

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PRISCILLA LEITE MALTA

**ESTUDO DA QUALIDADE DE ENERGIA NO ACIONAMENTO DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS NO SAAE DE VIÇOSA**

VIÇOSA
2011

PRISCILLA LEITE MALTA

**ESTUDO DA QUALIDADE DE ENERGIA NO ACIONAMENTO DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS NO SAAE DE VIÇOSA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ms. Mauro Prates.

VIÇOSA
2011

PRISCILLA LEITE MALTA

**ESTUDO DA QUALIDADE DE ENERGIA NO ACIONAMENTO DE
MÁQUINAS ELÉTRICAS NO SAAE DE VIÇOSA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em de de 2011.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Ms. Mauro Prates - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Denilson Eduardo Rodrigues - Membro
Universidade Federal de Viçosa

*“O início da sabedoria é a admissão da própria ignorância. Todo o meu saber consistem em
saber que nada sei.”
(Sócrates)*

Aos meus pais, por todo amor e apoio depositados.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pela força e sustento para seguir nessa caminhada. Aos meus pais, Neide e Amaury, por todo o carinho, dedicação e paciência. Ao Jorge, pelo incentivo e compreensão nos momentos difíceis. Ao Dudu, por toda a amizade e contribuição para a elaboração deste trabalho. Ao meu orientador Mauro Prates, pela colaboração e disponibilidade prestadas. E Finalmente ao SAAE de Viçosa, pela oportunidade de pesquisa e estágio.

Resumo

A qualidade da energia elétrica tem se tornado uma preocupação crescente e comum às empresas de energia elétrica e aos consumidores de um modo geral. A razão para tal é o emprego, cada dia maior, de dispositivos altamente sensíveis aos padrões do suprimento elétrico. A expansão do consumo aliado ao desenvolvimento tecnológico faz necessárias a análise e a compreensão dos fenômenos que afetam a qualidade de energia elétrica, bem como apresentação de soluções para minimizá-los. O objetivo deste trabalho é estudar os problemas relacionados à qualidade de energia, em específico os harmônicos e as variações de tensão de curta duração, discutindo o impacto destes nos equipamentos e componentes do sistema elétrico industrial do SAAE de Viçosa e apresentar alternativas para a solução desses distúrbios. Para tanto foram realizadas medições no barramento dos motores do SAAE através do analisador de qualidade de energia FLUKE, série 430, coletando dados de tensão, corrente, conteúdo harmônico e frequência. Fez-se a análise dos sinais coletados avaliando a partida dos motores por meio *soft-starter* e partida compensadora com autotransformador, além da utilização de um banco de capacitor. Com isso, foi possível distinguir a importância de cada dispositivo utilizado na indústria, além do impacto relacionado à qualidade de energia que os mesmos provocam. Após a análise dos distúrbios da qualidade de energia propôs-se a viabilidade do uso de dispositivos e equipamentos para melhorias no sistema elétrico do SAAE.

Sumário

1	Introdução.....	122
1.1	Estrutura do Trabalho	13
1.2	Caracterização dos Distúrbios na Qualidade	13
1.2.1	Introdução	13
1.2.2	Harmônicas	15
1.2.3	Afundamentos de Tensão	22
1.3	Métodos de Partida	25
1.3.1	Introdução	25
1.3.2	Partida Compensadora com Autotransformador	25
1.3.3	Partida com <i>Soft-Starter</i>	26
1.4	Objetivo Geral	28
2	Materiais e Métodos	29
2.1	Introdução	29
2.2	Descrição dos Materiais.....	31
2.2.1	Na partida compensadora	31
2.2.2	Na partida por <i>soft-starter</i>	31
2.2.3	Analisador de Qualidade de Energia	32
2.3	Considerações de Caso	32
3	Resultados e Discussões.....	33
3.1	Motor com Acionamento Compensador	33
3.2	Motor com Acionamento por <i>Soft-Starter</i>	298
3.3	Discussões Finais.....	44
4	Conclusões.....	46
	Referências Bibliográficas	47

Lista de Figuras

Figura 1 - Ligação de partida de um motor de indução trifásico com autotransformador.	26
Figura 2 - Esquema genérico de um soft-starter com 6 tiristores.....	26
Figura 3 - Tensão em rampa ajustada pela soft-starter aplicada ao motor.	27
Figura 4 - Comparativo do comportamento das partidas soft-starter e compensadora.....	28
Figura 5 - Detalhe da captação do São Bartolomeu.	29
Figura 6 - Bombeamento para ETA1..	30
Figura 7 - Diagrama unifilar das cargas da Captação ETA1.....	30
Figura 8 - Tensões trifásicas na partida do motor com chave compensadora.	33
Figura 9 - Correntes trifásicas na partida do motor com chave compensadora.....	33
Figura 10 - THD de tensão para o motor com partida compensadora.....	35
Figura 11 - THD de corrente para o motor com partida compensadora.....	35
Figura 12 - THD de corrente com a retirada do banco de capacitores.	36
Figura 13 - Harmônicos de corrente no motor com chave compensadora (a) 3 ^a ordem, (b) 5 ^a ordem e (c) 7 ^a ordem.....	37
Figura 14 - Corrente no neutro medida com o motor de chave compensadora acionado.	37
Figura 15 - Variações de frequência da rede na partida do motor com chave compensadora.	38
Figura 16 - Tensões trifásicas na partida do motor com chave <i>soft-starter</i>	39
Figura 17 - Correntes trifásicas na partida do motor com chave <i>soft-starter</i>	39
Figura 18 - Tensões trifásicas controladas na entrada do motor.	40
Figura 19 - THD de tensão para o motor com partida <i>soft-starter</i>	41
Figura 20 - THD de corrente para o motor com partida <i>soft-starter</i>	41
Figura 21 - – Harmônicos de corrente no motor com chave <i>soft-starter</i> (a) 3 ^a ordem, (b) 5 ^a ordem e (c) 7 ^a ordem.....	43
Figura 22 - Corrente no neutro medida com o motor de chave <i>soft-starter</i> acionado.....	43
Figura 23 - Variações de frequência da rede na partida do motor com chave <i>soft-starter</i>	44

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Categorias e Características dos Fenômenos Eletromagnéticos.....	14
Tabela 2 – Limites de Distorção Harmônica de Tensão.....	16
Tabela 3 – Limites de Distorção Harmônica de Corrente em % de IL.	17
Tabela 4 – Classificação dos Harmônicos	17
Tabela 5 – Tabela comparativa dos distúrbios medidos nos dois métodos de acionamentos..	44

1 Introdução

O termo qualidade de energia é um conceito abrangente para diversos tipos de distúrbios em um sistema de energia elétrica. Desde o fim dos anos 80 a qualidade de energia tem se tornado uma preocupação crescente para as concessionárias de energia elétrica e para os consumidores, devido, principalmente, ao aumento do nível de harmônicos gerados por cargas eletrônicas e também à utilização crescente de sistemas de controle microprocessados, resultando em cargas sensíveis aos distúrbios relacionados com a qualidade da energia [1].

Para caracterizar a qualidade da energia elétrica, são analisados os sinais de tensão em sua amplitude, forma de onda e frequência. Um problema de qualidade da energia elétrica pode ser definido como qualquer desvio ou alteração manifestada nestas grandezas, que resulte na falha ou operação inadequada de instalações, aparelhos ou equipamentos. Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária [2].

Segundo [3], podem-se destacar os seguintes motivos para a atual preocupação com a qualidade de energia:

- Os equipamentos atuais são mais sensíveis aos fenômenos de qualidade de energia que os utilizados no passado;
- O maior enfoque aos programas de conservação de energia propiciou o uso de cargas eficientes e não lineares. Também o crescimento industrial e o avanço tecnológico proporcionaram o aumento do uso de cargas perturbadoras da qualidade de energia, a exemplo dos computadores, aparelhos eletroeletrônicos, lâmpadas de descarga e compactas, micro-ondas, além de controladores de intensidade luminosa, inversores de frequência, dentre outras;
- Os impactos econômicos para as concessionárias, consumidores e os fabricantes de equipamentos. A energia de má qualidade diminui a vida útil de equipamentos e causa elevados prejuízos devido à parada na produção;
- Os consumidores estão se conscientizando sobre as questões de qualidade de energia, seus deveres e direitos;
- O aumento das interligações da rede. Com os processos integrados falhas em algum componente podem trazer importantes consequências.

1.1 Estrutura do trabalho

Esse trabalho foi dividido em quatro capítulos e organizado da seguinte forma: no capítulo 1 é apresentado o conceito de qualidade de energia elétrica e a justificativa para o destaque dado a esse tema nos últimos anos. Em seguida são apresentados os distúrbios na qualidade da energia, com uma descrição dos fenômenos harmônicos e afundamentos de tensão. Estes são conceituados e explicitados, destacando suas causas e consequências. Além disso, é feita uma breve abordagem aos métodos de partida de motores, com uma descrição para os métodos com chave compensadora com autotransformador e chave estática *soft-starter*.

O capítulo 2 trata da metodologia utilizada para a realização do trabalho. Nele é apresentada a forma como estão instalados os motores elétricos e outros dispositivos do SAAE de Viçosa.

O capítulo 3 mostra os resultados obtidos. Primeiro, mostrou-se os sinais de tensão, corrente, conteúdo harmônico e frequência de cada um dos métodos de partida analisados. Após isso, fez-se uma análise dos resultados, por meio de comparação entre os métodos. O capítulo 4 trata das conclusões extraídas do trabalho, bem como as sugestões de continuidade do mesmo.

1.2 Caracterização dos Distúrbios na Qualidade

1.2.1 Introdução

O termo qualidade de energia se refere a uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos, que caracterizam a tensão e a corrente em um determinado momento e local em um sistema de energia [4].

A crescente utilização de equipamentos eletrônicos que causam distúrbios eletromagnéticos, ou que são sensíveis a estes fenômenos tem aumentado o interesse na qualidade de energia nos últimos anos. Por conseguinte, vários estudos foram desenvolvidos para a descrição destes fenômenos, que podem ser classificados em diferentes categorias, uma vez que há diversas maneiras de resolver os problemas de qualidade de energia, dependendo da intensidade, duração ou frequência envolvida no evento.

A Tabela 1 apresenta as categorias e características dos principais distúrbios eletromagnéticos [4].

Neste capítulo serão conceituados os fenômenos relativos aos harmônicos e aos afundamentos de tensão (SAG), de acordo com a norma IEEE Std. 1159-1995 [4], visto que serão os objetos de análise deste trabalho.

