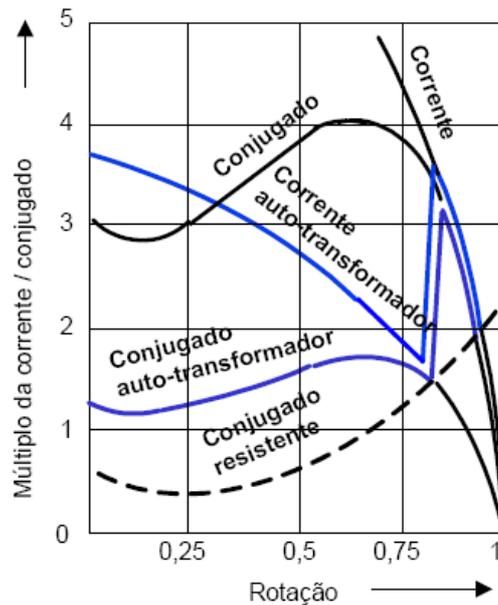


Figura 5.11. Curvas de corrente e conjugado na partida com autotransformador

5.3.4. *Soft-Start (Partida Progressiva)*

A alimentação do motor, quando é colocado em funcionamento, é feita por aumento progressivo da tensão, o que permite uma partida sem golpes e reduz o pico de corrente. Este resultado obtém-se por intermédio de um conversor com tiristores, montados 2 a 2 em cada fase da rede.

A subida progressiva da tensão de saída pode ser controlada pela rampa de aceleração ou dependente do valor da corrente de limitação, ou ligada a estes dois parâmetros. Um conversor estático que é utilizado para partida e parada progressivas de motores trifásicos de rotor em curto-circuito assegura:

- O controle das características de funcionamento, principalmente durante os períodos de partida e parada;
- A proteção térmica do motor e do controlador;
- A proteção mecânica da máquina movimentada, por supressão dos golpes e redução da corrente de partida. Permite partir todos os motores assíncronos.

Pode ser curto-circuitado no final da partida por um contator, mantendo o controle do circuito de comando.

Além do controle da partida, permite ainda:

- a desaceleração progressiva;
- a parada com frenagem.

A Figura 5.12 apresenta as curvas de conjugado em função da tensão que o soft-start aplica ao motor. Essa tensão varia com o tempo e a Figura 5.14 apresenta a curva de conjugado desenvolvido pelo motor ao utilizar um soft-start. A Figura 5.13 ilustra o ângulo de disparo que é utilizado nesse dispositivo para variar o valor eficaz da tensão.

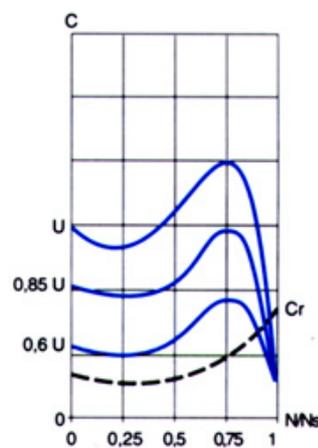


Figura 5.12. Curva conjugado X velocidade em partida soft-start

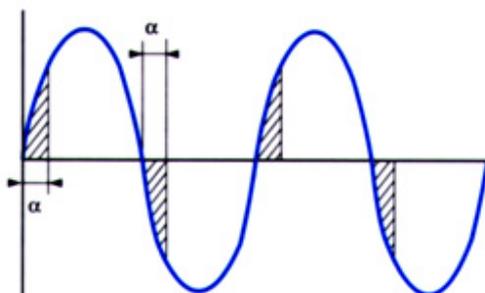


Figura 5.13. Ângulo de disparo

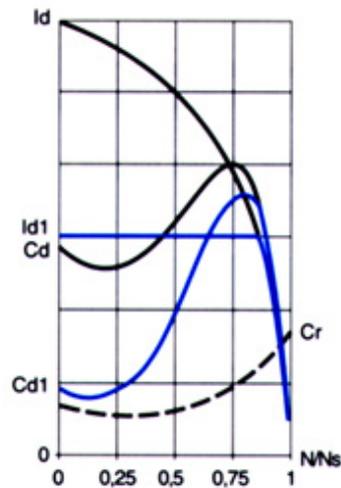


Figura 5.14. Curva corrente X velocidade em partida soft-start

5.3.5. Chave Série – Paralelo

De baixo custo, mas produz um conjugado de partida muito baixo. O motor deve possuir nove terminais acessíveis e a tensão nominal dupla, na razão de $\frac{1}{2}$, normalmente 220V e 440 V. Aplicável em motores que partem em vazio ou com conjugado resistente de partida muito baixo.

Neste tipo de partida o pico de corrente fica reduzido a $\frac{1}{4}$ daquele com partida direta. Deve-se ter presente que com este tipo de ligação, o conjugado de partida do motor também fica reduzido a $\frac{1}{4}$ e, portanto a máquina deve partir praticamente em vazio.

5.3.6. Chave de Resistência ou Reator

Ligam-se em série com o estator do motor resistores ou reatores de forma a se obter uma tensão reduzida nos terminais do motor. Por esse método a queda de tensão se reduz à medida que o motor acelera. Para grandes motores é mais adequado o uso de reatores, em vez de resistores, para reduzir as perdas e a elevação de temperatura durante a partida.

5.3.7. Reostato

Utilizado na partida de motores de anéis. Neste caso, conecta-se um reostato externo ao rotor da máquina durante a partida para reduzir a corrente de partida e elevar o conjugado de partida do motor. Aplica-se este método, em geral, para cargas com conjugado resistente de partida elevado. De alto custo, mas permite o controle do conjugado na partida.

5.4. SENSIBILIDADE DE CARGAS E EQUIPAMENTOS

O impacto das variações de tensão sobre os consumidores industriais ocorre de forma diferenciada em função da sensibilidade dos equipamentos eletro-eletrônicos instalados, das particularidades inerentes a cada processo industrial e também dos sistemas de controle de processo envolvidos [46].

Em consumidores residenciais, os efeitos das variações de tensão são percebidos pela perda de memória e perda de programação de relógios digitais, fornos microondas, desligamento de microcomputadores, etc.

A sensibilidade dos equipamentos a afundamentos de tensão varia de equipamento para equipamento, sendo que, mesmo dentro de uma categoria (por exemplo, acionamentos de motores), podem-se encontrar diferentes reações, dependendo do modelo e do fabricante. Com isso, torna-se difícil normalizar um padrão único para se definir a sensibilidade dos diversos equipamentos que são utilizados dentro de um processo industrial.

A ocorrência de afundamentos de tensão pode causar sérios prejuízos a consumidores industriais. Com a utilização cada vez maior de equipamentos eletrônicos no controle de processos, tais como PLCs (Controladores Lógicos Programáveis) e ASDs (Acionamentos de Velocidade Variável), que são vulneráveis a variações de tensão, a questão do controle e limitação das variações de tensão de curta duração se torna fundamental na eficiência do processo produtivo.

Uma questão que tem preocupado a indústria eletrônica ultimamente, especificamente a de informática, refere-se aos prejuízos que uma variação de tensão pode causar durante a execução de um software. As primeiras referências a este tipo de fenômeno estão contidas na norma do IEEE (Std 446 de 1987 e atualizada em 1995 – Orange book) e também na curva da CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturers Association). Outra consequência grave é a falha de comutação em pontes de tiristores, afetando o disparo dos mesmos.

