

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

BRUNO FERREIRA REIS

**AVALIAÇÃO DE HARMÔNICOS E RESSONÂNCIA EM UM SISTEMA
DE BOMBEAMENTO INDUSTRIAL**

VIÇOSA
2015

BRUNO FERREIRA REIS

**AVALIAÇÃO DE HARMÔNICOS E RESSONÂNCIA EM UM SISTEMA
DE BOMBEAMENTO INDUSTRIAL**

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. Dr. Mauro de Oliveira Prates.

VIÇOSA
2015

BRUNO FERREIRA REIS

**AVALIAÇÃO DE HARMÔNICOS E RESSONÂNCIA EM UM SISTEMA
DE BOMBEAMENTO INDUSTRIAL**

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 03 de julho de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

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

Eng. João Henrique de Oliveira - Membro
Universidade Federal de Minas Gerais

*“Todos aqueles que estão
Atravancando o meu caminho,
Eles passarão.
Eu passarinho!”
(Mário Quintana)*

Dedico este trabalho aos meus pais, Geraldo e Graça, ao meu irmão, Leonardo e a turma da Engenharia Elétrica 2008.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, que me ensinaram a sempre buscar meus objetivos e que não mediram esforços para me apoiar e incentivar nessa caminhada. Ao meu irmão, que sempre foi fonte de inspiração. A todos amigos do curso de Engenharia Elétrica, principalmente do ano de 2008, porque sem eles seria muito mais difícil o caminho. Ao Departamento de Engenharia Elétrica por ceder os equipamentos necessária para realização do projeto. Ao professor e orientador Mauro Prates, ao Anacleto e ao Eduardo pela colaboração e disponibilidade prestadas. E Finalmente ao SAAE de Viçosa, Pela oportunidade de pesquisa

Resumo

Antigamente, o uso de cargas elétricas lineares e com valores de impedância fixos era predominante nas residências e indústrias. Com o avanço da tecnologia, houve necessidade do aumento da qualidade de energia fornecida ao consumidor. Porém, o uso de equipamentos como o soft-starter e inversores de frequência, por utilizar uma gama de componentes eletrônicos, geradores de cargas não lineares, acaba gerando harmônicos na rede o que afeta, principalmente, equipamentos de comunicação e processamento de dados e mesmo equipamentos robustos. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é realizar análise de parâmetros de qualidade de energia no sistema elétrico de duas unidades ETA (Estação de Tratamento de Água) II e Estação Elevatória de Ramos do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa (SAAE), verificando se este sistema está funcionando dentro dos limites definidos em normas. Para obtenção dos dados de tensão, corrente e conteúdo harmônico utilizou-se o analisador de energia FLUKE, série 435, ligado ao circuito antes do sistema de partida (soft-starter e inversor de frequência), com e sem a presença dos bancos de capacitores, quando existentes. As medições também foram realizadas com as cargas em regime permanente. O presente estudo permitiu identificar a predominância dos harmônicos de ordem 3, 5, 7 e 11 nos sistemas. No ETA II, verificou-se que o banco de capacitores está filtrando as harmônicas de alta frequência, porém, está causando um aumento nas harmônicas de ordem 5 e 7, provocado por uma ressonância. Mesmo tendo ocorrido esse aumento, os níveis máximos estipulados para as distorções harmônicas individuais de tensão e corrente e nos níveis de THD não foram ultrapassados. Na Estação Elevatória de Ramos, o nível máximo de THD de corrente e alguns harmônicos excederam o limite estabelecido. Dessa forma, vê-se a necessidade da instalação de um filtro de harmônicos para a melhoria da qualidade de energia deste sistema.

Sumário

1	Introdução.....	14
1.1	Problemas na Qualidade de Energia.....	15
1.1.1	Introdução.....	15
1.1.2	Distúrbios Existentes	16
1.1.2.1	Afundamento de Tensão.....	16
1.1.2.2	Subtensão.....	16
1.1.2.3	Elevação de Tensão	16
1.1.2.4	Sobre-tensão	16
1.1.2.5	Transitórios Impulsivos	16
1.1.2.6	Transitórios Oscilatórios	17
1.1.2.7	Interrupção.....	17
1.1.2.8	Ruídos.....	17
1.1.2.9	Harmônicos.....	17
1.2	Harmônicos.....	18
1.2.1	Introdução.....	18
1.2.2	Algumas Definições Presentes nas Normas Técnicas	19
1.2.3	Classificação dos Harmônicos.....	22
1.2.3	Efeitos dos Harmônicos.....	24
1.3	Banco de Capacitores	25
1.3.1	Introdução.....	25
1.3.2	Ressonância Paralela	26
1.3.3	Ressonância Série	28
1.4	Métodos de Partida	29
1.4.1	Partida com Soft-starter	29
1.4.2	Inversor de frequência	31
1.5	Objetivo Geral	32
2	Materiais e Métodos	33
2.1	Introdução.....	33
2.2	Descrição dos Materiais.....	37
2.2.1	No ETA II - Partida com Soft-starter	37
2.2.2	No Ramos - Partida com Inversor de Frequência.....	37
2.2.3	Analisador de Qualidade de Energia	38
2.3	Considerações de Caso	38