Tabela 1 – Categorias e Características dos Fenômenos Eletromagnéticos

Categorias	Espectro	Duração	Tensão
1.1 Transitórios Impulsivos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns pico	< 50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1 μs pico	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0,1 ms pico	> 1 ms	
1.2 Transitórios Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	< 5 kHz	0,3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 Média Frequência	5 – 500 kHz	20 μs	0 – 8 pu
1.2.3 Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5 μs	0 – 4 pu
2. Variações de Curta Duração			
2.1 Instantâneo			
2.1.1 Afundamento (Sag)		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.1.2 Elevação (Swell)		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
2.2 Momentâneo			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos – 3s	< 0,1 pu
2.2.2 Afundamento (Sag)		30 ciclos – 3s	0,1 – 0,9 pu
2.2.3 Elevação (Swell)		30 ciclos – 3s	1,1 – 1,4 pu
2.3 Temporário			
2.3.1 Interrupção		3s – 1 min	< 0,1 pu
2.3.2 Afundamento (Sag)		3s – 1 min	0,1 – 0,9 pu
2.3.3 Elevação (Swell)		3s – 1 min	1,1 – 1,2 pu
3. Variações de Longa Duração			
3.1 Interrupção Permanente		> 1 min	0,0 pu

3.2 Subtensão		> 1 min	0,8 – 0,9 pu
3.3 Sobretensão		> 1 min	1,1 – 1,2 pu
4. Desequilíbrio de Tensão		Est. Permanente	0,5 – 2 %
5. Distorção da Forma de Onda			
5.1 Compensação CC (DC Offset)		Est. Permanente	0 – 0,1 %
5.2 Harmônicos	0 – 100 thH	Est. Permanente	0 – 20 %
5.3 Interharmônicos	0 – 6 kHz	Est. Permanente	0 – 2 %
5.4 Recortes de Comutação (Notching)		Est. Permanente	
5.5 Ruído	Banda larga	Est. permanente	0 – 1 %
6. Flutuação de Tensão	< 25 Hz	intermitente	0,1 – 7 %
7. Variação de Frequência da rede		< 10 s	

1.2.2 Harmônicas

As harmônicas são tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência a qual um sistema de energia está projetado para operar (denominado frequência fundamental; normalmente 50Hz ou 60Hz). As harmônicas combinam-se com a tensão ou corrente fundamental, e produzem as distorções harmônicas. A distorção harmônica existe devido à presença de cargas e dispositivos com características não lineares no sistema elétrico.

Estes dispositivos podem ser modelados como fonte de correntes que injetam correntes harmônicas no sistema de energia elétrica. A distorção de tensão é resultado de quedas de tensão não lineares causadas pelas correntes harmônicas atravessando as impedâncias do sistema. A distorção harmônica é uma preocupação crescente para muitos consumidores e para o sistema elétrico de energia no geral, devido ao aumento da aplicação de equipamentos da eletrônica de potência.

Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pela análise do espectro de harmônicas considerando as amplitudes e ângulos de fase de cada componente harmônica individualmente. Também é comum utilizar uma medida global, a distorção harmônica total (DHT ou THD, do inglês *Total Harmonic Distortion*), medida que considera a magnitude de

toda a distorção harmônica apresentada, conforme (1). A Tabela 2 mostra os limites de distorção harmônica de tensão recomendados segundo IEEE Std. 519-1992 [5].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 \text{ (em \%)} \quad (1)$$

onde V_h é o valor eficaz das componentes harmônicas individuais em volts, h é a ordem das harmônicas e V_1 é o valor eficaz da tensão fundamental em volts.

Tabela 2 – Limites de Distorção Harmônica de Tensão

Barra de Tensão	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)	Distorção Harmônica Total de Tensão THD (%)
$V_n \leq 69\text{kV}$	3,0	5,0
$69\text{kV} < V_n \leq 161\text{kV}$	1,5	2,5
$V_n > 161\text{kV}$	1,0	1,5

As harmônicas de corrente resultam da operação normal de cargas não lineares conectadas ao sistema de energia. Os níveis de distorção de corrente podem ser caracterizados pela distorção harmônica total, mas frequentemente isto pode gerar equívocos. Por exemplo, muitos controladores de velocidade ajustáveis apresentarão valores elevados de distorção harmônica para a corrente de entrada quando estes operarem com cargas muito leves. Neste caso isso não é significativo, pois a amplitude da harmônica de corrente é baixa, ainda assim a distorção total é relativamente alta.

Para caracterizar as harmônicas de corrente de forma consistente, o IEEE definiu outro termo, a distorção de demanda total (DDT), mostrado em (2).

$$DDT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100 \text{ (em \%)} \quad (2)$$

onde I_h é o valor eficaz das componentes harmônicas individuais em ampères, h é a ordem das harmônicas e I_L é o valor eficaz da corrente de carga na demanda máxima em ampères.

Em seguida a Tabela 3 apresenta os limites de distorção harmônica de corrente segundo IEEE Std. 519-1992 [5], no qual I_{SC} é a corrente de curto-circuito no ponto de

acoplamento comum (PAC), sendo este o ponto de ligação entre a concessionária e os vários consumidores.

Tabela 3 – Limites de Distorção Harmônica de Corrente em % de I_L

$V_n \leq 69\text{kV}$						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	DDT
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Os sinais harmônicos são classificados quanto à sua ordem (pares ou ímpares) e sequência (positiva, negativa ou zero), conforme mostrado pela Tabela 4, na qual está representada até a nona harmônica para fins de exemplificação.

As harmônicas de ordem ímpar são frequentes nas instalações elétricas em geral, enquanto as de ordem par são mais comuns nos casos de assimetrias do sinal, devido à presença de componente contínua. Quanto à sequência das harmônicas, importantes conclusões poder ser obtidas: de um modo geral, as de sequência positiva causam aquecimentos, vibrações e perdas adicionais; as de sequência negativa geram esses mesmos efeitos, além de reduzir o torque médio útil das máquinas; já as harmônicas de sequência zero indicam que pode haver significativa corrente circulando pelo neutro, no caso de conexão Y a 4 fios, ou pela malha no triângulo, na conexão Δ . Essas últimas são consideradas as harmônicas mais preocupantes, trazendo vários problemas para a instalação e os equipamentos a ela ligados [6][7].

Tabela 4 – Classificação dos Harmônicos

Ordem	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
Frequência (Hz)	60	120	180	240	300	360	420	480	540
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Existem várias cargas não lineares geradoras de harmônicos. Com a invenção e o desenvolvimento do tiristor, equipamentos de baixo custo e grande eficiência se tornaram disponíveis para que os motores CC ou de indução em gaiola de esquilo atuassem no acionamento de bombas, ventiladores e máquinas, com habilidade de controlar a velocidade das mesmas. A tecnologia cresceu rapidamente e a aplicação destes acionamentos incorporou-se ao processo de acionamento em todas as indústrias. Estas cargas não lineares aumentaram significativamente a partir dos anos 70.

Atualmente os conversores estáticos constituem uma das principais classes de cargas não lineares nos sistemas de potência. Englobando inversores, *soft-starters* e retificadores, podem ser divididos em três grupos com relação à geração de harmônicos: conversores de grande, média e baixa potência. Os de baixa potência estão relacionados com equipamentos de pequeno porte, tais como televisores, computadores e outros vários eletrodomésticos [8].

Os conversores eletrônicos de potência trifásicos diferem dos conversores monofásicos em particular porque não produzem correntes de 3ª ordem e seus múltiplos (a ordem h da harmônica pode ser obtida pela expressão $h=kq\pm 1$, no qual q é o número de pulsos do conversor e k é qualquer inteiro positivo). Isto representa uma vantagem, uma vez que as harmônicas triplas são aditivas no neutro de um sistema trifásico. No entanto, os conversores trifásicos constituem significantes fontes de harmônicos, como às presentes nos acionamentos de velocidade variável e fontes ininterruptas de energia [9].

É comum a presença de cargas monofásicas com fontes chaveadas monofásicas em edifícios comerciais. Uma característica distintiva das fontes chaveadas monofásicas é o alto conteúdo de 3ª harmônica presente na corrente. O crescente aumento dessas fontes causa preocupação com a sobrecarga no neutro, em especial em instalações mais antigas. Há ainda uma preocupação com o sobreaquecimento de transformadores devido à combinação de conteúdo harmônico da corrente, fluxo de dispersão, e elevada corrente no neutro [9].

Também apresenta características não lineares a família das lâmpadas fluorescentes, que incluem lâmpadas com processo de funcionamento de descargas elétricas a partir do *starter* ou reator, e também descargas elétricas a partir de circuito eletrônico. São responsáveis por 40% a 60% da carga elétrica comercial, o que representa uma parcela importante na geração de harmônicos. Alguns fabricantes têm melhorado os seus projetos de reatores eletrônicos, obtendo uma forma de onda mais limpa [10].

Equipamentos com dispositivos saturáveis incluem transformadores, motores e outros dispositivos com núcleo de ferro. Os transformadores de potência são fontes de harmônicos uma vez que, por razões econômicas, os transformadores são construídos com dimensões tais que sempre ocorre saturação magnética do material ferromagnético que constitui o seu núcleo, quando estes operam próximo das condições nominais. Isso resulta em correntes harmônicas, principalmente de 3º ordem. Quando operados em condição de carga leve, serão conduzidos para as regiões saturadas de seu núcleo ferromagnético resultando em uma corrente de excitação com amplitude maior que o normal e significativamente distorcida [9].

Transformadores não são tão preocupantes como conversores eletrônicos de potência ou dispositivos a arco, os quais produzem correntes harmônicas da ordem de 20% ou mais, referida às suas capacidades nominais. Entretanto, o seu efeito é importante, particularmente em sistemas de distribuição de empresas de energia elétrica que possuem centenas de transformadores [10].

O conteúdo harmônico produzido por fornos a arco é imprevisível, randômico, por causa da variação do arco elétrico a cada ciclo, particularmente no estágio inicial de fusão. Geram frequências harmônicas e interharmônicas (isto é, harmônicos cujas frequências não são múltiplos inteiros da frequência fundamental) de largo espectro contínuo, sendo predominante e de maior amplitude as harmônicas de ordem 3º, 2º, 5º e 4º, respectivamente. Entretanto, os valores médios das amplitudes das correntes harmônicas dos fornos são relativamente baixos, se comparados com os gerados pelos conversores tiristorizados. Na prática, alguns semiciclos isolados da corrente mostram percentuais elevadíssimos de distorção, mas, a média, no caso dos fornos a arco, não passa de 5% para os principais harmônicos [9].

Laminadores nas siderúrgicas utilizam motores de corrente contínua alimentados com sistemas de retificação. Também nas ferrovias elétricas usam-se motores de corrente contínua com retificação. Logo, distorções harmônicas surgem no sistema. No caso das locomotivas, estas se apresentam como fontes de harmônicos variáveis, deslocando-se ao longo da ferrovia e injetando suas correntes no sistema sucessivamente por cada transformador [10].

Uma distorção de tensão é dada em função tanto da impedância do sistema quanto da qualidade da corrente que percorre o circuito. Sendo assim, o fato de haver cargas injetoras de correntes harmônicas no sistema não garante que haja distorção na onda de tensão expressiva. Se a impedância do sistema for pequena, e não houver problemas de ressonância, a distorção de tensão é normalmente desprezível. No entanto, caso haja ressonância no sistema, as

harmônicas podem causar diversos problemas como: interferência em controles computadorizados, aquecimento de máquinas rotativas, falha em banco de capacitores, dentre outros.

O grau com que os harmônicos podem ser tolerados por um sistema depende da susceptibilidade da carga. Geralmente os equipamentos menos sensíveis são os de aquecimento (cargas resistivas), pois a forma de onda não é importante. Os mais sensíveis são aqueles que assumem em seu projeto uma tensão senoidal pura, como por exemplo, os equipamentos de comunicação e processamento de dados. Ainda assim, mesmo os equipamentos mais robustos aos efeitos dos harmônicos podem ser prejudicados.