Além destes efeitos de afundamentos de tensão sobre equipamentos eletrônicos e de informática, pode-se citar outros que afetam equipamentos e processos industriais mais tradicionais, tais como:

- Desligamento de lâmpadas de descarga, que necessitam de uma tensão mínima para seu funcionamento;
- Variação na velocidade de motores e, dependendo do grau de severidade do afundamento, até mesmo parada ou impossibilidade de partida dos mesmos;
- Atuação indevida de contatores e relés auxiliares, devido à falha de energização das bobinas dos primeiros;
- Perda de sincronismo de máquinas síncronas.

5.4.1. Curvas de Sensibilidade às Variações de Tensão de Curta Duração

Equipamentos eletro-eletrônicos apresentam diferentes sensibilidades às VTCDs. Para caracterizar o impacto que uma dada VTCD poderá exercer sobre os equipamentos sensíveis, são levantadas curvas de sensibilidade por classes de cargas, de modo a caracterizar o desempenho médio dessas cargas sob condições que seriam classificadas como VTCD. Uma vez conhecidas as curvas de sensibilidade, elas podem ser utilizadas para identificar os locais com maior exposição das cargas a esse tipo de evento e, portanto, que tem maior chance de interferência em processos produtivos. Esta informação pode ser utilizada adicionalmente às características de magnitude e duração do evento, para avaliar o desempenho do sistema em função da vulnerabilidade de uma carga específica.

A Figura 5.15 mostra a curva de sensibilidade de computadores a eventos conhecida como CBEMA (“Computer Business Equipment Manufacturers Association”) [48], que foi desenvolvida para descrever a tolerância típica de diferentes computadores a variações de tensão tanto em magnitude quanto em duração do evento.

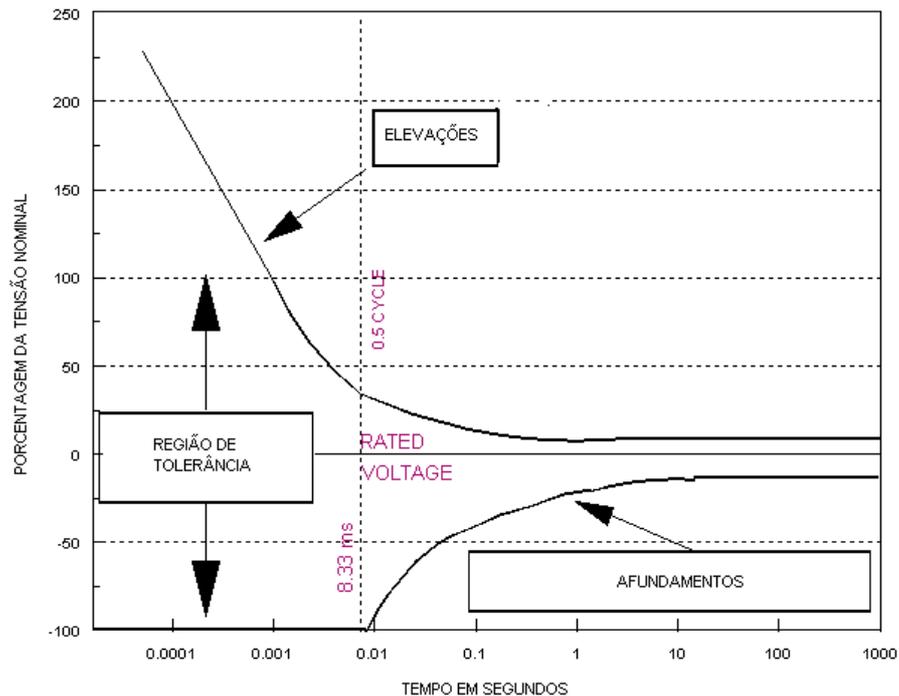


Figura 5.15. Curva de sensibilidade para computadores (CBEMA)

Dentro dos limites da região de tolerância, é esperado que um computador opere de forma segura. Caso o evento viole os limites dessa região poderá haver mau funcionamento ou danos ao equipamento.

A curva CBEMA foi proposta originalmente em 1974, e já sofreu modificações ao longo do tempo. Atualmente há uma tendência em substituí-la pela curva ITIC (“Information Technology Industry Council”), conforme ilustra a Figura 5.16, que engloba os equipamentos de Tecnologia de Informação (ITE- “Information Technology Equipment”) [48]. Cabe ressaltar que a curva ITIC não é uma especificação para projeto de equipamentos, mas apenas uma curva-guia que descreve o comportamento típico da maioria dos equipamentos do tipo ITE, face à tensão de fornecimento.

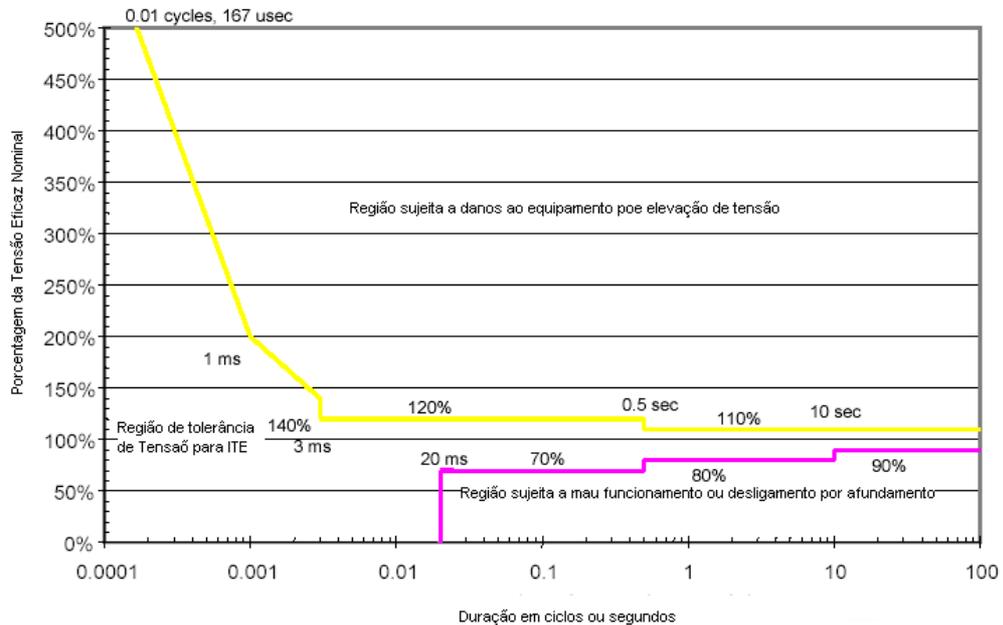


Figura 5.16. Curva de sensibilidade para equipamentos de tecnologia de informação (ITIC)

5.5. PROPOSTA DE REGULAMENTAÇÃO

Durante a partida dos motores elétricos de indução, a rede de distribuição fica submetida a uma queda de tensão, cuja intensidade pode ocasionar sérios distúrbios operacionais nos equipamentos de comando e proteção, além de afetar o sistema de iluminação.