2.3.1	ETA II.....	38
2.3.2	Ramos.....	40
3	Resultados e Discussão	43
3.1	ETA II.....	43
3.1.1	Análise da tensão e corrente	43
3.1.2	Análise Harmônica	45
3.2	Ramos	47
3.2.1	Análise da tensão e corrente	47
3.2.2	Análise harmônica	48
4	Conclusões.....	51
	Referências	52

Lista de Figuras

Figura 1 - Distúrbios da qualidade de energia elétrica (Martins & Afonso, 2004).....	18
Figura 2 - Desenho indicativo do ponto de acoplamento comum (PAC ou PCC) (Olson, 2015)	22
Figura 3 - Sistema com potencial a problemas com ressonância paralela (a) circuito de distribuição simplificado (b) ressonância paralela vista da fonte de harmônico (c) (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2004)	27
Figura 4 - Resposta em frequência do sistema variando o tamanho do banco de capacitores em relação ao transformador (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2004)	27
Figura 5 - Circuito com potencial acontecimento de ressonância série (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2004)	28
Figura 6 - Circuito equivalente de sistema com potencial para problemas de ressonância série e paralela (Leão, Sampaio, & Antunes, 2014)	29
Figura 7 - Resposta em frequência de um sistema com ressonância série e paralela (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2004)	29
Figura 8 - Esquema de um soft-starter implementado com 6 tiristores para acionar um motor de indução trifásico (MIT)	30
Figura 9 - Curva de aceleração de um MIT usando soft-starter	30
Figura 10 - Curva de desaceleração de um MIT usando soft-starter.....	31
Figura 11 - Estação de tratamento de Água ETA II.	33
Figura 12 - Bombeamento ETA II para caixa d'água.	34
Figura 13 - Bombeamento bairro de Ramos.....	34
Figura 14 - Diagrama unifilar das cargas no bombeamento em ETA II.	35
Figura 15 - Diagrama multifilar das cargas no bombeamento da Estação Elevatória de Ramos.	36
Figura 16 - Medição no barramento da ETA II.....	39
Figura 17 - Valores da tensão (a) e corrente (b) de todo o processo monitorado na ETA II. ..	40
Figura 18 - Medição no barramento de Ramos	41
Figura 19 - Valores da tensão (a) e corrente (b) de todo o processo monitorado no Bairro de Ramos	42

Figura 20 - Correntes trifásicas na partida e em regime permanente para o sistema (a) com e (b) sem o banco de capacitores	44
Figura 21 - Tensões trifásicas na partida e em regime permanente para o sistema com (a) e sem (b) o banco de capacitores	44
Figura 22 - Valor máximo, em percentagem, dos harmônicos de tensão 2 a 25, em sistema com e sem banco de capacitores - ETA II	45
Figura 23 - Valor máximo, em percentagem, dos harmônicos de corrente 2 a 25, em sistema com e sem banco de capacitores - ETA II	46
Figura 24 - Tensões trifásicas na partida e em regime permanente – Ramos	48
Figura 25 - Correntes trifásicas na partida e em regime permanente – Ramos	48
Figura 26 - Valor máximo da tensão para cada fase, em percentagem, dos harmônicos 2 a 25, no sistema do bairro de Ramos	49
Figura 27 - Valor máximo da corrente para cada fase, em percentagem, dos harmônicos 2 a 25, no sistema do bairro de Ramos	49

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Limite global de distorção harmônica total de tensão de acordo com a tensão no barramento (ANEEL, 2011).....	21
Tabela 2 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental) (ANEEL, 2011)	21
Tabela 3 - Limite para as distorções harmônicas de corrente para sistemas de distribuição de 120v a 69KV (IEEE 519, 1992).....	22
Tabela 4 - Classificação de harmônicos referentes a sua sequência (a) e efeitos de cada tipo de sequência (b) (FLUKE, 2000).....	23
Tabela 5 - Valores médios de THD de tensão e de corrente encontrados, em percentual, com e sem banco de capacitores	47

1 **Introdução**

Com o intuito de melhorar cada vez mais a energia elétrica entregue pelas empresas distribuidoras aos consumidores, a qualidade de energia tem sido objeto de estudo. Inicialmente, existia uma preocupação com a continuidade dos serviços, evitando interrupções de energia, e procurando manter frequências e tensões em limites considerados aceitáveis. Isso se deve ao fato da maioria das cargas utilizadas antigamente serem lineares, ou seja, cargas que funcionam com correntes senoidais (Creder, 2007).

Recentemente, com a chegada de novas tecnologias, os sistemas elétricos de potência evoluíram, melhorando seu rendimento, controle e custos. Com esses avanços, as cargas que eram principalmente lineares constituídas de resistências ôhmicas, indutores e capacitores, foram substituídas por equipamentos de cargas não-lineares, compostos por semicondutores, como diodos e transistores. As cargas não-lineares tem como desvantagem a utilização de correntes não senoidais, gerando distúrbios na qualidade de energia entregue aos consumidores (Martins & Afonso, 2004).

Para entender o que são os distúrbios da qualidade de energia elétrica, primeiro tem-se que analisar as condições ideais de operação de um sistema elétrico. Conhecendo-se essas condições, pode-se então comparar o real funcionamento de um sistema e o seu funcionamento ideal e então estabelecer uma escala quantitativa e classificatória para os desvios observados (Deckmann & Pomilio, 2010).