A análise dos efeitos causados pela geração de harmônicos é relevante na quantificação dos transtornos causados aos demais consumidores ligados ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC) da concessionária de energia ou até mesmo dentro do seu próprio sistema elétrico. A presença de harmônicos contribui para a redução da vida útil do sistema e dos equipamentos a ele ligados. Alguns dos efeitos harmônicos relacionados a esses equipamentos conforme [8][11] são:

Motores e geradores: o principal efeito nas máquinas rotativas é o sobreaquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e cobre. Logo se afeta o torque e a eficiência da máquina, reduzindo a sua vida útil. Há ainda um aumento das vibrações.

Transformadores: Também ocorre um aumento das perdas no ferro e cobre. Além disso, o aumento da frequência pode ampliar o efeito das reatâncias de dispersão. As correntes induzidas pelo fluxo disperso manifestam-se nos enrolamentos e núcleo. Têm-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas, que podem realizar acoplamentos indesejados e mesmo produzir ressonâncias no próprio dispositivo.

Cabos de alimentação: os aquecimentos devido ao aumento de perdas ocorrem por dois motivos: o efeito pelicular e o efeito de proximidade. O primeiro é responsável pela redução da área efetivamente condutora em função do aumento da frequência das correntes. O segundo relaciona um aumento da resistência do condutor em função dos efeitos dos campos magnéticos produzidos pelos condutores adjacentes.

Capacitores: pode haver ressonâncias no sistema, ampliando as ondas distorcidas. Além disso, as correntes de alta frequência, que encontrarão um caminho de menor impedância nos

capacitores, elevarão as perdas ôhmicas, gerando aquecimento e conseqüente diminuição da vida útil do capacitor.

Equipamentos eletrônicos: aparelhos que utilizam o ponto de cruzamento com o zero (ou outros aspectos da onda de tensão) para realizar alguma ação são afetados pela distorção harmônica. O efeito resultante no conversor é o deslocamento do ponto natural de comutação, com conseqüente alteração de seu desempenho, que no caso de retificadores controlados, pode resultar em tensão de saída mais baixa e pior fator de potência. Já nos inversores, pode resultar em falhas de operação por curto-circuito interno decorrente de erros de comutação.

Aparelhos de medição: medidores de energia ativa tipo indução podem apresentar erros positivos ou negativos, dependendo do medidor e do tipo de harmônico. Em geral, a distorção deve ser elevada (>20%) para produzir erro significativo.

Relés de proteção e fusíveis: um aumento da corrente eficaz devida a harmônicas sempre provocará um maior aquecimento dos dispositivos pelos quais circula a corrente, podendo ocasionar uma redução em sua vida útil e, eventualmente, sua operação inadequada.

Sistemas de iluminação: As lâmpadas incandescentes são sensíveis aos níveis de tensão. A presença de harmônicos pode resultar em um valor eficaz de tensão acima do nominal, o que aumenta a temperatura do filamento da lâmpada, reduzindo sua vida útil média.

Computadores e Periféricos: para um funcionamento adequado os fabricantes de computadores e periféricos impõem limites de distorção harmônica para os seus produtos, variando de fabricante para fabricante, geralmente com valores de distorção total de tensão máxima de 3% ou 5%.

Sistemas de Comunicação: a presença de correntes e tensões harmônicas no sistema de potência, devido ao acoplamento existente entre este e os sistemas de comunicação através dos campos magnético e elétrico existentes, resultam em ruídos, o qual é o tipo de interferência mais comum nas comunicações telefônicas.

1.2.3 Afundamentos de Tensão (SAGs)

Podem ser definidos como um decréscimo entre 0,1 e 0,9 pu do valor eficaz da tensão nominal, com duração entre 0,5 ciclo e minuto. Segundo a norma IEEE Std. 1159-1995 [4], um afundamento de tensão com intensidade menor do que 0,1 pu é considerado interrupção.

Os afundamentos de tensão são usualmente associados com faltas no sistema, mas também podem ser causadas pelo chaveamento de cargas pesadas ou partidas de grandes motores. Uma falta em um circuito alimentador paralelo também poderá resultar em uma queda no barramento da subestação que afetará todos os outros alimentadores até que esta falta seja corrigida. Normalmente uma falta será corrigida em um período de 3 a 30 ciclos, dependendo da magnitude da corrente de falta, do tipo de detecção de sobrecorrente e interrupção.

Um motor de indução pode solicitar de 6 a 10 vezes sua corrente máxima de operação durante a partida, provocando uma queda de tensão no sistema. Se a magnitude da corrente for grande em relação à corrente máxima de falta do sistema, o afundamento de tensão resultante pode ser significativo.

O termo “sag” foi utilizado na comunidade de qualidade de energia por muitos anos para descrever um tipo específico de distúrbio – a redução de tensão em curta duração. Este termo tem relação direta com o sentido literal da palavra, que é “queda”. Já o termo utilizado pela IEC para este fenômeno é conhecido como “dip”. Os dois termos são considerados equivalentes, sendo “sag” preferido pela comunidade norte-americana de qualidade de energia.

Inicialmente, a duração dos eventos de afundamentos não era bem definida, devido a uma ausência de padronização. Em algumas publicações a duração de um afundamento típico ficava na faixa entre 2ms e 2 minutos. Subtensões com tempos abaixo de meio ciclo de rede não eram consideradas como sendo uma mudança no valor eficaz da tensão na frequência fundamental, logo estes eventos não eram considerados transitórios. Subtensões que duram mais do que um minuto normalmente são controladas por reguladores de tensão e poder estar associadas a uma variedade de causas além de faltas no sistema.

A duração dos afundamentos é dividida em três categorias: instantânea, momentânea e temporária, as quais coincidem com as três categorias de interrupções e sobretensões. Essas

divisões foram definidas para relacionar o tempo dos dispositivos típicos de proteção com as respectivas categorias de afundamento.

O afundamento de tensão é um dos distúrbios mais importantes que afeta a qualidade da energia elétrica, pois é responsável por grandes perdas na produção, representando 68% dos eventos de qualidade de energia na indústria e os maiores prejuízos financeiros [3].

Este distúrbio atinge de forma danosa e prejudicial principalmente as indústrias, uma vez que elas trabalham intensamente com processos de produção dependentes entre si. Os processos utilizam-se de máquinas que cada vez mais se modernizam através da utilização de microprocessadores, ou eletrônica de potência. Um afundamento pode levar um equipamento ao funcionamento inadequado, de forma que a produção perca a validade por supostos defeitos surgidos nos produtos, ou em algumas partes do processo [3].

Os prejuízos na indústria podem ocorrer de duas formas. Uma delas acontece quando o equipamento submetido ao afundamento não chega a interromper o funcionamento, mas apenas modifica-o, seja pela perda de sincronismo, perda de torque, entupimento. A outra ocorre quando o equipamento atingido para de funcionar, interrompendo o processo de produção [3].

Para determinar os reais impactos dos afundamentos em uma carga sensível é essencial estimar o número de ocorrências e suas características (duração, amplitude) em um determinado período de tempo. O interesse no estudo deste fenômeno reside principalmente nos problemas que podem causar nos equipamentos instalados no parque industrial, tais como: sobreaquecimento das máquinas rotativas, funcionamento inadequado no sistema de proteção e controle, falhas em retificadores controlados, perda de informações de microprocessadores em controlador lógico programável, travamento de computadores, distorção em tela de monitores, desligamentos de lâmpadas de descarga e problemas nos contadores [12][13].

Tais distúrbios geralmente são causados por curtos circuitos, manobras na rede, atuação inadequada de proteção, acionamentos de grandes cargas que requerem altas correntes de partidas, energização de transformadores e falhas nas conexões dos cabos do sistema.

O curto-circuito provoca uma grande elevação da corrente, e esta, por sua vez, ocasiona grandes quedas de tensão nas impedâncias do sistema. Curtos-circuitos são

ocorrências inevitáveis nos sistemas elétricos e possuem causas diversas, mas basicamente envolvem um rompimento do dielétrico entre dois pontos que deveriam ser isolados entre si e que, em condições normais, estão em potenciais diferentes [3].

Muitos curtos-circuitos são causados por sobretensões que solicitam a isolação além de sua capacidade. Uma das causas dessas sobretensões são as descargas atmosféricas, mas a isolação pode também ser danificada ou simplesmente anulada por outros agentes climáticos, como o vento, produtos químicos, névoa salina. Também pelo impacto ou contato de animais, de veículos, de equipamentos de escavação, dentre outros, ou mesmo como resultado do envelhecimento do material [12].

Os equipamentos com dispositivos de proteção desconectam o ponto de curto-circuito da fonte de energia no sistema elétrico. A tensão é imediatamente recuperada, para aproximadamente seu valor anterior, em todos os pontos exceto nos desconectados pela proteção. A redução repentina da tensão de fornecimento, seguida por sua recuperação, representa o fenômeno de afundamento de tensão. Também a atuação indevida dos dispositivos de proteção causam os afundamentos, interrupções e em alguns casos elevação de tensão [3][13].

As manobras de rede, sejam elas automáticas ou manuais, também são responsáveis por afundamentos de tensão. Ainda que a manobra seja realizada de forma programada e correta, podem ocorrer distúrbios momentâneos. Já uma manobra mal executada pode causar interrupção e curto circuito. Os distúrbios relativos às variações de pequena duração são inerentes ao sistema, no entanto deve-se procurar minimizá-los a fim de melhorar a qualidade de energia e desempenho da rede elétrica. Alguns exemplos de manobra são: comutação para transferência de linha, manobras para manutenção de manobras de carga [13].

O chaveamento de grandes cargas, tais como grandes motores, ou as fortes flutuações características de algumas cargas podem causar grandes variações de corrente. O efeito disso nas correntes é semelhante a um curto-circuito. Embora geralmente os chaveamentos de cargas tenham consequências menos severas nos pontos em que ocorrem, as alterações de tensão que provocam em locais distantes podem ser indistinguíveis daquelas causadas por curtos-circuitos e são avaliadas como afundamentos de tensão [3].

1.3 Métodos de Partida

1.3.1 Introdução

A corrente absorvida da rede por um motor de indução trifásico durante a partida é bastante elevada, podendo atingir valores da ordem de 8 vezes a corrente de funcionamento em regime permanente de operação. Métodos de partida são aplicados em razão de atenuar a intensidade da corrente de partida, e permitir adequado acionamento da máquina.

São basicamente quatro métodos de partida: direta, estrela-triângulo, compensadora com autotransformador e com chave estática (eletrônica de potência). Serão abordadas neste capítulo a partida compensadora com autotransformador e a com chave estática *soft-starter*, uma vez que são os acionamentos utilizados no ambiente de análise.

1.3.2 Partida Compensadora com Autotransformador

Segundo [14], quando na utilização de autotransformador para partida de motores elétricos, sucede que a corrente absorvida da linha é reduzida de acordo com o quadrado da relação de espiras do autotransformador, e a corrente no motor é reduzida segundo a relação de espiras.

Embora este método tenha custo inicial maior que a partida estrela-triângulo, apresenta a vantagem de permitir ajuste de tensão e de corrente absorvida pela simples mudança de tapes. Normalmente os autotransformadores de partida têm tapes para 80%, 65% e 50%. A Figura 1 mostra o diagrama esquemático do autotransformador. Fecham-se os contadores k2 e k3 até que a partida em tensão reduzida esteja concluída. Em seguida fecha-se o contator k1 e abrem os contadores k2 e k3, retirando o autotransformador do circuito, enquanto o motor passa a ser alimentado em plena tensão. Durante a comutação dos contadores pode haver surtos transitórios de corrente muito intensos, o que pode levar, em alguns casos, a danos nos equipamentos. A comutação de contadores deve ocorrer quando o motor apresentar cerca de 90% de sua velocidade nominal.