Cada concessionária apresenta diferentes critérios técnicos e procedimentos a serem observados na análise da influência da partida dos motores na rede distribuição, a fim de que estas sejam convenientemente dimensionadas e/ou adequadas sob o aspecto técnico-econômico e preservada a qualidade do fornecimento de energia elétrica aos clientes.

A Resolução 456 de 29/11/2000 [6] estabelece no seu Artigo 17 que se o cliente possuir na unidade consumidora uma carga que provoca distúrbios nas redes de distribuição é facultado à concessionária exigir desse cliente o cumprimento de uma das seguintes obrigações:

- instalação de equipamentos corretivos na unidade consumidora;

- pagamento do valor das obras necessárias no sistema elétrico da concessionária, para eliminação desses distúrbios.

Conseqüentemente, a ligação de um motor de indução assíncrono requer uma análise técnica de atendimento em duas etapas, a saber:

- na partida;
- em regime normal de funcionamento.

Para a análise de atendimento, em regime normal de funcionamento devem ser avaliados basicamente, os efeitos dessa carga adicional em relação à disponibilidade da rede (primária e/ou secundária), transformador de distribuição níveis de tensão, etc.

A partida de um motor de indução necessita também de uma análise bem criteriosa, por absorver da rede uma corrente elevada, que provoca variações de tensão no circuito secundário ou primário no qual será ligado [49].

A análise compreende a avaliação e a definição de até que valor essa variação de tensão pode ser considerada não prejudicial, sem provocar reflexos indesejáveis às demais cargas ligadas à rede, bem como a necessidade ou não de aplicação de medidas corretivas.

A metodologia desenvolvida neste trabalho permite quantificar os efeitos causados às redes de distribuição de baixa tensão pela partida dos motores, permitindo identificar as ações corretivas passíveis de serem adotadas.

Após conhecer os distúrbios provocados na rede pela partida de um motor de indução é necessário definir critérios a serem adotados por todas as concessionárias para definir o acesso de cargas especiais, como o motor de indução, à rede de distribuição de baixa tensão.

Uma proposta de regulamentação deve possuir um critério de aceite e pelo menos um método de avaliação. Nos itens seguintes serão apresentadas as regras adotadas por

algumas concessionárias, bem como o critério de aceite e o método de avaliação a serem utilizados na proposta de regulamentação apresentada neste trabalho.

5.5.1. Regras Praticadas por Algumas Concessionárias Brasileiras

Segundo a Norma ND.10 [50] – “Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária Edificações Individuais” da ELEKTRO, definem-se as diversas modalidades de atendimento aos clientes, em função das cargas instaladas e/ou demandas dos mesmos, bem como as limitações para a ligação de motores de indução trifásicos.

Segundo o Anexo VI da ND.10 [50], só podem ter partida direta motores de até 5 cv na rede de baixa tensão com tensão nominal de 220/127 V e de até 7,5 cv na rede de baixa tensão com tensão nominal de 380 V. A partir dessas potências é indicado ao usuário a aplicação de alguma chave de partida aplicável aos motores de indução. O maior motor que pode ser ligado na rede de baixa tensão, mesmo utilizando chaves de partida é de 40 cv.

A ND-5.1 – Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária – Rede de Distribuição Aérea Edificações Individuais da CEMIG [51] especifica no capítulo 2 – Condições Gerais de Fornecimento que para o tipo de fornecimento D, fornecimento de energia a 4 fios (3 condutores Fases-Neutro) que abrange unidades consumidoras urbanas atendidas por redes secundárias trifásicas (127/220), podem ser ligados motores com potência nominal de até 15 cv, mas na ligação de motores de indução trifásicos com potência nominal superior a 5 cv, devem ser utilizados dispositivos auxiliares de partida, conforme indicado na tabela 8 da mesma norma.

Segundo a NTD-01 – Fornecimento de energia elétrica em baixa tensão da CELPA [52] a ligação de motores obedecerá aos limites especificados por categoria de fornecimento. Sujeitar-se-á ainda à análise a ser realizada pela CELPA, quando as potências forem superiores aos limites estabelecidos na tabela 9 da mesma norma, com relação a possíveis perturbações na rede.

Por exemplo, para a ligação trifásica do tipo T7 com demanda provável entre 57,1 e 66 kVA o maior motor que poderá ser ligado é um motor de 40 cv. Só é permitida a partida direta de motores de até 5cv e motores com potência maior deveram utilizar algum método de partida.

Segundo Instrução normativa da Cosern [53], não é permitida a ligação de motor trifásico com carga superior a 30 cv sem estudo técnico, em tensão secundária de distribuição. Motores com potência superior a 5 cv deverão usar um método de partida quando ligados em 220 V e 7,5 cv quando ligados em 380 V

Segundo o documento “Padronização de entrada de Energia Elétrica de unidades consumidoras de baixa tensão” [54] da CELESC, não é permitida a ligação de motores de indução ou máquina de solda com potência superior a 30 cv. Também especifica que motores com potência superior a 5 cv deverão possuir dispositivo que reduza a corrente de partida a um valor inferior a 2,25 vezes a corrente de plena carga.

A norma “Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária de Distribuição a Edificações Individuais” da COELBA [55] especifica que sempre que possível, os motores com potência superior a 5 cv devem dispor de dispositivo de partida para atenuar as correntes transitórias. Aponta também que não é permitida a ligação de motor trifásico com potência superior a 30 cv, em tensão secundária de distribuição.

Como foi possível observar nesse pequeno levantamento das condições de fornecimento exigidas por diferentes concessionárias, a maioria delas exige um dispositivo de partida associado a os motores trifásicos com mais de 5 cv. Entretanto, nem sempre é preciso que o consumidor tenha este gasto, já que dependendo das condições de carregamento da rede BT e da localização do motor as perturbações de motores maiores podem ser mínimas em alguns casos. Porém, é necessário um critério bem definido para avaliar se a partida de motores com potências maiores que 5 cv realmente causam algum prejuízo para a rede BT e/ou aos demais consumidores.

5.5.2. Critério de Aceite

O critério de aceite que será usado nesta proposta é a curva ITIC, derivada da curva CBEMA que foi originalmente proposta para caracterizar a sensibilidade de computadores *mainframe*, microcomputadores, equipamentos microprocessados, etc. A curva CBEMA foi modificada para melhor caracterizar a sensibilidade de computadores e demais equipamentos a fim de acomodar mais adequadamente a diversidade dos modernos dispositivos eletrônicos originando assim, a curva ITIC. Nesta curva à medida que a duração do afundamento aumenta, menor é a amplitude necessária para não provocar desligamentos de equipamentos. Por exemplo, tensões inferiores a 70% da tensão eficaz nominal precisam de algo mais do que 20 milisegundos para entrar na região de mau funcionamento ou desligamento por afundamento. Já para tensões inferiores a 80% e maiores que 70%, o tempo necessário para entrar na região de mau funcionamento é de 0,5 segundo ou mais.

O ideal seria ter como critério uma curva levantada especialmente para os equipamentos eletrônicos utilizados no Brasil e que considerasse também equipamentos como contadores, acionamentos de velocidade variável, mas como não existe um padrão nacional, nesta pesquisa será utilizada a curva ITIC [48].