Em se tratando de um sistema elétrico ideal, as ondas de tensão e corrente deveriam ser fornecidas na forma senoidal. Porém, na prática, verifica-se que estas chegam distorcidas. Este fato se deve a distorção harmônica, que é um componente de onda senoidal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental. Normalmente 50Hz ou 60Hz como frequência fundamental da energia elétrica (Schneider/Procobre, 2003)

Em um sistema elétrico trifásico ideal, deve-se levar em consideração as tensões e correntes alternadas, com formas senoidais; amplitudes constantes, nos valores nominais; frequência constante, no valor síncrono; tensões trifásicas equilibradas; fator de potência unitário nas cargas; perdas nulas na transmissão e distribuição (Pomilio, 2015) (Ferreira, 2010).

Conforme visto por Deckmann & Pomilio, 2010, a escolha da função senoidal como forma ideal considera o princípio básico da conservação eletromagnética de energia. Com objetivo de garantir a reversibilidade do processo de conservação eletromagnética é necessário que as variações temporais sejam senoidais podendo ocorrer mudanças somente na amplitude e no deslocamento de fase. A amplitude constante garante que as cargas passivas de impedância constante tenham o nível de potência desejado. Quando se mantém a frequência de um sistema constante, cria-se a possibilidade de diferentes geradores entrarem em sincronismo através de um sistema descentralizado, capaz de manter o equilíbrio das potências geradas e as solicitadas. Este controle da frequência se deve ao fato da impossibilidade de armazenamento da produção de energia elétrica.

O fator de potência unitário garante que o fluxo de potência na linha de transmissão seja mínimo para atender dada carga. Nestas condições, o sistema de transmissão e distribuição não precisam suprir a potência reativa, evitando perdas na transmissão. Sem perdas no transporte de energia elétrica desde os locais de geração até os consumidores, aumenta a quantidade de potência entregue, porém, para isso seria necessário que as linhas de transmissão tivessem resistência nula. Tendo em vista as condições necessárias para o funcionamento ideal de um sistema elétrico trifásico, e analisando as condições reais de funcionamento do sistema elétrico, pode-se dizer que é impossível satisfazer totalmente as condições ideais. Isto ocorre porque os equipamentos elétricos e as redes estão sempre sujeitos a falhas ou perturbações que, de alguma maneira, acabam modificando as condições iniciais de operação do sistema elétrico. Sendo assim, podemos comparar o sistema elétrico ideal com o real, para analisar o quão distante esses sistemas estão e então estabelecer índices que avaliam a deterioração da qualidade de energia elétrica entregue em função dos distúrbios presentes no sistema (Deckmann & Pomilio, 2010).

1.1 Problemas na Qualidade de Energia

1.1.1 Introdução

O sistema elétrico está exposto a várias formas de distúrbios elétricos, e estes podem ser caracterizados de várias formas: afundamento de tensão (voltage sag), subtensão, elevação de tensão (voltage swell), sobre-tensão, transitório impulsivo, transitório oscilatório, interrupção, harmônico, dentre outros. E, então, classificados pela duração do evento (curta,

média ou longa), faixa de frequência (baixa, média ou alta), intensidade do impacto (pequeno, médio ou grande).

1.1.2 Distúrbios Existentes

1.1.2.1 Afundamento de Tensão

O afundamento de tensão é caracterizado pela redução do valor rms da tensão durante um tempo de meio ciclo até 1 minuto, podendo ser provocado por um curto-circuito ou ligação de carga perto do sistema analisado (Rocha, 2015).

1.1.2.2 Subtensão

Quando o afundamento da tensão ultrapassa o tempo de um minuto, este fato é caracterizado como subtensão (Deckmann & Pomilio, 2010).

1.1.2.3 Elevação de Tensão

A elevação de tensão é caracterizado pelo aumento do valor rms da tensão entregue a um sistema durante um tempo de meio ciclo até um minuto, podendo ser causado por desligamento de grandes cargas ou conexão de banco de capacitores (Rocha, 2015).

1.1.2.4 Sobre-tensão

Quando a elevação de tensão ultrapassa o tempo de um minuto com tensões acima do valor rms esperado, ela é chamado de sobre-tensão (Deckmann & Pomilio, 2010).

1.1.2.5 Transitórios Impulsivos

Os transitórios impulsivos ocorrem devido as descargas atmosféricas, estas descargas fazem com que as ondas senoidais da rede elétrica ideal seja acrescida ou decrescida de um impulso repentino nas condições de regime permanente da tensão e da corrente (Ferreira, 2010).

1.1.2.6 Transitórios Oscilatórios

Os impulsos oscilatórios ocorrem devido à energização de uma linha, corte de cargas indutivas e chaveamento de banco de capacitores e transformadores, e são caracterizados por uma rápida variação nos valores e na polaridade da tensão e da corrente do sistema (Ferreira, 2010).

1.1.2.7 Interrupção

A interrupção pode ser caracterizada pelo tempo de duração. Quando ocorrida por um tempo entre três segundos e um minuto, é denominada interrupção temporária. Esta interrupção ocorre quando um sistema de proteção com religamento automático ligado em conjunto com a rede é acionado após a eliminação de um curto circuito. Quando ultrapassado um minuto de duração, esta interrupção é chamada de permanente. Este efeito ocorre quando não há previsão de religação após um curto circuito na rede (Deckmann & Pomilio, 2010).

1.1.2.8 Ruídos

O ruído ocorre devido as interferências eletromagnéticas de altas frequências que podem ser causadas por comutações rápidas dos conversores eletrônicos de potência (Martins & Afonso, 2004).