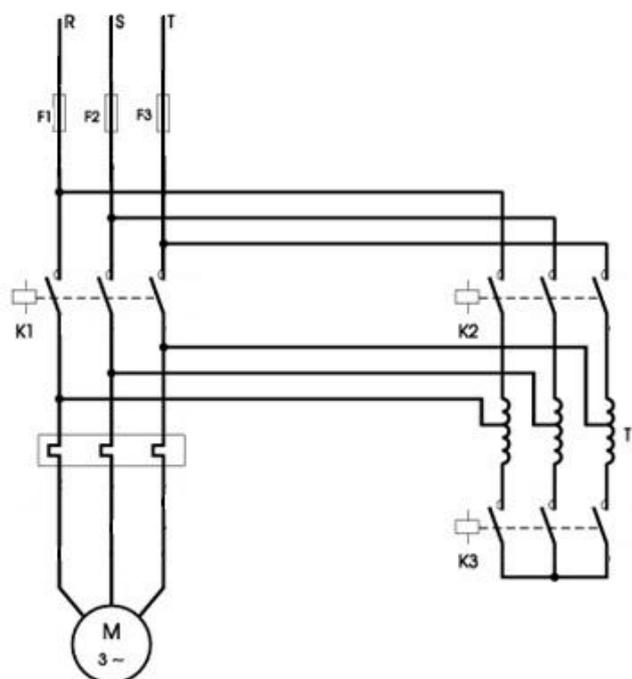


Figura 1– Ligação de partida de um motor de indução trifásico com autotransformador.

1.3.3 Partida com *Soft- Starter*

A chave de partida estática *soft-starter* é um equipamento eletrônico que, através de comando microprocessado, controla tiristores que ajustam a tensão enviada ao estator do motor, conforme figuras abaixo. Desta forma, consegue-se, de um lado, aliviar o acionamento dos altos conjugados de aceleração do motor de indução e, de outro, proteger a rede elétrica das correntes de partida elevadas [14].

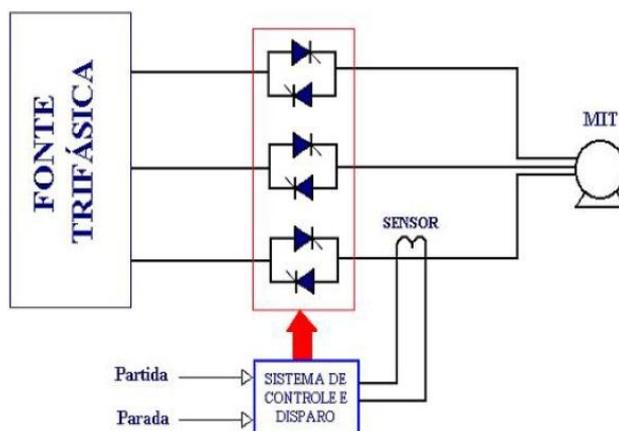


Figura 2 – Esquema genérico de um *soft-starter* com 6 tiristores.

Apresentam funções de operação que as caracterizam por promoverem partidas e paradas suaves. A mais usual é a rampa de aceleração, conforme Figura 3, no qual um valor inicial de tensão e um tempo de duração para a rampa é programado. Estes valores dependem das características dinâmicas do sistema motor-carga e devem ser escolhidos de modo que aperfeiçoem a partida.

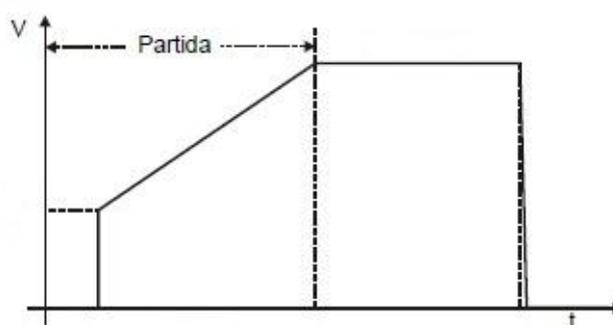


Figura 3 – Tensão em rampa ajustada pela soft-starter aplicada ao motor.

Possuem a vantagem de não provocar surtos transitórios no sistema, limitar a corrente de partida, evitar picos de corrente e ainda incorporar paradas suaves e proteções. Estas chaves contribuem para a redução dos esforços sobre acoplamentos e dispositivos de transmissão durante a partida e para o aumento da vida útil do motor e equipamentos mecânicos da máquina acionada, devido a eliminação de choques mecânicos. Também contribui para a economia de energia, sendo muito utilizada em sistemas de refrigeração e bombeamento. Apesar disso, possui uma desvantagem de ser fonte de harmônicos no sistema, injetando correntes de ordem $kq \pm 1$, no qual q é o número de pulsos da ponte retificadora, e k é qualquer inteiro positivo. Uma retificação de 6 pulsos produziria harmônicos de ordem 5°, 7°, 11°, 13°, para $k = 1$ e 2.

A Figura 4 a seguir mostra o comparativo de corrente entre os métodos de partidas com chave *soft-starter* e chave compensadora. Nota-se um comportamento de corrente com aumento gradual e suave para o acionamento com *soft-starter*. Já na partida compensadora, percebe-se o surto transitório de corrente causado pela comutação dos contatores.

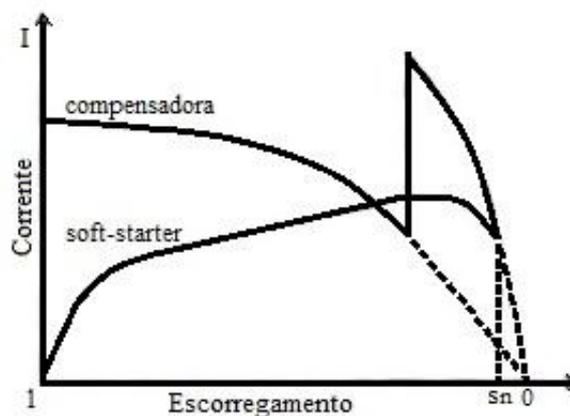


Figura 4– Comparativo do comportamento das partidas *soft-starter* e compensadora.

1.4 Objetivo Geral

Realizar um estudo dos problemas relacionados à qualidade de energia, em específico os harmônicos, as variações de tensão de curta duração e frequência, para os métodos de partida compensadora com autotransformador e partida por *soft-starter*, além de discutir o impacto relacionado à qualidade de energia que os mesmos provocam.

2 Materiais e Métodos

2.1 Introdução

O Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Viçosa é uma Autarquia fundada em 1970. Cumpre com sua missão de prestar serviços de saneamento básico que contribuam para a melhoria da qualidade de vida da população viçosense e para o desenvolvimento sócioeconômico, visando à satisfação da sociedade, dos clientes e dos colaboradores. Atualmente, o SAAE atende a 98% da população com água tratada e a 88% com rede de esgoto e, desde janeiro de 2010, é responsável pela limpeza urbana de Viçosa [15].

A análise da qualidade de energia foi realizada em uma das estruturas do SAAE, a Captação da ETA1 (Estação de Tratamento de Água), localizada no campus da UFV (Universidade Federal de Viçosa). A captação é responsável pela drenagem da água do manancial Ribeirão São Bartolomeu, e o bombeamento para a ETA1, que fica localizada na Rua do Pintinho, bairro Bela Vista.



Figura 5 – Detalhe da captação do São Bartolomeu.



Figura 6 – Bombeamento para ETA1.

O diagrama da Figura 7 mostra a distribuição de cargas da instalação. Devido à simplicidade do local, o circuito de iluminação foi desconsiderado.

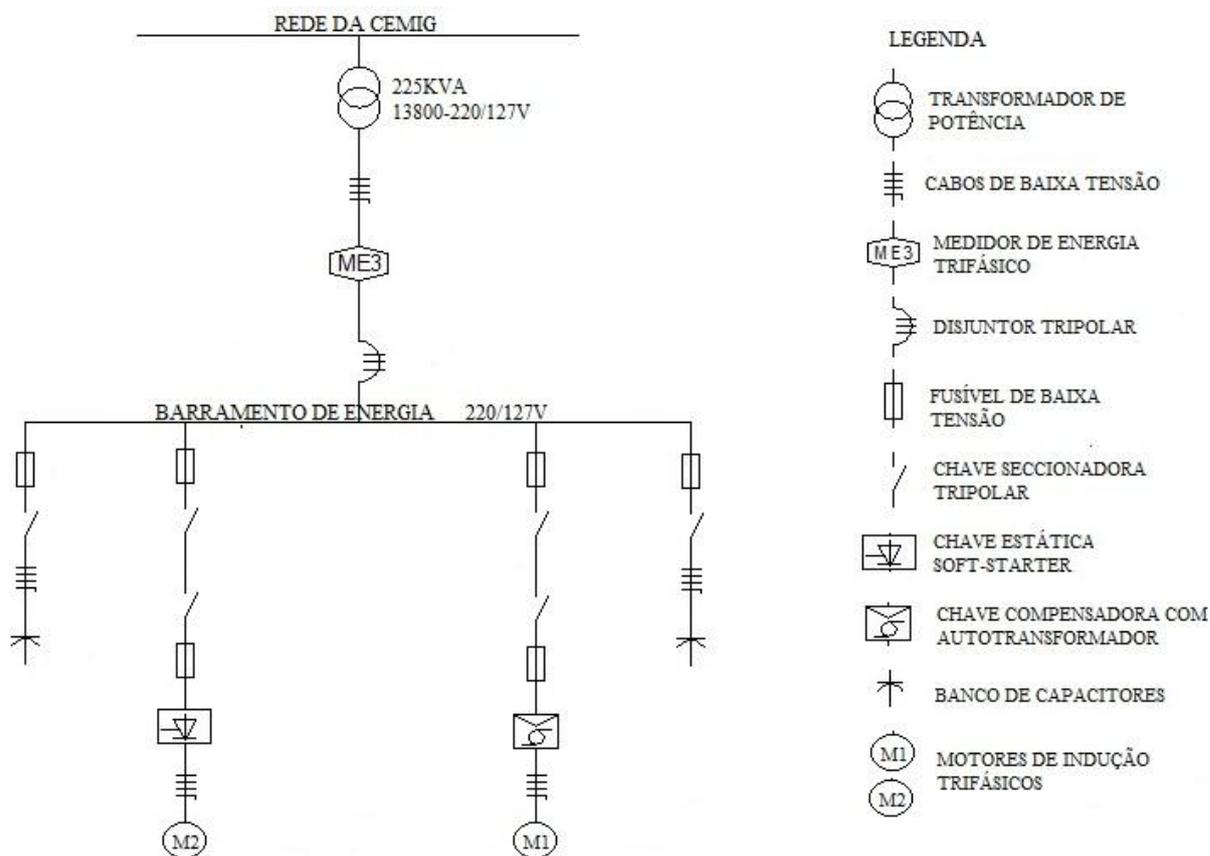


Figura 7 – Diagrama unifilar das cargas da Captação ETA1.