5.5.3. Método de Avaliação Detalhada

Para a avaliação detalhada foi desenvolvida uma metodologia neste trabalho que permite obter os parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor a partir dos dados de placa conforme já foi amplamente exposto no capítulo anterior.

Depois de obter os parâmetros do circuito equivalente é realizada a análise da partida do motor a partir de sua equação dinâmica. Como foi comentado no item 5.2.1 foi implementado um módulo computacional que permite avaliar o impacto da partida do motor na tensão de qualquer barra da rede e nas correntes em qualquer trecho.

A título de ilustração, apresenta-se a seguir o estudo detalhado do impacto da ligação de um motor de 22 kW em uma barra de uma rede de baixa tensão.

A rede utilizada para esta ilustração é uma rede que possui um tronco de 5 km com cabo 336 MCM de alumínio e mais 5 km de ramal com um cabo 1/0 AWG de alumínio. Na extremidade do ramal de média tensão está ligado um transformador de distribuição de 45 kVA, o qual alimenta 65 consumidores distribuídos em 13 barras com consumo total de 20.860 kWh/mês, possuindo um comprimento total de 353 metros com cabo 2 AWG. O motor se encontra ligado em uma barra a 50 metros do transformador, conforme exibido na Figura 5.17. A tensão na barra de ligação do motor apresenta uma tensão de 0,96 pu em regime permanente.

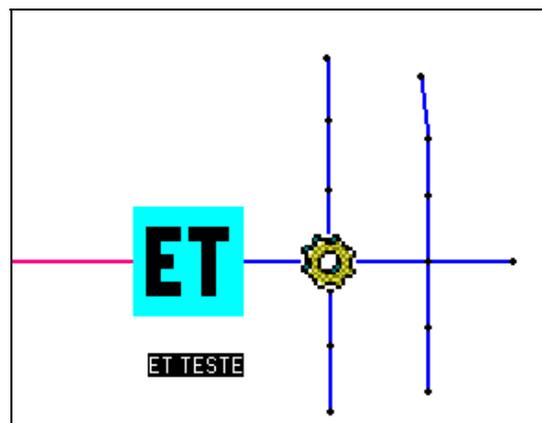


Figura 5.17. Rede de BT do exemplo apresentado

A partida do motor de 22 kW foi simulada utilizando a ferramenta desenvolvida neste trabalho e os resultados obtidos são apresentados a seguir.

A tensão mínima na barra do motor no instante de partida foi de 0,782 pu, o que representa uma queda de tensão de 21,8%. O tempo que a tensão fica abaixo de 0,80 pu é 2,295 segundos o que indica que a ligação de um motor desta grandeza poderá causar desligamento ou mau funcionamento de equipamentos de tecnologia da informação segundo a curva ITIC utilizada como referência.

Na Tabela 5.3 são apresentados os resultados obtidos para a ligação e partida de motores de diferentes potências na mesma barra. A tabela apresenta a tensão mínima

obtida na barra motor durante a simulação e a respectiva queda de tensão máxima, bem como os tempos em que a tensão fica abaixo de 0,90 e 0,80 pu.

Tabela 5.3 – Resultados do exemplo apresentado

Motor kW	Vmin pu	ΔV max %	T90 seg	T80 seg
11	0,842	15,79	0,59	0
15	0,808	19,18	1,275	0
18,5	0,792	20,76	1,295	0,775
22	0,782	21,76	2,645	2,295
30	0,749	25,14	5,195	5,615

5.5.4. Método de Avaliação Expedita

Visando simplificar o processo de avaliação dos efeitos causados pela partida de um determinado motor em uma barra de baixa tensão e objetivando um estudo mais rápido por parte das concessionárias com uma margem de erro mínima, este trabalho também propõe uma forma expedita para avaliar se um determinado motor pode ou não ser ligado em uma barra da rede BT.

O método de avaliação expedita constitui-se de uma série de gráficos (ábacos), construídos para condições determinadas de perfil de tensão e carregamento da rede BT, assim como para uma distância definida da barra de instalação do motor a partir do transformador de distribuição (ET).

Com o intuito de ilustrar o processo são apresentados os gráficos que permitem avaliar a possibilidade da instalação de um motor dependendo de sua potência, da potência nominal do transformador de distribuição e da distância da barra de ligação do motor até o transformador.

Os testes para levantar as curvas foram realizados utilizando quatro ETs com potências de 30, 45, 75 e 112,5 kVA. Cada uma delas tem uma carga associada que representa aproximadamente 70% da potência da ET. Motores de 11, 15, 18,5, 22 e 30 kW foram escolhidos para os testes. As distâncias utilizadas para as simulações foram de 25, 50, 75, 100, 125, e 150 metros entre a barra do motor e a ET.

Para cada uma das combinações resultantes de ETs e motores foram calculados a tensão mínima na barra do motor, a queda de tensão e o tempo que a tensão permaneceu abaixo de 0,80 pu. Para obter esses valores, foi utilizada a metodologia desenvolvida neste trabalho. Os ábacos obtidos com esta metodologia são apresentados a seguir.

Na Figura 5.18 é possível identificar a tensão mínima provocada pela ligação de um motor de potências de 11, 15, 18,5, 22 e 30 kW instalado em uma barra a 50 m da ET, cuja tensão é 0,96 pu em regime permanente. Observa-se que tensão mínima também varia dependendo da potência do transformador de distribuição que atende a rede BT.

Por exemplo, para um motor de 11 kW atendido por uma ET de 30 kVA, a tensão mínima na barra de ligação durante a partida do motor será de 0,824 pu. O mesmo motor atendido por uma ET de 75 kVA provoca uma tensão mínima de 0,858 pu e, no caso de ser atendido por uma ET de 112,5 o valor da tensão mínima será de 0,867 como pode ser visto na Figura 5.18.

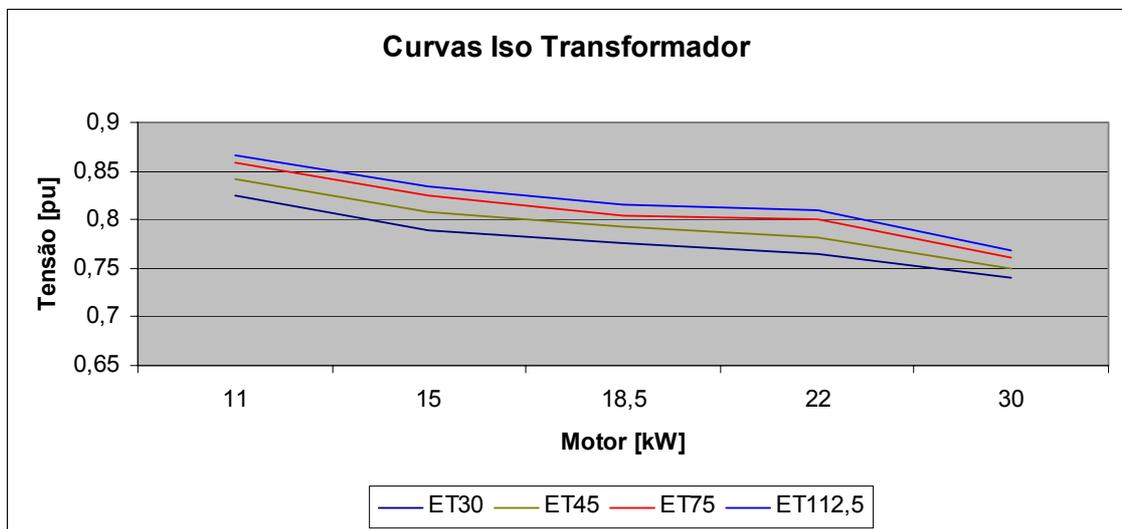


Figura 5.18. Curvas ISO transformador em função da potência do motor

A Figura 5.19 apresenta as curvas da tensão mínima na barra do motor em função da potência do transformador. Basicamente, esse gráfico mostra as mesmas curvas do gráfico anterior, porém agora parametrizadas por motor e não por transformador.