1.1.2.9 Harmônicos

A distorção harmônica, foco maior deste trabalho, é caracterizada pela combinação de onda de tensão ou corrente, com componentes de frequência múltipla inteira da frequência fundamental. Os harmônicos ocorrem pelo uso de dispositivos não-lineares como, ponte de retificadores; compensadores controlados a tiristores; diodos; dentre outros (Deckmann & Pomilio, 2010).

Todos os distúrbios da qualidade da energia elétrica citados são apresentados na Figura 1. A seção seguinte traz mais detalhes sobre os harmônicos.

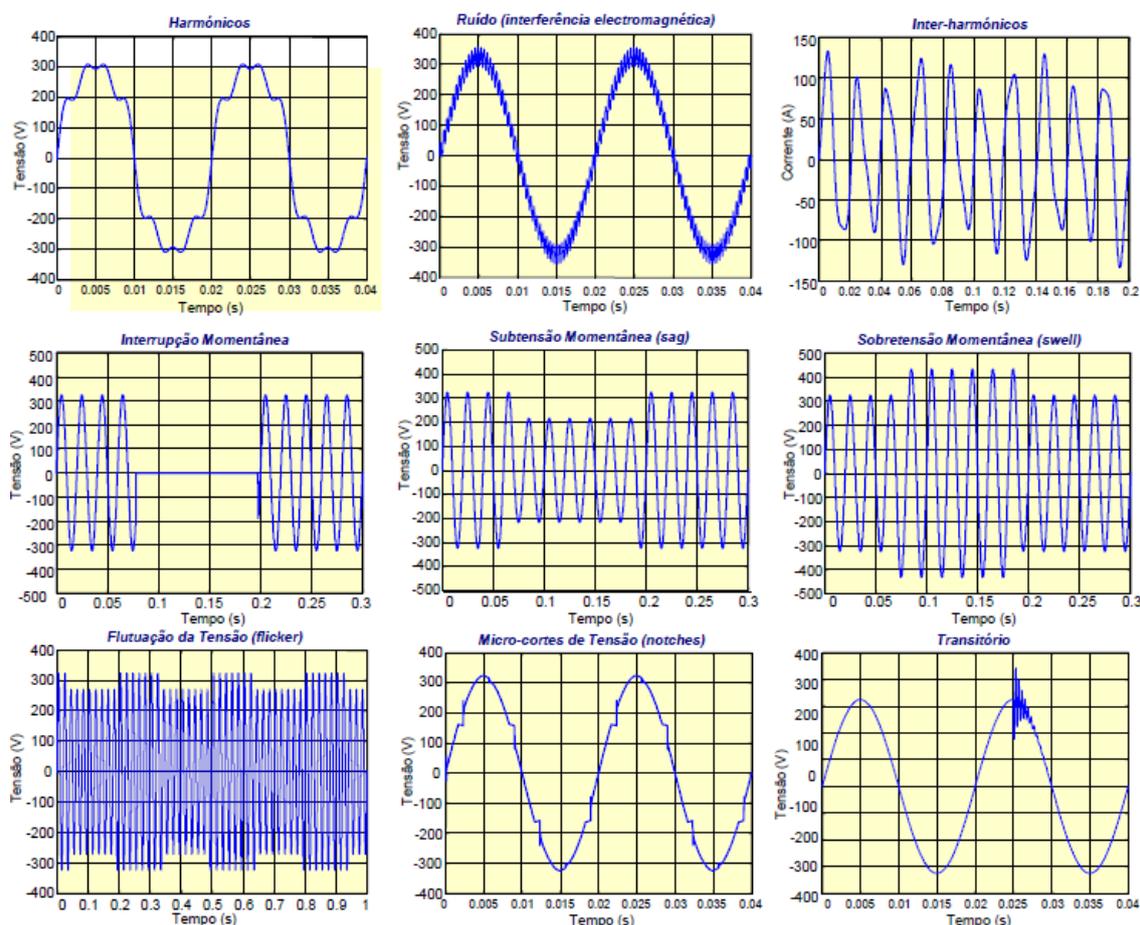


Figura 1 - Distúrbios da qualidade de energia elétrica (Martins & Afonso, 2004)

1.2 Harmônicos

1.2.1 Introdução

Antigamente as cargas lineares eram mais presentes em nosso meio, a exemplo da iluminação incandescente, cargas de aquecimento e motores sem controle de velocidade. Com o avanço da tecnologia, as cargas não-lineares (cargas em que a corrente que se absorve não é da mesma forma que a tensão que a alimenta), foram adquirindo seu espaço devido a sua importância. Hoje podemos dizer que elas se encontram em todos ambientes, desde indústrias: máquinas de solda, inversores de frequência, forno a arco, até residências: computadores, TV, iluminação fluorescente, micro-ondas. Além das cargas não-lineares, a saturação de equipamentos como o transformador fazem circular uma corrente harmônica na rede, gerando

uma tensão harmônica através das impedâncias da rede e deformação na tensão de alimentação (Schneider/Procobre, 2003).

As harmônicas são tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. E quando combinadas com a frequência fundamental produzem as distorções harmônicas. Estas distorções são produzidas por cargas não lineares que injetam a corrente harmônica no sistema de energia. E, quando ultrapassados os níveis máximos estabelecidos, causam distúrbios que prejudicam o funcionamento do sistema (Malta, 2011). (Paulilo, 2005).