2.2 Descrição dos Materiais

2.2.1 Na partida compensadora

O motor de indução trifásico com acionamento compensador é uma máquina usada há anos na instalação do SAAE. Não há registro sobre seus dados de placa e nem é possível a leitura desses na carcaça do motor. Além disso, foi reformado algumas vezes, fato que modifica seus dados originais. Apesar disso, podem-se destacar alguns de seus parâmetros a partir de dados operacionais do motor.

- Rotor gaiola de esquilo
- Potência ativa medida: aproximadamente 65kW
- Velocidade de operação medida: 1780 rpm
- Frequência: 60Hz
- Tensão nominal Y/ Δ : 220/380V
- Corrente medida: 195A

Para a chave compensadora também não há registro ou dados de fabricante ou outra informação a respeito dos tapes do autotransformador.

O banco de capacitores conectado a esse motor possui potência nominal de 15KVAr.

2.2.2 Na partida por *soft-starter*

A seguir, a descrição com os dados de placa do Motor de Indução Trifásico Alto Rendimento Plus:

- Rotor gaiola de esquilo
- Fabricante: WEG
- Potência ativa: 132kW
- Velocidade: 1780 rpm
- Frequência: 60Hz
- Tensão nominal Y/ Δ : 220/380/440V
- Corrente nominal: 419A

- Fator de potência: 0,87

A chave Estática *Soft-Starter* utilizada no acionamento é fabricada pela WEG, modelo SSW-06. Opera na função rampa de aceleração, programada pra aplicar uma tensão no motor com tempo de rampa de 18s e valor inicial de 30% da tensão nominal.

O banco de capacitores em questão também é fabricado pela WEG, com potência nominal de 40kVAr.

2.2.3 Analisador de Qualidade de Energia

Utilizou-se o analisador de qualidade de energia trifásica série Fluke 430, ferramenta essa que permite analisar vários parâmetros, eventos e anomalias relacionados à energia.

2.3 Considerações de Caso

A situação atual de funcionamento da captação é de revezamento entre dois conjuntos motobomba, de acordo com horário de ponta. Sendo assim, os motores foram analisados individualmente, ou seja, quando um motor era acionado o outro se encontrava desligado.

As medições foram realizadas com o analisador de energia instalado no barramento da rede. Foram coletados dados com uma amostragem de 0,5s por um tempo de 20 minutos, durante a partida dos motores e na operação em regime permanente. Para melhor visualização dos gráficos os dados foram selecionados conforme o objetivo da análise. Os motores foram acionados na situação a vazio, com a entrada de carga momentos depois. Os parâmetros de corrente, tensão, THD, os harmônicos individualmente e frequência foram medidos para estudo dos fenômenos de qualidade de energia.

O acionamento do motor de partida compensadora com autotransformador é feito manualmente. Durante as medições, o operador acionou o motor em tensão reduzida (chave manual na posição de partida) e após aproximadamente 3s aplicou a tensão nominal (chave manual na posição de operação em regime). Também foram analisados o comportamento do sistema no que se refere à qualidade de energia com a retirada do banco de capacitores.

Para as medições no motor com partida *soft-starter*, o analisador, além do barramento da rede, foi também instalado entre a saída da *soft-starter* e entrada do motor, a fim de obter-se o comportamento da tensão controlada. A análise do sistema com a retirada do banco de capacitores não foi possível nesse caso, devido à dificuldade para desconexão do mesmo.

3 Resultados e Discussões

3.1 Motor com Acionamento Compensador

Nas Figuras 8 e 9 tem-se o comportamento da tensão de fase e corrente nas três fases durante a partida do motor de indução trifásico.

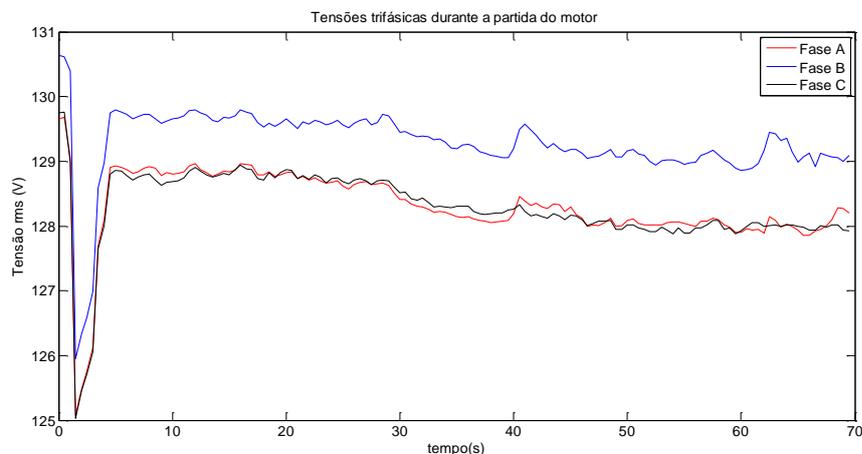


Figura 8 – Tensões trifásicas na partida do motor com chave compensadora

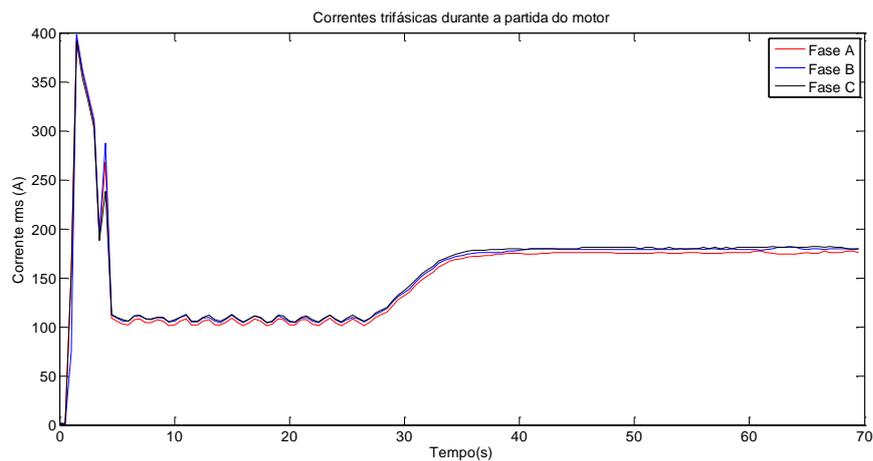


Figura 9 – Correntes trifásicas na partida do motor com chave compensadora

Percebe-se uma elevação da corrente acompanhada de uma queda de tensão. No entanto, uma análise quantitativa demonstra uma queda de tensão pequena, de aproximadamente 3V eficaz da tensão nominal num intervalo de 4s. Conforme Tabela 1, um

afundamento de tensão é definido como um decréscimo entre 0,1 e 0,9 pu do valor eficaz da tensão nominal, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Logo a queda de tensão verificada não pode ser considerada um afundamento, tendo em vista que apresentou um decréscimo de menos de 3% (ou 0,03 pu).

Vale ainda comentar o desbalanceamento na tensão na fase B, em relação às outras duas fases. Um desequilíbrio de tensão pode ser determinado pela razão entre o desvio máximo e a média dos valores de tensão, o qual é expresso percentualmente, apesar da melhor análise ser através de componentes simétricas, pois a taxa de componentes de sequência negativa e positiva em relação à sequência positiva daria o desbalanceamento para um dado sistema.

Segundo a Tabela 1, um desequilíbrio de tensão ocorre quando há uma variação de 0,5 a 2% em regime permanente. Nesse estado, a tensão na fase B apresentou um desvio de 0,7 em relação à média de tensão (128,4V), o que resulta em um desequilíbrio de tensão de 0,55%. Desequilíbrios de tensão têm origens nos sistemas de distribuição e nas instalações dos consumidores trifásicos, sendo atribuídos a cargas monofásicas mal distribuídas.

Analisando o gráfico das correntes nota-se que no momento da partida estas atingiram um transitório de 400A. Após 3s, a comutação da chave compensadora fez surgir outro transitório, atingindo o valor de 287A. Outra observação é o aumento da corrente com a adição da carga, que passou de aproximadamente 107A na situação a vazio para 179A a plena carga.

A seguir as Figuras 10 e 11, com os índices de distorção harmônica de tensão e corrente nas três fases medidos no barramento do sistema.

Observam-se valores baixos para os mesmos. O THD de tensão médio para as três fases foi de 2,4% em regime permanente, chegando a um valor máximo durante o transitório de partida de 2,6%. Já o THD de corrente com o motor operando em regime foi de apenas 2,0%, e na partida atingiu um pico, em uma de suas fases, com THD de 45%, que instantaneamente é restabelecido. Também durante a comutação da chave houve uma pequena elevação, alcançando 4,2%. Outra verificação que pode ser feita é sobre o THD do motor operando em vazio, que foi de 3,3%, mostrando que a operação a vazio aumenta a distorção harmônica. Isto em razão de o sistema operar com maior eficiência na situação com carga, visto que o fator de potência se eleva.

Com base nas Tabelas 2 e 3, vê-se que os níveis de distorção harmônica medidos para a operação em regime permanente encontram-se abaixo dos limites recomendados (até 5%), ultrapassando este valor somente durante um surto transitório na energização do motor, o que não acarreta maiores problemas para a operação do sistema.

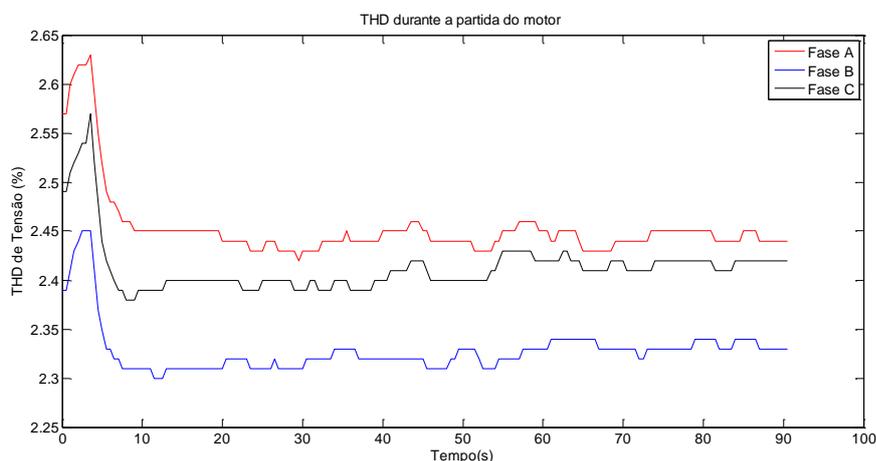


Figura 10 – THD de tensão para o motor com partida compensadora

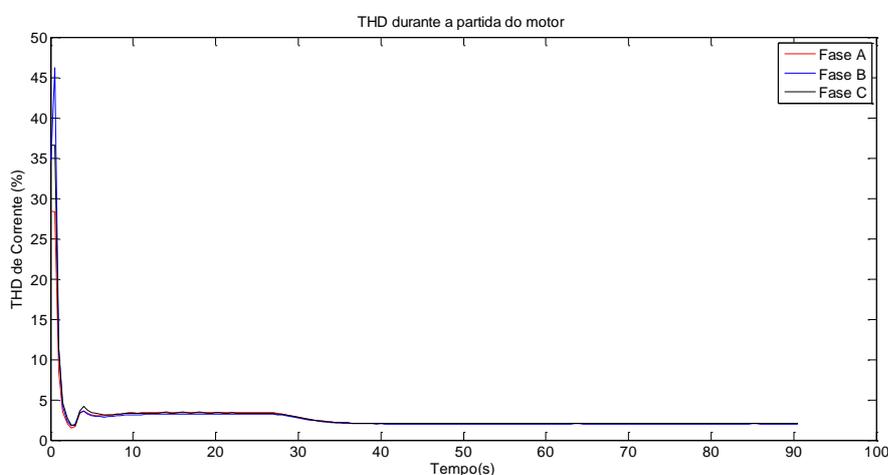


Figura 11 – THD de corrente para o motor com partida compensadora

A Figura 12 mostra o efeito da distorção harmônica de corrente do sistema com a retirada do banco de capacitores. O THD de corrente aumenta de 2,0% para 3,6%. Isso ocorre porque as correntes de alta frequência encontram um caminho de menor impedância pelos capacitores, conduzindo desta maneira as harmônicas para o terra. Deste modo os capacitores

instalados próximos à máquina reduzem a quantidade de harmônicos, funcionando como filtros.