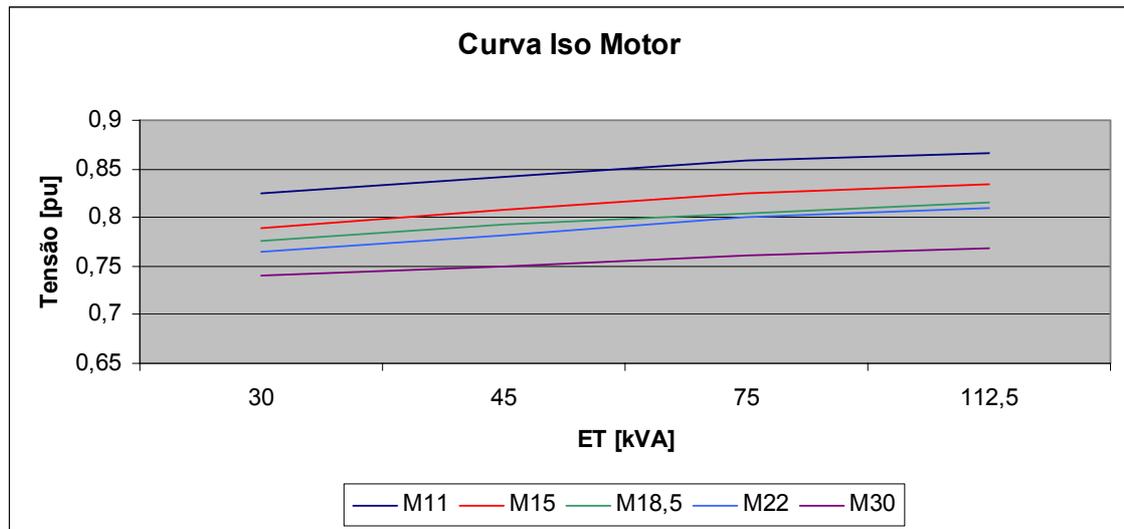


Figura 5.19. Curvas ISO motor em função da potência da ET

As curvas do tempo de tensão abaixo de 80% na Figura 5.20 juntamente com a as curvas da Figura 5.18 permitem ao usuário determinar se a ligação de um determinado motor cumpre ou não o critério da curva ITIC.

Vale ressaltar que essas curvas foram obtidas para condições específicas de tensão em regime permanente igual a 0,96 pu na barra na qual foi instalado o motor, a uma distância de 50 m da ET.

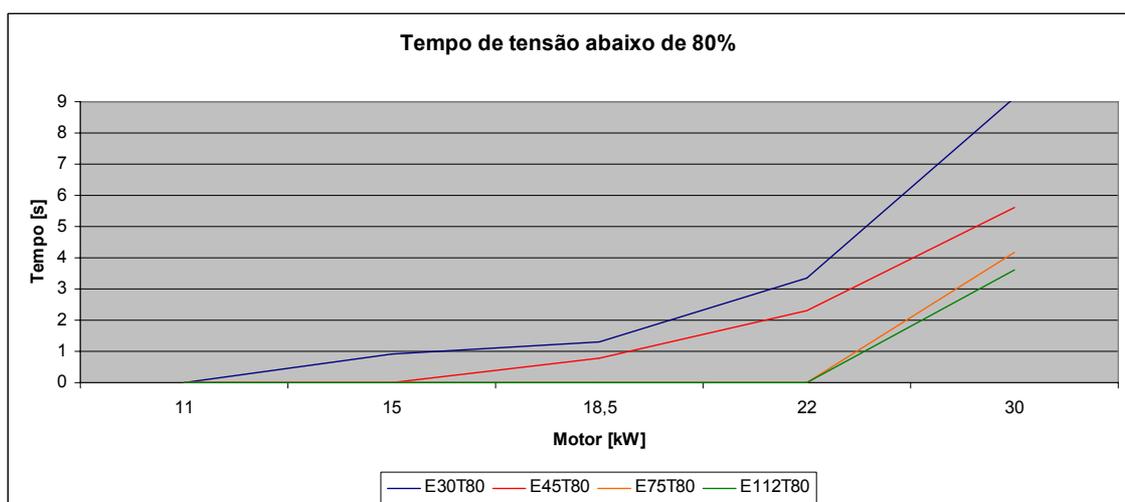


Figura 5.20. Tempo de tensão abaixo de 80% em função da potência do motor

Da Figura 5.21 à Figura 5.24 são apresentadas as tensões mínimas na barra do motor em função da distância da barra do motor à ET. Pode-se observar que quanto mais longe o motor é instalado, maior a queda de tensão nessa barra. As curvas foram levantadas considerando que a tensão na barra do motor, independentemente da sua localização, estava em 0,96 pu em regime permanente.

O objetivo desses gráficos foi isolar o efeito da queda de tensão provocada por um comprimento adicional de rede do motor até a ET do efeito da queda de tensão provocada por uma tensão em regime permanente menor na barra do motor.