Um dos primeiros relatos relacionados a harmônicos aconteceu na década de 1920, nos Estados Unidos, onde a instalação de conversores em refinarias de cobre provocou a interrupção dos sistemas telefônicos e, um outro similar em uma mineração no Canadá. (Paulilo, 2005).

As distorções harmônicas são um tipo específico de energia suja, que está diretamente associado com as cargas não lineares. Estas distorções vem contra o objetivo das concessionárias que, por sua vez, deve fornecer energia de qualidade aos consumidores. Uma das maneiras de eliminar essas distorções contínuas no sistema é a implantação de banco de capacitores, que corrige o fator de potência. Porém, nem sempre essas distorções são eliminadas da rede e, quando altos níveis de distorção atingem os consumidores, sérios danos podem ocorrer nos sistemas elétricos e eletrônicos (Paulilo, 2005).

Sendo assim, deve-se fazer uma medição da quantidade de harmônicos no sistema com intuito de analisar a necessidade de utilização de equipamentos de controle de harmônicos.

1.2.2 Algumas Definições Presentes nas Normas Técnicas

A medição é o método que quantifica ou qualifica parâmetros para estabelecer comparação de sucesso ou falha e tem como objetivo: diagnosticar incompatibilidades entre a fonte de energia elétrica e a carga, analisar a causa de problemas, prever desempenho futuro de equipamentos, dentre outros (Leão, Sampaio, & Antunes, 2014).

De acordo com a norma internacional IEC 61000-4-30, os aparelhos de medição são separados em três classes: A, S e B. A classe A é utilizada para medições mais precisas, principalmente quando há discórdia entre concessionária e cliente, requerendo uma avaliação de conformidade com os padrões. A classe S é usada para diagnosticar ou avaliar a qualidade de energia e, a Classe B, engloba outros equipamentos de medição que não contemplem as necessidades das outras duas classes.

Segundo o documento elaborado pelo ONS – Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede, o instrumento de medição utilizado para cálculo da distorção harmônica deve obter dados até no mínimo a 50ª ordem harmônica e, para cálculo da distorção total deve-se considerar harmônicas até a 25ª ordem, com tempo de medição de no mínimo sete dias completos e consecutivos.

Não são quaisquer níveis de distorção harmônica que causam danos aos aparelhos ligados no sistema. Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pela análise do espectro de harmônicas considerando as amplitudes e ângulos de fase de cada componente individualmente e distorção harmônica total (DHT).

Ainda segundo o Submódulo 2.8 do ONS, o indicador utilizado para quantificar o nível de distorção harmônica total de tensão (DHTT) de um determinado barramento da rede básica é dado pela equação (1), que é a raiz quadrada do somatório quadrático das tensões harmônicas de ordem 2 a 50.

$$\text{THD} = \text{DHTT} = \sqrt{\sum V_h^2} \quad (\text{em } \%) \quad (1)$$

Onde:

$V_h = 100 \frac{V_h}{V_1} \Rightarrow$ Tensão harmônica de ordem h em porcentagem da tensão à frequência fundamental obtida durante a medição.

V_h = Tensão harmônica de ordem h em volts.

V_1 = Tensão à frequência fundamental obtida durante a medição em volts.

O limite de distorção harmônica total de tensão (DHTT) para harmônicas de ordem 2 a 50 estão indicados na Tabela 1, assim como o indicador de distorção harmônica individual de tensão a partir de harmônicas de ordem 2 estão indicados na Tabela 2.

Tabela 1 - Limite global de distorção harmônica total de tensão de acordo com a tensão no barramento (ANEEL, 2011)

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTT) [%]
$V_n \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	8
$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_n < 230\text{kV}$	3

Tabela 2 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental) (ANEEL, 2011)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} < V_n < 230\text{kV}$	
Ímpares não Múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares Múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Outro método de medição do nível de distorção de harmônico é a grandeza TDD (*total demand distortion*), definida como distorção harmônica da corrente em percentual máximo da demanda da corrente de carga. Um fator importante para essa medição é que os valores da Tabela 3 são referentes ao ponto de acoplamento comum (PAC) ou PCC (*point of common*

coupling), ponto em que o cliente alcança a rede elétrica e é usualmente o ponto entre o transformador da rede elétrica e o transformador da instalação do cliente (Figura 2). Isso se deve ao fato de que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que a instalação reflete para os outros consumidores conectados à mesma alimentação (Pomilio, 2015), (IEEE, 1992).

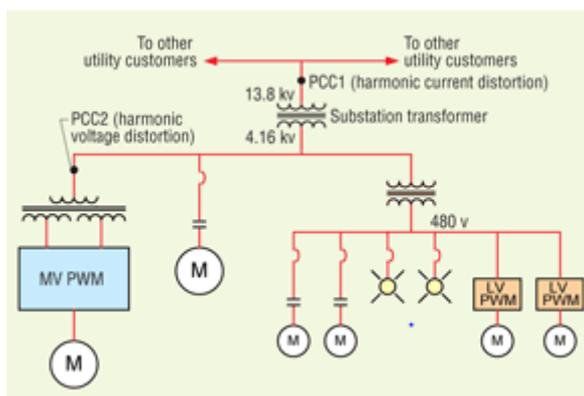


Figura 2 - Desenho indicativo do ponto de acoplamento comum (PAC ou PCC) (Olson, 2015)