Todavia, essa sobrecorrente nos capacitores eleva as suas perdas ôhmicas. O decorrente aumento no aquecimento pode danificar o dispositivo, encurtando sua vida útil. Vale lembrar os riscos de uma instalação mal executada, sem uma análise crítica acerca dos harmônicos circulantes no sistema, que podem levar a uma amplificação do conteúdo harmônico presente no sistema pelo estabelecimento de condições de ressonância.

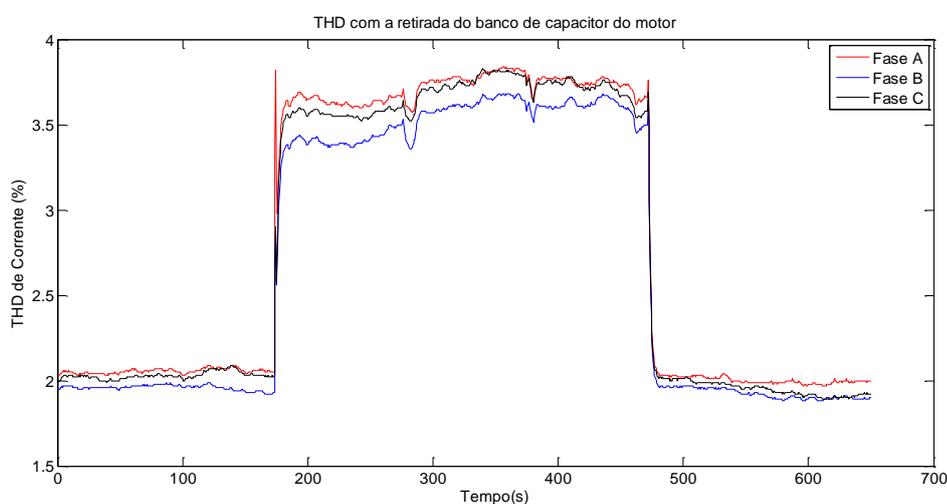


Figura 12 – THD de corrente com a retirada do banco de capacitores

Na Figura 13 tem-se os harmônicos de corrente de ordem 3, 5 e 7, a fim de mostrar quais os harmônicos mais influentes no sistema. As amplitudes apresentadas são muito pequenas, com uma média em estado permanente de 0,4%, 1,9% e 0,1%, para o 3º, 5º e 7º harmônicos, respectivamente. Os harmônicos de corrente das demais ordens foram desconsiderados aqui por serem ainda menos significativos, com valores próximos de zero ou nulos.

Os valores obtidos demonstram que o harmônico de ordem 5 é o mais influente na distorção harmônica total do sistema. Ainda assim, de acordo com a Tabela 3, apresenta um valor de operação em regime permanente que se encontra abaixo do limite recomendado, que é de até 4% para harmônicas de ordem menores que 11.

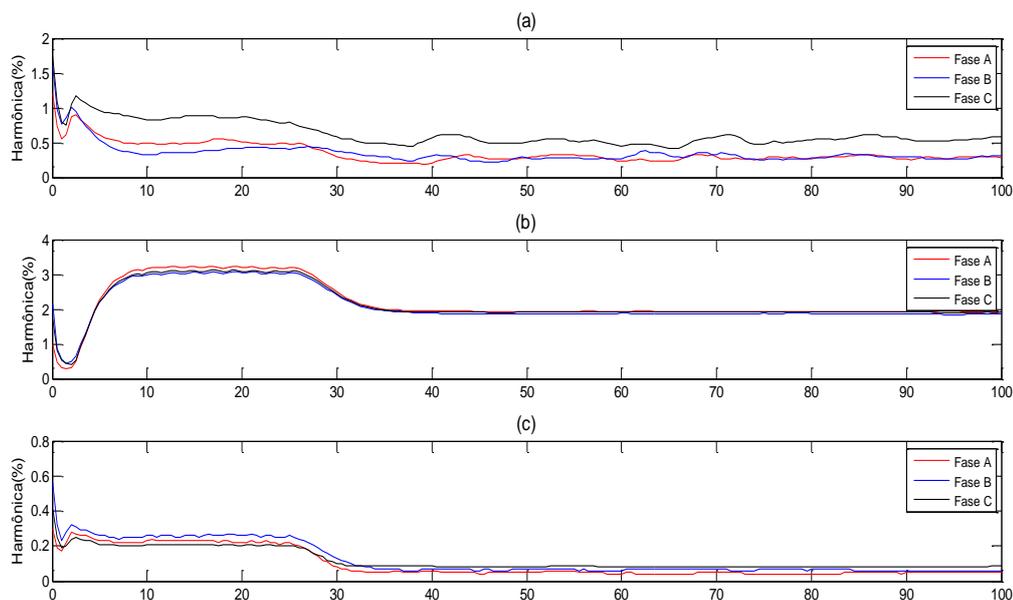


Figura 13 – Harmônicos de corrente no motor com chave compensadora (a) 3ª ordem, (b) 5ª ordem e (c) 7ª ordem

A Figura 14 mostra a corrente no neutro no barramento de energia. A presença de harmônicas triplas (ordem 3 e seus múltiplos) pode gerar sobrecorrente no neutro, logo é importante o monitoramento desse condutor.

Percebe-se uma baixa corrente no neutro do sistema, um valor médio de 1,5A, com valores oscilando de 1A a 2A, e um momentâneo surto de corrente atingindo 9A. Esse resultado era previsível, uma vez que as correntes triplas do sistema possuem valores insignificantes.

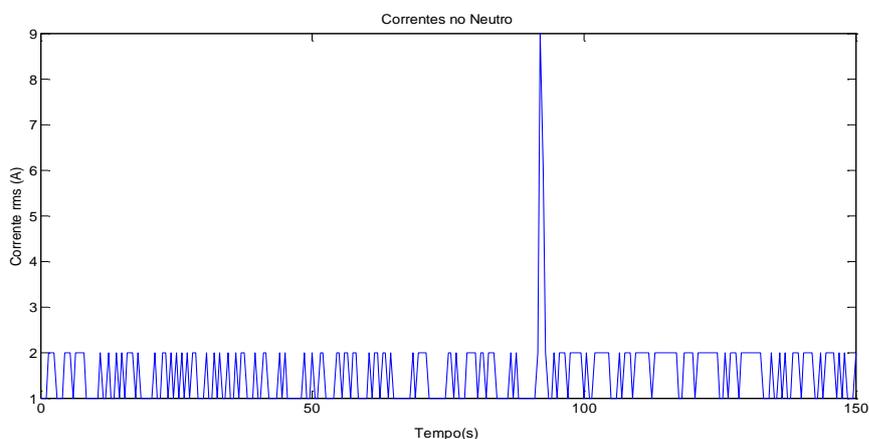


Figura 14 – Corrente no neutro medida com o motor de chave compensadora acionado

As variações de frequência da rede são vistas na Figura 15. O sistema apresentou uma frequência mínima de 59,97Hz e máxima de 60,07Hz. Portanto dentro dos limites estabelecidos pelo PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), no qual um sistema deve operar em condições normais e regime permanente dentro da faixa de 59,9Hz a 60,1Hz.

A frequência do sistema de potência está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem o sistema. Pequenas variações podem ser observadas como resultado do balanço dinâmico entre carga e geração. As variações de frequência que ultrapassam os limites para operação normal em regime permanente podem ser causadas por faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração.

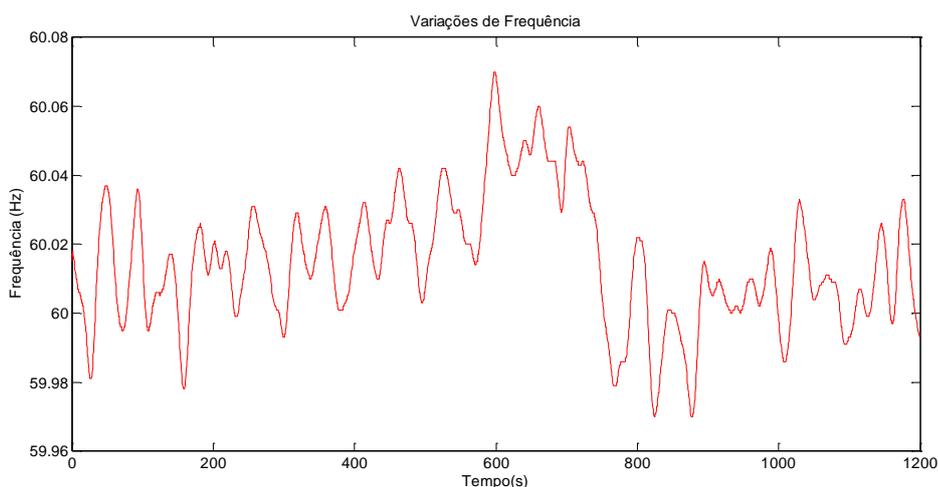
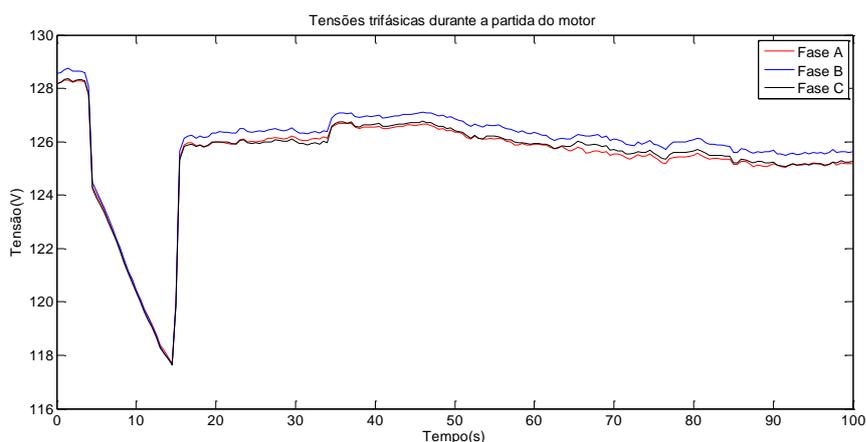
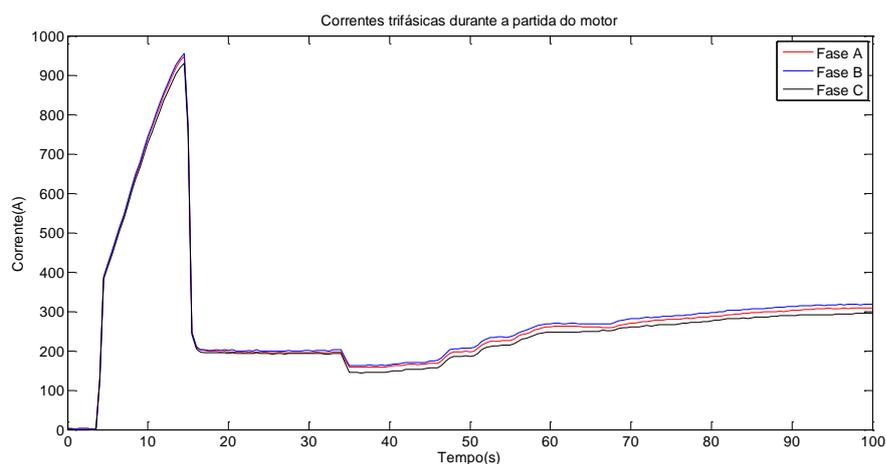


Figura 15– Variações de frequência da rede na partida do motor com chave compensadora

3.2 Motor com Acionamento por Soft-Starter

Nas Figuras 16 e 17 tem-se o comportamento da tensão de fase e corrente nas três fases durante a partida do motor trifásico.