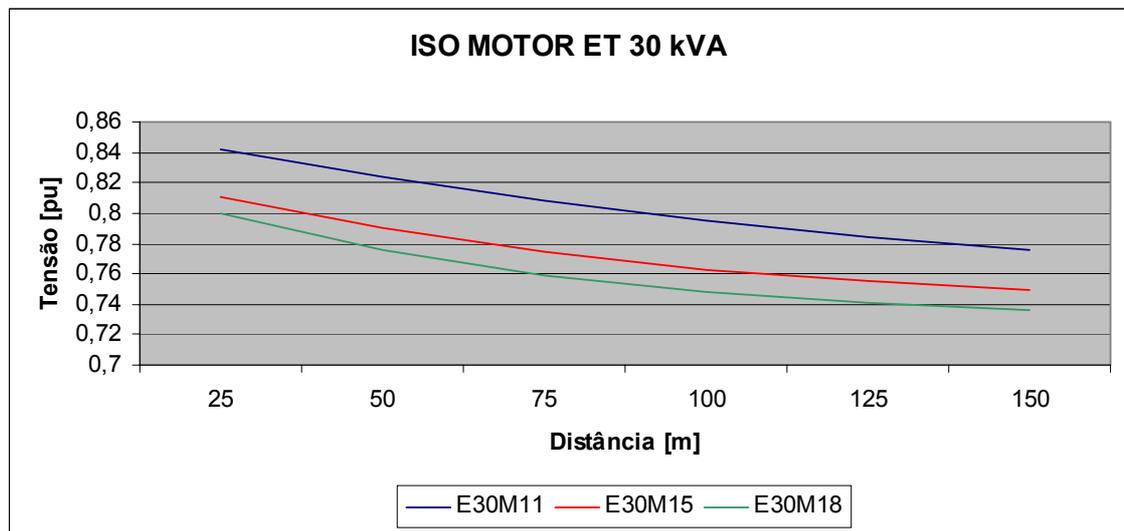


Figura 5.21. Curvas ISO motor para ET de 30 kVA em função da distância

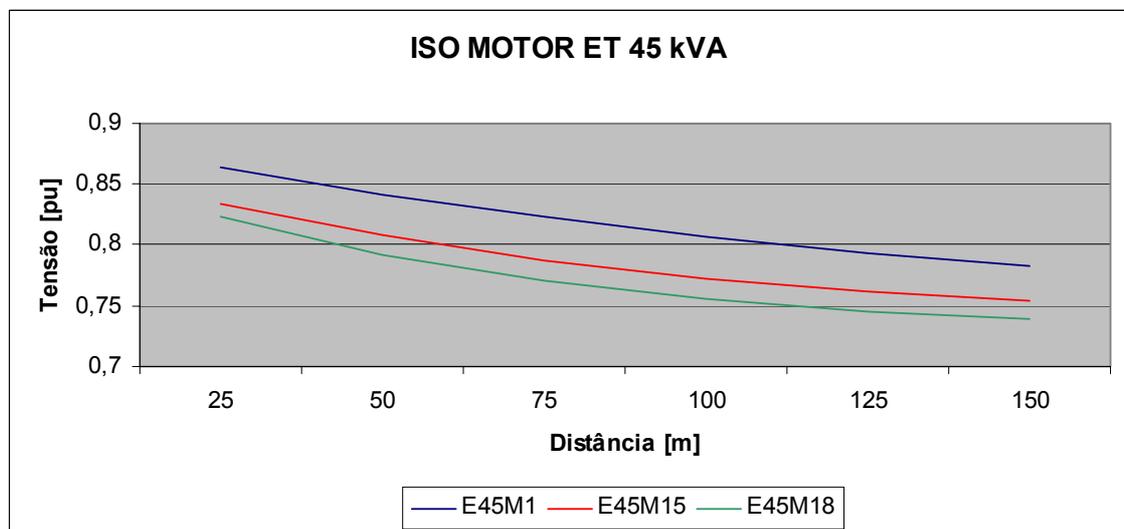


Figura 5.22. Curvas ISO motor para ET de 45 kVA em função da distância

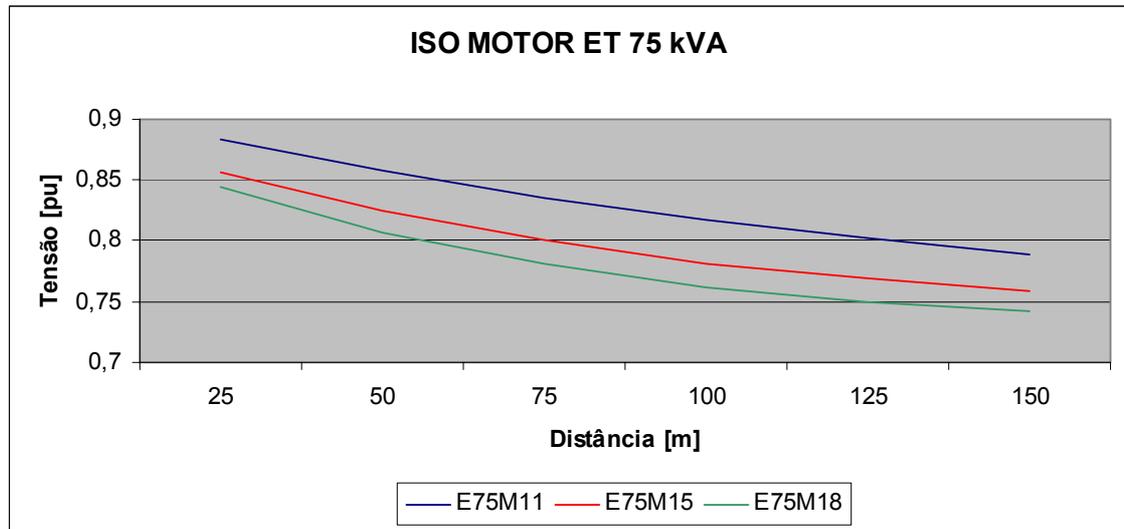


Figura 5.23. Curvas ISO motor para ET de 75 kVA em função da distância

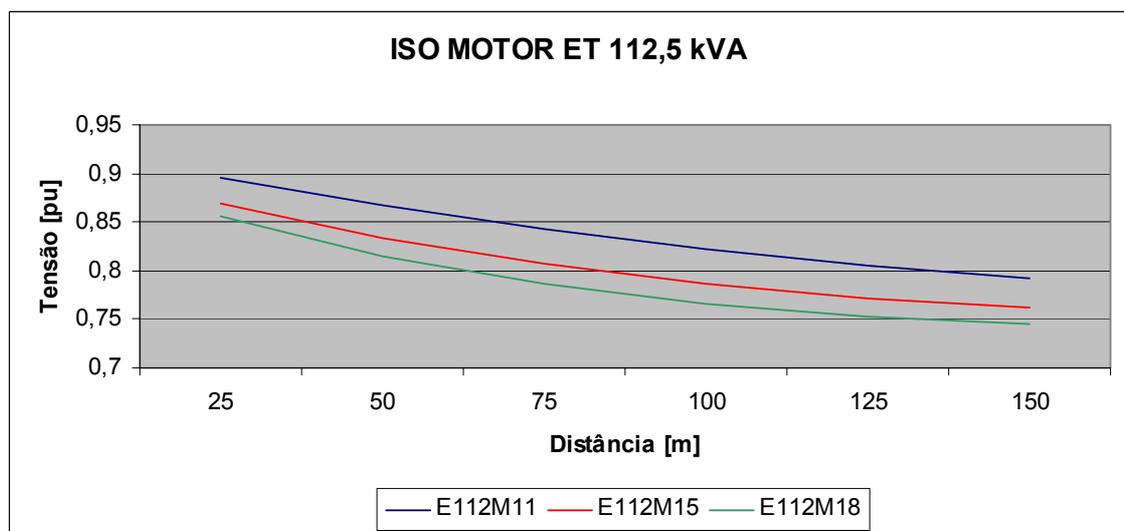


Figura 5.24. Curvas ISO motor para ET de 112,5 kVA em função da distância

Da análise dos gráficos apresentados nas figuras anteriores é possível observar que, dependendo da potência da ET que atende a rede BT e da localização do motor, mesmo sendo sua potência maior que 5 cv, em alguns casos não haverá problemas de tensão que levem ao mau funcionamento dos equipamentos dos consumidores vizinhos. Por exemplo, observando a Figura 5.18 e a Figura 5.20, conclui-se que podem ser ligados diretamente à rede motores de até 22 kW em ETs de 75 e 112,5 kVA sem que a variação de tensão causada por sua partida viole o critério da curva ITIC.