Tabela 3 - Limite para as distorções harmônicas de corrente para sistemas de distribuição de 120v a 69KV (IEEE 519, 1992)

Máxima Distorção de Corrente Harmônica em porcentagem de I_L Ordem Harmônica Individual (Harmônicos Ímpares)						
I_{sc}/I_L	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<h	TDD
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	15	7	6	2,5	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Onde:
 I_{sc} = Máxima Corrente de Curto-Circuito no PAC
 I_L = Máxima Demanda de Corrente de Carga (Componente da Frequência Fundamental) no PAC

1.2.3 Classificação dos Harmônicos

Além dos níveis de distorção harmônica individual e total da corrente e tensão, é importante sabermos classificar os harmônicos quanto a sua ordem (pares e ímpares) e sua sequência (positiva, negativa ou zero). As sequências de ordem ímpar acontecem com mais frequência nas instalações elétricas, enquanto as de ordem par surgem com mais vigor nos

casos de assimetria do sinal devido a presença de componentes contínuas. As seqüências referem-se à rotação física em relação à frequência fundamental. A seqüência positiva consiste em três fasores de igual magnitude defasados de 120° , com a mesma seqüência de fases e rotação, ou seja, no mesmo sentido do sistema original. Seus efeitos são aquecimento de condutores, interruptores, dentre outros. A seqüência negativa consiste em três fasores de igual magnitude e defasados de 120° , com seqüência de fases e rotação contrária à do sistema original. Seus efeitos são os mesmos da seqüência positiva incluindo problemas de motor, como vibrações e aquecimento. A seqüência zero, são as harmônicas múltiplas ímpares do 3º harmônico (3, 9, 15, 21, ...), que consiste em três fasores de iguais magnitudes e fase angular da frequência fundamental. Podem causar aquecimento de equipamentos elétricos e aumento no condutor neutro quando ligado em trifásico de quatro fios (Silva, 2012), (Leão, Sampaio, & Antunes, 2014) (Priscilla Malta).

Na Tabela 4a está classificada a seqüência de algumas ordens harmônicas para fins de exemplificação e na Tabela 4b o sentido de rotação e efeitos referentes a cada tipo de seqüência.

Tabela 4 - Classificação de harmônicos referentes a sua seqüência (a) e efeitos de cada tipo de seqüência (b)
(FLUKE, 2000)

	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º*	9º
Frequência	60	120	180	240	300	360	420	480	540
Seqüência	+	-	0	+	-	0	+	-	0

*Mesmo harmônicos desaparecem quando as ondas são imétricas (Típico para circuitos elétricos)

(a)

Seqüência	Rotação	Efeitos (efeitos de superfície, correntes parasitas, etc)
Positiva	Adiante	Aquecimento de condutores, interruptores de circuito, etc.
Negativa	Reversa	Aquecimento como acima e problemas de motor
Zero*	Nenhuma	Aquecimento como acima e aumento do neutro do sistema trifásico a 4 fios

*Harmônicos de seqüência zero (múltiplos ímpares de do 3º) são chamados "triplices" (3º, 9º, 15º, 21º, ...)

(b)

1.2.3 Efeitos dos Harmônicos

Segundo (Pomilio, 2015) (Leão, Sampaio, & Antunes, 2014), algumas das causas e efeitos em alguns equipamentos são:

Motores e Geradores: em máquinas de indução e síncrona, há um aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre, afetando o torque e a eficiência, há também o aumento do ruído e até mesmo oscilações mecânicas. Esses fenômenos são causados quando é aplicado tensões harmônicas de ordem 3, 5, 7, 11, etc que induzem correntes harmônicas no estator da máquina. Como cada harmônica gerada tem sua sequência positiva ou negativa, isso faz com que algumas correntes estejam no mesmo sentido e outras contrária à do rotor.

Transformadores: geralmente o primário dos transformadores são ligados em delta criando um caminho de circulação para reter as harmônicas triplas ímpares (3^a, 9^a, 15^a, etc), porém, a 5^a e 7^a harmônicas entram no sistema causando distorções de corrente e tensão. Este efeito é melhor visualizado quando o sistema está trabalhando com pouca carga. Estas harmônicas causam um aumento nas perdas do ferro devido as harmônicas de tensão e aumento nas perdas do cobre por causa das harmônicas de corrente. As capacitâncias parasitas podem aumentar, e com elas gerar ressonâncias e acoplamentos indesejados.

Cabos de Alimentação: A área efetivamente condutora, restringe a passagem de componentes de altas frequências e, dependendo da distância do cabo, elevadas sobre-tensões podem surgir na linha.

Equipamentos Eletrônicos: Dependendo do aparelho, as distorções na forma de onda, podem alterar ou até mesmo inviabilizar seu funcionamento, como é o caso dos inversores, que podem causar curto circuitos internos decorrente de erros de comutação.

Capacitores: Os bancos de capacitores não geram harmônicos, mas são altamente sensíveis a sua presença. Por serem receptores naturais de frequências harmônicas, os capacitores oferecem um caminho de baixa impedância, fazendo com que fiquem a mercê de sobrecargas e risco de ressonâncias. Quando as correntes harmônicas excedem o valor da corrente fundamental (60Hz), pode ocorrer um aumento de tensão através do dielétrico e a ruptura deste. Para evitar esses distúrbios, reatores anti-harmônicos podem ser usados. Uma maior ênfase aos bancos de capacitores é dada nas seções seguintes, por ser um dos focos deste trabalho.