Figura 16 – Tensões trifásicas na partida do motor com chave *soft-starter*Figura 17 – Correntes trifásicas na partida do motor com chave *soft-starter*

Observa-se o surto de corrente simultaneamente à queda de tensão. A análise quantitativa mostra uma queda de 8V em relação à tensão nominal, por cerca de 12s. Isso representa um decréscimo de 6,5%, portanto, não pode ser caracterizado como um afundamento de tensão.

Assim como no acionamento anterior, nota-se um pequeno desvio da fase B em relação às demais. Nesse caso foi de apenas 0,3V, para uma média de tensão de 125,6V, o que resulta em um desbalanceamento de aproximadamente 0,25%. Logo o desvio apresentado não se classifica como um desequilíbrio de tensão, conforme caracterizado na Tabela 1. Cabe

lembrar que o método utilizado não é o mais indicado para o cálculo de desequilíbrio, pois o mesmo deveria ser feito através de componentes simétricas.

Quanto ao gráfico das correntes trifásicas, tem-se que no momento da partida um pico transitório atingiu um máximo de 954A. Este valor de corrente está acima do esperado, uma vez que a função da *soft-starter* é proporcionar uma partida suave. Já na situação a vazio a corrente é de 156A, passando para 307A com a entrada da carga. Esse valor está abaixo da corrente nominal de fábrica para esse motor, que é de 419A. Sugere-se um estudo posterior a respeito desse fato, pois um sistema operando com eficiência baixa diminui o fator de potência e eleva o conteúdo harmônico.

A Figura 17 mostra o comportamento da tensão de entrada no motor controlada pela *soft-starter*.

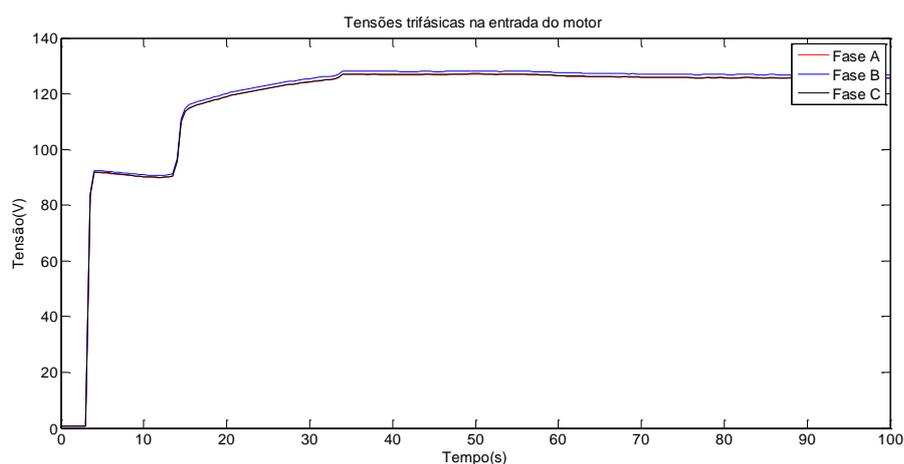


Figura 18 – Tensões trifásicas controladas na entrada do motor

O resultado neste não foi como esperado, haja vista que a chave estática está programada para operar na função rampa de aceleração, com um valor inicial de 30% da tensão nominal, ou seja, 38V, e tempo de rampa de 18s.

No entanto, algumas observações podem ser feitas:

- A tensão salta em degrau para um valor de 91V, correspondendo a 70% da tensão nominal, e permanece nesse estado pelo mesmo tempo em que se verifica a queda de tensão no barramento.

- Em seguida a tensão passa de 91V para 114V, num intervalo de 1,5s. E deste último valor ela salta para a tensão nominal de 127V, com duração de 18s, justamente o tempo de rampa ao qual a *soft-starter* está programada.

Novamente sugere-se um estudo posterior, para uma análise detalhada a respeito da parametrização da chave *soft-starter*.

A seguir as Figuras 19 e 20, com os índices de distorção harmônica de tensão e corrente nas três fases medidos no barramento do sistema.

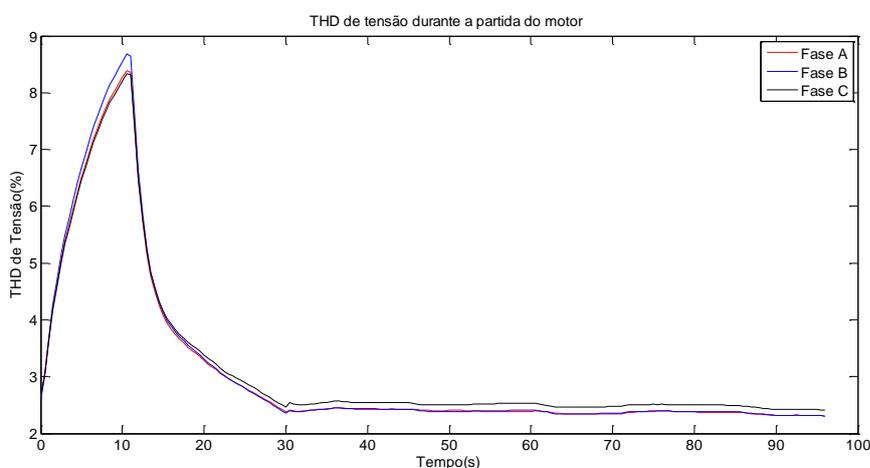


Figura 19 – THD de tensão para o motor com partida *soft-starter*

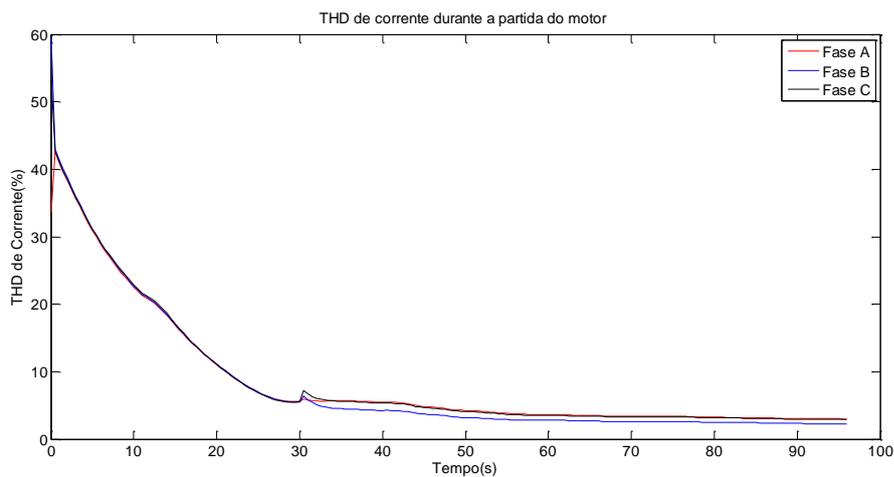


Figura 20 – THD de corrente para o motor com partida *soft-starter*

Verifica-se que em regime permanente os valores de distorção foram baixos. O THD de tensão médio para as três fases foi de 2,4%, chegando a um valor máximo durante o transitório de partida de 8,7%. Enquanto o THD de corrente com o motor operando em regime foi de 2,8%, atingindo durante a partida um THD de 42,7%. Assim como no acionamento do motor anterior, na situação a vazio o THD de corrente apresenta um valor mais elevado, nesse caso cerca de 5,2%.

Com base nas Tabelas 2 e 3, tem-se que os níveis de distorção harmônica medidos para a operação em regime permanente encontram-se abaixo dos limites recomendados (até 5%). No entanto, para a operação do motor a vazio, o limite recomendado para a distorção de corrente é ultrapassado em 0,2%. Também as distorções harmônicas apresentaram valores bem elevados durante a partida, principalmente o THD de corrente.

A Figura 21 mostra os harmônicos de corrente de ordem 3, 5 e 7, com as respectivas amplitudes de 1%, 2,3% e 1,3%, para a operação de regime permanente. Como anteriormente, os harmônicos de corrente das demais ordens foram desconsiderados aqui por não serem significativos, com valores próximos de zero ou nulos.

Os harmônicos de ordem 5 foram os mais influentes, seguidos pelos harmônicos de ordem 7. Esse resultado já era esperado da *soft-starter*, uma vez que a mesma apresenta internamente um circuito retificador de 6 pulsos, o qual tem a característica de injetar correntes dessas ordens.

De acordo com a Tabela 3, os valores apresentados de operação em regime permanente se encontram abaixo do limite recomendado (4% para harmônicas de ordens menores que 11). Já durante a partida, a 5ª harmônica atingiu amplitudes bem elevadas, chegando a 40%, enquanto a 7ª harmônica apresentou um valor de 10%. Quanto à 3ª harmônica, atingiu um valor médio de distorção nas três fases de 2,5%, respeitando os limites recomendados mesmo durante o transitório de partida.

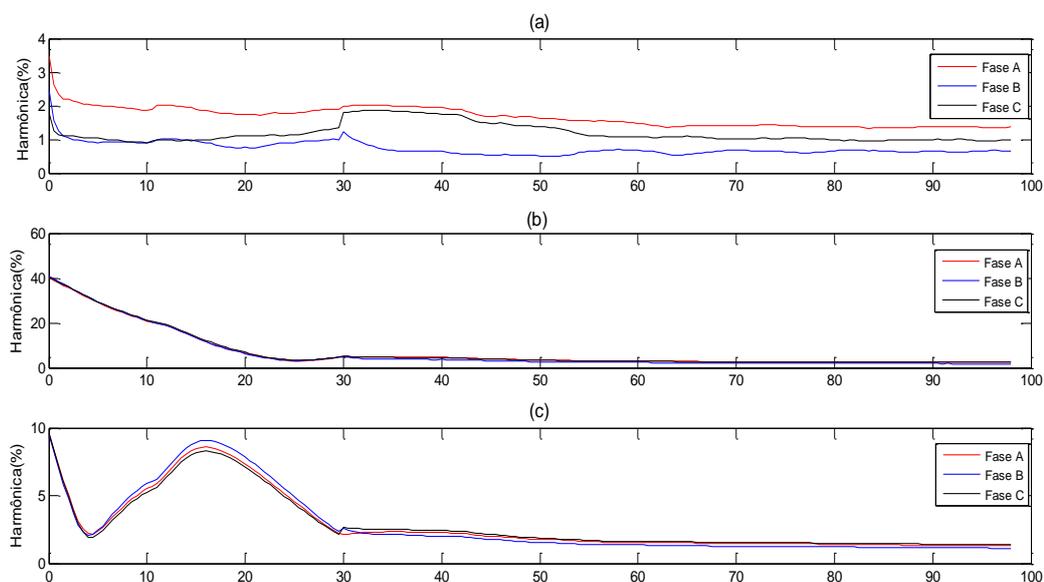


Figura 21 – Harmônicos de corrente no motor com chave *soft-starter* (a) 3ª ordem, (b) 5ª ordem e (c) 7ª ordem

Na Figura 22 tem-se a corrente no neutro do sistema, a qual exibe um valor médio de 1,7A, com valores oscilando de 1A a 2A, e alguns surtos de corrente de 3A. Novamente um valor de corrente pequeno e também previsível, tenda em vista o baixo valor da harmônica de ordem 3.