Deve-se observar ainda que os gráficos foram levantados para uma classe específica de motor de um determinado fabricante. Os dados de placa anunciados pelo fabricante podem sofrer variações de motor para motor, mesmo quando comparados motores de um mesmo lote de fabricação. Isso se deve às variações nas diversas etapas do processo de fabricação de um motor. Conseqüentemente, o desempenho final do motor poderá divergir dos próprios dados de placa.

Dessa forma, seria interessante considerar uma margem de segurança ao utilizar os gráficos para analisar a viabilidade da ligação de um motor. Essa margem de segurança depende tanto da classe de motor como de seu fabricante. Alguns fabricantes disponibilizam as curvas máxima e mínima de torque de seus motores. Se for necessária uma análise com resultados mais precisos deve-se utilizar o método detalhado, pois com ele é possível simular o motor desejado com seus respectivos dados de placa, sendo possível considerar algumas variações em torno dos dados anunciados pelo fabricante.

A variação de tensão máxima na pior barra da rede BT tem influência do carregamento e dependerá também das características da carga (por exemplo, uma carga resistiva ou indutiva) e da localização desta barra, ou seja, se ela se encontra ou não muito longe da ET.

5.6. CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou os impactos que a partida de um motor pode causar na rede de distribuição e as formas de mitigar seus efeitos nocivos. Como formas de mitigação foram apresentados diversos métodos de partida que podem ser utilizados.

Entretanto, a utilização de um método de partida impõe um custo ao consumidor que deseja acessar a rede com um motor. Dessa forma, foi visto que é possível permitir o acesso sem o uso de um método de partida desde que haja critérios bem definidos.

Nesse sentido foi apresentada uma proposta de regulamentação, a qual sugere a utilização da curva ITIC como critério de aceite e a utilização de um conjunto de

gráficos para uma avaliação expedita da viabilidade do acesso de um motor à rede. O método desenvolvido neste trabalho e apresentado no capítulo anterior constitui-se em um método de análise detalhada mais preciso que faz parte da proposta de regulamentação.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E TÓPICOS PARA FUTURO DESENVOLVIMENTO

Este trabalho apresentou uma nova metodologia para realizar a estimação dos parâmetros do circuito elétrico equivalente do motor de indução utilizando algoritmos evolutivos para, posteriormente, utilizar o modelo do circuito elétrico equivalente obtido para analisar a resposta da rede de distribuição ante a partida de motores de diferentes potências, considerando diferentes métodos de partida.

A primeira grande contribuição deste trabalho foi a apresentação de uma forma inédita do cálculo dos parâmetros do circuito equivalente do motor de indução, a qual faz uso dos Algoritmos Evolutivos para, a partir dos dados de placa do motor, obter os valores das resistências e reatâncias do rotor e do estator, bem como do ramo de magnetização. Este novo método considera a variação dos parâmetros do motor. Tais variações ocorrem devido a dois fenômenos físicos presentes nos motores de indução: o efeito pelicular e a saturação do núcleo.

Pode-se observar que a metodologia apresentada neste trabalho estima resultados mais próximos dos valores reais das características do motor, tais como torques e correntes. No algoritmo evolutivo utilizado foi necessária uma população muito menor e um número de iterações reduzidas se comparadas a estudos realizados anteriormente.

A partir dos casos analisados, verifica-se que a metodologia e a ferramenta desenvolvidas permitem realizar estudos detalhados de partida de motores, os quais dão a indicação dos pontos mais críticos durante a partida, bem como o instante de sua ocorrência. Adicionalmente, é possível avaliar o impacto do uso de outros dispositivos de partida, auxiliando na definição do melhor dispositivo a ser utilizado. A representação correta dos motores de indução na sua partida permitirá a identificação de

afundamentos momentâneos de tensão tanto em pontos da rede secundária quanto da rede primária.

A segunda contribuição apresentada neste trabalho foi a proposta de regulamentação que sugere utilizar a curva ITIC como critério para definir se a partida de um determinado motor na rede de baixa tensão pode ser realizada sem correr o risco de que sua partida direta cause perturbações nas cargas dos usuários adjacentes à barra onde se deseja instalar o motor.

Na proposta de regulamentação aqui exposta existem duas formas de realizar a análise de ligação do motor. Uma delas é a forma detalhada que permite fazer o estudo para um motor específico ligado em uma rede de baixa tensão, atendida por um transformador de distribuição de uma determinada potência, a uma determinada distância do transformador. A outra forma é a metodologia de avaliação expedita na qual são utilizadas curvas previamente levantadas para um conjunto de características específicas que permitem determinar rapidamente se o motor pode causar ou não perturbação que leve ao mau funcionamento dos equipamentos de usuários alimentados pela mesma rede de baixa tensão.

Foi demonstrado que apesar da maioria das concessionárias limitar a partida direta de motores em redes de baixa tensão a motores de até 5 cv, motores com potências maiores podem ser ligados na rede sem violar o critério estabelecido. A queda máxima de tensão causada pela ligação de um motor na pior barra de uma rede de baixa tensão estará fortemente influenciada pelo carregamento da rede e pelo tipo de carga associada à barra em questão, assim como por sua localização.

Os esforços de pesquisa deste trabalho mostram que o tema ainda não se esgotou e que alguns tópicos ainda necessitam de mais estudos:

- Neste trabalho foram levantados os gráficos para análise expedita para um conjunto de condições específicas. Seria interessante realizar o levantamento destas curvas para outras condições de carregamento da rede BT, outros valores de tensão em

regime permanente na barra onde se deseja ligar o motor, outras bitolas de cabo da rede de baixa tensão, entre outras.

- O critério utilizado na proposta de regulamentação foi a curva ITIC de sensibilidade de equipamentos de tecnologia da informação, mas seria interessante ampliar o critério considerando as curvas de sensibilidade de outros equipamentos como contadores ou de acionamentos de velocidade variável.
- As análises realizadas neste trabalho estiveram restritas aos motores trifásicos. Como os motores monofásicos também são amplamente utilizados por consumidores alimentados pelas redes de baixa tensão, a metodologia poderia ser estendida para considerar os efeitos da partida desse tipo de motor na rede.
- Estender a análise realizada para partidas simultâneas de motores de indução, já que esta é uma situação que se apresenta com muita frequência na maioria das redes de distribuição de uma concessionária típica.
- Finalmente, seria interessante estender a metodologia desenvolvida neste trabalho para realizar a análise da ligação de outras cargas perturbadoras como, por exemplo, aparelhos de raios X, máquinas de solda e fornos a arco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHAPMAN, S. J. *Electric machinery fundamentals*, 4. ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, c2005.
- [2] GOLDEMBERG, C. *Determinação dos Parâmetros Funcionais de Motores de Indução a partir de Catálogos de Fabricantes*, Dissertação de Mestrado, UNICAMPI, São Paulo, 1992.
- [3] GÓMEZ, J. C.; MORCOS M. M. *Estimation of Voltage Sag Effects on Sensitive Equipment Due to Induction Motor Starting Cycles*, *Electric Power Components and Systems*, Taylor & Francis Group, 2003.
- [4] DUGAN, S. J., McGRAHAGHAN, M. F. *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 1996.
- [5] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução 505, de 20 de novembro de 2001.
- [6] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução 456, de 29 de novembro de 2000.
- [7] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução 024, de 27 de janeiro de 2000.
- [8] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução 281, de 01 de novembro de 1999.
- [9] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*, 2008.
- [10] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, *Submodulo 2.8 – Gerência dos Padrões de Desempenho da Rede Básica*, 2008.