1.3 Banco de Capacitores

1.3.1 Introdução

O banco de capacitores é normalmente utilizado para correção do fator de potência de um sistema elétrico. Um fator de potência muito indutivo faz com que a quantidade de potência entregue no sistema seja maior que a necessária devido ao aumento da potência reativa indutiva. Isso faz com que a corrente aumente nos condutores e restrinja a capacidade de fornecimento de energia.

Os capacitores podem ser acoplados no sistema elétrico em série ou em paralelo com a carga. Quando ligado em série o banco de capacitores é quase que exclusivamente utilizado para controlar ou amenizar as flutuações de tensão, reduzindo, então, as quedas de tensão causadas pelas reatâncias indutivas. Atuam, também, na redução do fator de potência, porém, de forma pouco eficaz. Capacitores em paralelo atuam exclusivamente injetando reativos no sistema e corrigindo o fator de potência nos pontos instalados.

Para instalação de banco de capacitores, primeiramente deve-se fazer um estudo da necessidade de injeção de potência reativa capacitiva (kVAr_c) para elevar o fator de potência do sistema. O banco de capacitores pode ser fixo ou automático. Os fixos ligam assim que o equipamento é acionado e os automáticos são controlados por relés de comando e microprocessadores. Na instalação dos bancos fixos, deve-se ater a certas condições, como corrente mínima de carga que deverá ser maior ou igual a 1,5 vezes a corrente do banco de capacitores no horário de carga leve ou, se tiverem mais bancos ligados, a corrente mínima de operação deverá ser 1,5 vezes maior ou igual a soma das correntes nominais de todos os bancos.

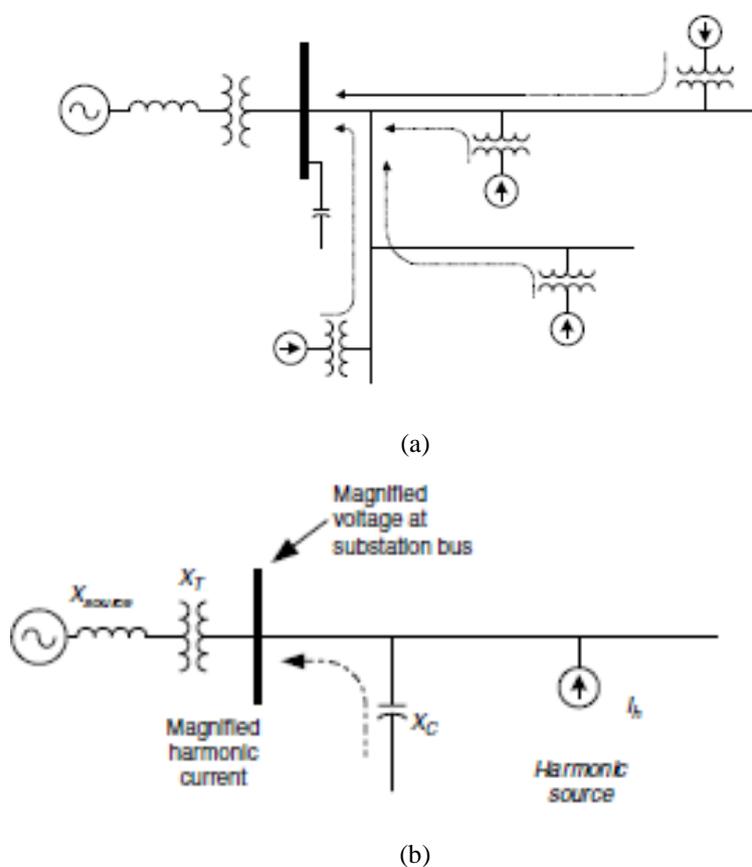
Segundo (Leão, Sampaio, & Antunes, 2014), os bancos de capacitores, quando na presença de harmônicos, são susceptíveis a sobrecarga e a ressonâncias. Para evitar esse tipo de problema, um reator anti-harmônico pode ser usado para proteger o banco de capacitores. Este filtro de dissintonia, como é conhecido, faz com que o ramo LC comporte-se de forma indutiva ($X_L > X_C$) para as frequências harmônicas e de forma capacitiva para a frequência fundamental. Com isso, a frequência ressonante do ramo LC estará abaixo do espectro da carga perturbadora. Mas, para isso, a menor frequência crítica, normalmente de 5ª ordem, deve estar sintonizado com o ramo LC. Este filtro dissintonizador promove deslocamento da frequência ressonante para um valor de frequência não presente na instalação.

Ainda segundo (Leão, Sampaio, & Antunes, 2014), sempre que os capacitores de correção de fator de potência são aplicados a um sistema, haverá uma frequência em que os capacitores estarão em ressonância, porém, deve-se preocupar com as ressonâncias nas frequências harmônicas de ordem 5, 7, 11 e 13, que são características de conversores de seis pulsos, e presentes internamente em inversores de frequência e soft starters.

1.3.2 Ressonância Paralela

Correntes harmônicas tendem a fluir em direção as baixas impedâncias. Em geral, a impedância equivalente das concessionárias é muito menor que as derivações paralelas do sistema, induzindo que as harmônicas direcionem-se para a fonte da concessionária. O banco de capacitores oferece uma baixa impedância para altas frequências, sendo assim as correntes harmônicas se dividem em proporção da razão das impedâncias (Leão, Sampaio, & Antunes, 2014).