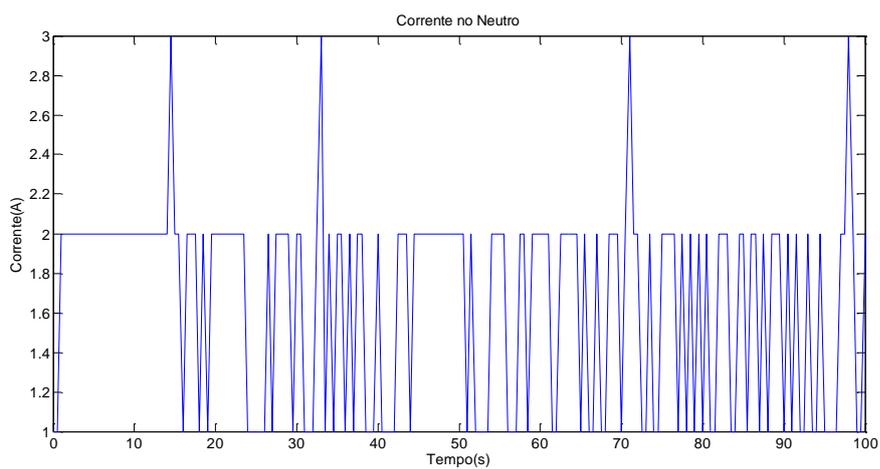


Figura 22 – Corrente no neutro medida com o motor de chave *soft-starter* acionado

As variações de frequência da rede são dadas na Figura 23. O sistema apresentou uma frequência mínima de 59.96Hz e máxima de 60.05Hz, logo dentro dos limites aceitáveis pelo PRODIST.

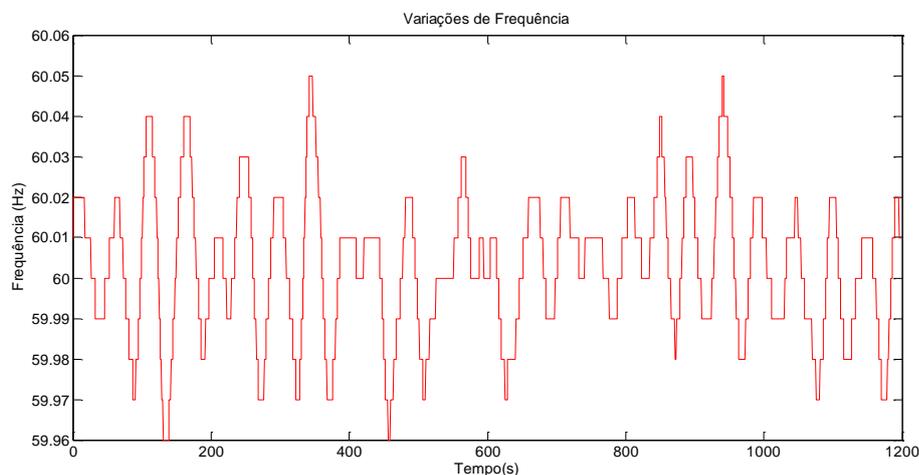


Figura 23– Variações de frequência da rede na partida do motor com chave *soft-starter*

3.3 Discussões Finais

Os parâmetros de qualidade de energia medidos nos dois métodos de acionamentos são mostrados na Tabela 5. Tendo em vista que os motores estudados nos dois métodos de partida são diferentes, a análise comparativa fica um pouco restrita, o que não implica, no entanto, que observações e conclusões possam ser feitas.

Tabela 5 – Tabela comparativa dos distúrbios medidos nos dois métodos de acionamentos

Distúrbios na Qualidade	Partida Compensadora	Partida <i>Soft- Starter</i>
3º harmônico de corrente	0,4%	1,0%
5º harmônico de corrente	1,9%	2,3%
7º harmônico de corrente	0,1%	1,3%
THD de corrente	2,0%	2,8%
THD de tensão	2,4%	2,4%
Queda de tensão	2,7%	6,5%
Desbalanceamento de tensão	0,55%	0,25%

Variações de Frequência	59,97 a 60,07 Hz	59.96 a 60.05 Hz
Corrente no neutro	1.5A	1.7A

Em ambos os casos os harmônicos mais influentes no sistema foram os de ordem 5. Quando em excesso esse harmônico prejudica o torque útil das máquinas, causando perdas, sobreaquecimentos e vibrações.

Na partida compensadora o 3º harmônico apresentou maior valor que o 7º harmônico, enquanto na partida por *soft-starter* sucedeu-se o oposto. Como comentado anteriormente, esse fato deve-se à característica do retificador de 6 pulsos de injetar correntes de ordem $kq \pm 1$, no qual q é o número de pulsos da ponte retificadora, e k é qualquer inteiro positivo.

O THD de tensão no barramento em regime permanente não sofreu influência com o método de partida utilizado, já o THD de corrente sim. Era previsível que no acionamento do motor com a *soft-starter* houvesse uma distorção harmônica de corrente mais elevada, pois essa chave de partida faz parte dos equipamentos eletrônicos com comando microprocessado, portanto cargas injetoras de correntes harmônicas. Apesar disso, a distorção de corrente em regime foi pequena, obedecendo aos limites impostos dados na Tabela 3.

Os métodos de partida utilizados também evitaram o afundamento de tensão. Nesse caso a comparação entre os valores das quedas torna-se inadequada, pelo fato dos motores partirem com cargas diferentes, pois cargas pesadas causam maiores quedas de tensões. No entanto, as quedas de tensão apresentadas podem ser ainda reduzidas. No caso da partida compensadora, pela automatização do processo da partida, diminuindo as chances de uma operação inadequada por parte do operador. No motor com chave *soft-starter*, uma análise detalhada a fim de otimizar as parâmetros desse dispositivo de partida.

Como mostrado na Tabela 1, um desequilíbrio de tensão é classificado na faixa de 0,5% a 2%. Tem-se um desequilíbrio de tensão na partida compensadora, o que não ocorre no outro método de acionamento. Como as duas cargas analisadas estão conectadas ao mesmo sistema de distribuição, sugere-se que o desequilíbrio seja causado pela distribuição das cargas da instalação relativas ao motor com partida compensadora.

4 Conclusões

O estudo revelou quais os harmônicos predominantes no sistema, além do comportamento dos mesmos diante dos métodos de partida compensador com autotransformador e por chave estática *soft-starter*. Viu-se que em operação de regime permanente os valores de distorção harmônica são muito pequenos, respeitando os limites recomendados.

Os métodos de partida dos motores estão sendo eficazes no que diz respeito aos afundamentos de tensão. Os decréscimos de tensão apresentados foram pequenos, portanto não podem ser classificados como afundamentos e não constituem um problema na qualidade de energia elétrica do sistema. Também as variações de frequência e o desequilíbrio de tensão mostraram resultados positivos no quesito qualidade, sem gerar problemas ao sistema de energia.

Foi observado que a instalação de banco de capacitores próximos à máquina pode reduzir a quantidade de harmônicos, em um funcionamento similar ao de um filtro. Todavia, deve-se verificar o conseqüente aquecimento nos capacitores e ainda atentar-se ao risco do estabelecimento de ressonância no sistema, o que amplifica o conteúdo harmônico presente.

Apesar de ter respeitado os limites recomendados na operação em regime permanente, verificou-se que durante o transitório de partida no motor com *soft-starter* o conteúdo harmônico atingiu valores elevados, por aproximadamente 40s. No entanto, nesse caso o uso de dispositivos e equipamentos de melhorias torna-se inviável, pelo fato da instalação do SAAE ser simples, com apenas um motor funcionamento por vez e um único acionamento diário de cada motor.

Com este trabalho foi possível distinguir a importância de cada dispositivo utilizado na indústria, além do impacto relacionado à qualidade de energia que os mesmos provocam e os efeitos dos distúrbios nos demais equipamentos e componentes.

Para trabalhos futuros, sugere-se um estudo detalhado do motor e da chave de partida *soft-starter*, a fim de verificar a parametrização da mesma relacionada à eficiência do motor, uma vez que cargas eficientes diminuem a distorção harmônica do sistema.

Referências Bibliográficas

- [01] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. *Electrical Power Systems Quality* - McGraw-Hill, Second Edition, New York, 2002, page 1.
- [02] FRANCO, E. *Qualidade de Energia - Causas, Efeitos e Soluções*. Disponível em: iecom.dee.ufcg.edu.br/~mylene/potencia/artigo2.doc.
- [03] MAIA, R. M. *Estudo de caso de afundamentos de tensão nos componentes do sistema elétrico industrial da moinhos vera cruz*. UFMG, 2008.
- [04] IEEE STD 1159-1995. *IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality*, page.
- [05] IEEE STD 519-1992. *IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems (ANSI) of IEEE Standards Board*. New York, USA, 1992.
- [06] CORREIA, P. F. *O impacto dos problemas de qualidade de energia nas instalações elétricas- O caso particular das perturbações harmônicas*. FCTUC, Coimbra, 2007.
- [07] DECKMANN, S. M.; POMILIO J. A. *Distorção harmônica: causas, efeitos e soluções*. Curso avaliação da qualidade da energia elétrica.
- [08] RIBEIRO, C. *Influência dos harmônicos na qualidade da energia elétrica*. UFOP, 2007
- [09] LEAO, R. P. S. *Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência*. Universidade Federal do Ceará, 2010.
- [10] DIAS, G. A. D. *Harmônicas em Sistemas Industriais*. 2ª edição, Porto Alegre, editora Edipucrs, 2002.
- [11] *Efeitos e causas de harmônicas nos sistemas de energia elétrica*. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap4/cap4.html>. Acesso: 20 de outubro de 2011
- [12] LOURENÇO, T. C.; PEREIRA, G. M. V.; SAMESINA, M. I. *Afundamentos de tensão (voltage sags) e seus efeitos nos componentes do sistema elétrico*. FEELT, UFU.
- [13] DARDENGO, V. P. *Análise de variações de tensão de curta duração em uma planta industrial*. UFV, 2011.
- [14] GOMES, H. P.; et al. *Sistema de Saneamento - Eficiência Energética*. 1ª edição, João Pessoa: editora Universitária:UFPB, 2010.
- [15] <http://www.saaevicosa.com.br>. Acesso em: 18 de novembro de 2011.