- [11] European Committee for Electrotechnical Standardization – CENELEC, Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems, Brussels, Belgium, 1999.
- [12] Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Standard 1159 – 1995, 1995. www.ieee.org.
- [13] Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications, IEEE Standard 446 – 1995, 1995.
- [14] Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances, IEEE Standard 1250 – 1995, 1995.
- [15] International Electrotechnical Commission – IEC, Electromagnetic Compatibility, IEC Standard 61000, 1996.
- [16] International Electrotechnical Commission – IEC, Voltage Dips and Short Supply Interruption, IEC 61000-2-1, 1990.
- [17] International Electrotechnical Commission – IEC, Voltage Dips and Short Interruption on Public Electric Power Supply Systems with Statistical Measurement Results, IEC 61000-2-8, 2002.
- [18] MICHALEWICZ, Z. & FOGEL, D. B. How to solve it: Modern Heuristics, Springer-Verlag, 2000.
- [19] HOLLAND, J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems, 2nd edition, The MIT Press, 1992.

- [20] KOZA, J.R. Genetic Programming: On the Programming of Computers by means of Natural Selection, The MIT Press, 1992.
- [21] RECHENBERG, I. Cybernetic Solution path of an Experimental Problem, *Royal Aircraft Establishment*, Library Translation no. 1122, 1965.
- [22] SCHWEFEL, H.-P. Kybernetische Evolution als Strategie der experimentellen Forschung in der Strömungstechnik, Diplomarbeit, Hermann Föttinger Institut für Strömungstechnik, Technische Universität, Berlin, 1965.
- [23] EL HAGE, F. Desenvolvimento e Aplicação de um Algoritmo Evolutivo para a Otimização de Unidades de Geração Distribuída em Redes de Distribuição de Energia Elétrica, Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, 2004.
- [25] FOGEL, L.J., OWENS, A.J. & WALSH, M.J. Artificial Intelligence through Simulated Evolution, Wiley, 1966.
- [26] JARDINI, J. A.; TAHAN, C.M.; CASOLARI, R. P. e outros. Curvas Diárias de Carga Base de Daos Estabelecida com Medições em Campo, CIRED, Argentina, 1996.
- [27] JARDINI, J. A.; CASOLARI, R. P.; FERRARI, E. L. e outros. Curvas Diárias de Carga de Consumidores Comerciais e Industriais, XIII SENDI – Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, São Paulo, Maio de 1997.
- [28] JARDINI, J. A.; CASOLARI, R. P.; FERRARI, E. L. e outros. Curva de Carga de Consumidores Industriais de Média Tensão da Eletropaulo, CED – Centro de Excelência em Distribuição, CED 202 / PLAN 006 / NT 004 / OR, São Paulo, Setembro de 1995.
- [29] STEVENSON W.; GRAINGER, J.; Power Analysis, McGraw-Hill, 1994.

- [30] ANDERSON, P., FOUAD, A. A. Power system control and stability. The Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [31] PILLAY, P.; NANGSUE, P. Evolutionary Algorithms for Induction Motor Parameter Determination, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, 1999.
- [32] KAGAN, N., OLIVEIRA, C. C., GUARALDO, J. C., EL HAGE, F., MEFFE A., FILHO, M. M. INTERPLAN - A Tool for Planning High, Medium and Low Voltage Networks. IEEE/PES T&D 2004 - Transmission and Distribution, 2004, São Paulo. IEEE/PES T&D 2004 - Transmission and Distribution, 2004.
- [33] PILLAY, P.; NOLAN, R.; HAQUE, T. Application of Genetic Algorithms to Motor Parameter Determination for Transient Torque Calculations, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 33, No. 5, 1997.
- [34] LIS, J. M.; ORLOWSKA-KOWALSKA, T. Application of Evolutionary Algorithms with Adaptive Mutation to the Identification of Induction Motor Parameters at Standstill, EUROCON 2007, The International Conference on "Computer as a Tool" Wrsaw, 2007.
- [35] ABDELHADI, B.; BENOUDIJT, A.; NAIT-SAID, N. Application of Genetic Algorithm With a Novel Adaptive Scheme for the Identification of Induction Machine Parameters, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2, 2005.
- [36] URSEM, R.; VADSTRUP, P. Parameter Identification of induction Motors using stochastic optimization algorithms, Applied Soft Computing 4, 2004.
- [37] WILLIAMSON, S.; ROBINSON, M. J. Calculation of cage induction motor equivalent circuit parameters using finite elements, IEE Proceedings -B, Vol. 138, No. 5, September, 1991.

- [38] ALONGE, F.; D'IPPOLITO, F.; RAIMONDI, F. M. Least squares and genetic algorithms for parameter identification of induction motors, *Control Engineering*, 2001.
- [39] BANAN, K.; SHARIFIAN, M.; MOHAMMADI, J. Induction Motor Efficiency Estimation using Genetic Algorithm, *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 3, January, 2005.
- [40] WEATHERFORD, H. H.; BRICE, C. W. Estimation of Induction Motor Parameters by a Genetic Algorithm, *IEEE*, 2003.
- [41] LINDENMEYER, D.; DOMMEL, H. W.; KUNDUR, P. An Induction Motor Parameter Estimation Method, *Electrical Power and Energy Systems* 23, 2001.
- [42] RAZIK, H.; DAFRANOUX, C.; REZZOUG, A. Identification of Induction Motor using a Genetic Algorithm and a Quasi-Newton Algorithm, *CIEP, Acapulco Mexico*, October, 2000.
- [43] CULIOLI, J. C. *Introduction A l'optimisation*, Ellipses, 1994.
- [44] DENNIS, J. R.; SCHNABEL, R. B. *Numerical methods for unconstrained optimization and nonlinear equations*, re-edition, SIAM edition, 1996.
- [45] BONNANS, J. F.; GILBERT, J. C.; LEMARBCHAL, C. *Optimisation Numérique - Aspects théoriques et pratiques*, Springer – Verlag, 1997.
- [46] EPRI, CEIDS – *The Cost of Power Disturbances to Industrial and Digital Economy Companies*, California, EPRI, 2001.
- [48] ITIC (CBEMA) curve Application Note. “Technical Committee 3 (TC3) of the Information Technology Industry Council”. Disponível em <http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf>

-
- [49]ELEKTRO, Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária Edificações Individuais – Norma Técnica ND.10, 2004.
- [50]ELEKTRO, Ligações de Motores às redes de Distribuição de Energia Elétrica - Norma Técnica ND.52, 2004.
- [51]CEMIG, Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária – Rede de Distribuição Aérea Edificações Individuais – Norma Técnica ND.51, 1998.
- [52]CELPA, Fornecimento de Energia Elétrica em Baixa Tensão – Norma Técnica NTD-01, 2004.
- [53]COSERN, Instrução Normativa – DA30.02, 2005.
- [54]CELESC, Padronização de Entrada de Energia Elétrica de Unidades Consumidoras de Baixa Tensão – Especificação E-321.0001, 2007.
- [55]COELBA, Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária de Distribuição a Edificações Individuais – Norma Técnica SM04.14.001, 2008.