Um sistema de distribuição que oferece um potencial risco à problemas de ressonância em paralelo está descrito na Figura 3.



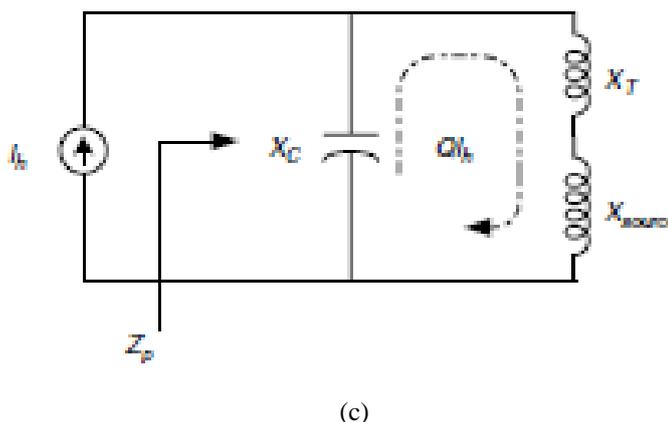


Figura 3 - Sistema com potencial a problemas com ressonância paralela (a) circuito de distribuição simplificado (b) ressonância paralela vista da fonte de harmônico (c) (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2004)

Observando a Figura 3, pode-se dizer que do ponto de vista das fontes de harmônicos, o banco de capacitores está em paralelo com a impedância total do sistema.

Como a reatância indutiva (X_{tot}) e capacitiva (X_c) dependem da frequência, a impedância (Z_{in}) vista pela fonte de harmônicos, dada pela equação (2), pode ser usada para determinar a impedância do sistema para qualquer frequência. Então, é possível encontrar a frequência de ressonância ω_0 (Figura 4).

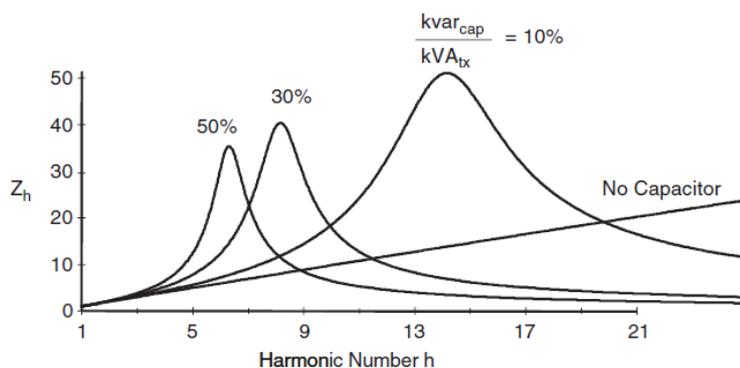


Figura 4 - Resposta em frequência do sistema variando o tamanho do banco de capacitores em relação ao transformador (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2004)

$$Z_p = Z_{in} = \frac{-jX_c(R_{tot} + jX_{tot})}{R_{tot} + j(X_{tot} - X_c)} \tag{2}$$

Pode se observar que quando ocorre a frequência de ressonância ($X_c=X_{tot}$), a impedância (Z_{in}) torna-se muito grande. Assumindo que $R_{tot} \ll X_{tot}$, pela primeira lei de

Ohm (3), vê-se que a curva resposta da tensão acompanha a curva da resposta da impedância e, quando em ressonância, a tensão em X_c é máxima. Isso implica que a corrente harmônica dessa frequência que fluirá no banco de capacitor será Q vezes ampliada, podendo causar falhas no banco de capacitores e até sua queima.

$$V_{in} = Z_{in} I_h = Q X_{tot} I_h \quad (3)$$

Quanto maior a potência reativa do banco de capacitores e menor a potência aparente do transformador, maior será a frequência ressonante (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2004).

1.3.3 Ressonância Série

Quando as fontes de corrente harmônicas se apresentam em série com o banco de capacitores e a indutância de um transformador, como indicado na Figura 5, pode ocorrer a ressonância série.

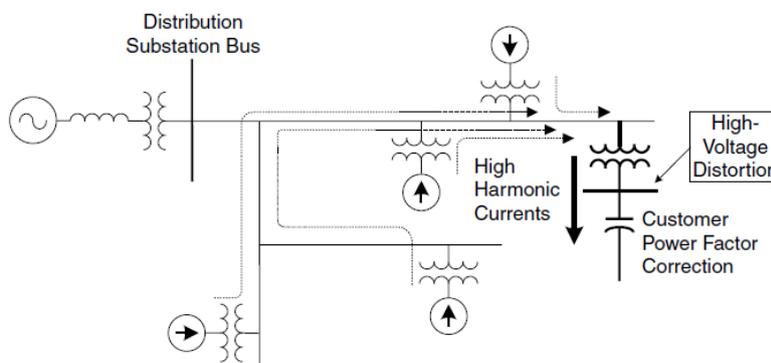


Figura 5 - Circuito com potencial acontecimento de ressonância série (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2004)

O circuito LC, Figura 6, drenará grande parte da corrente harmônica proveniente de cargas não-lineares quando a frequência ressonante corresponder com uma frequência harmônica desta carga.

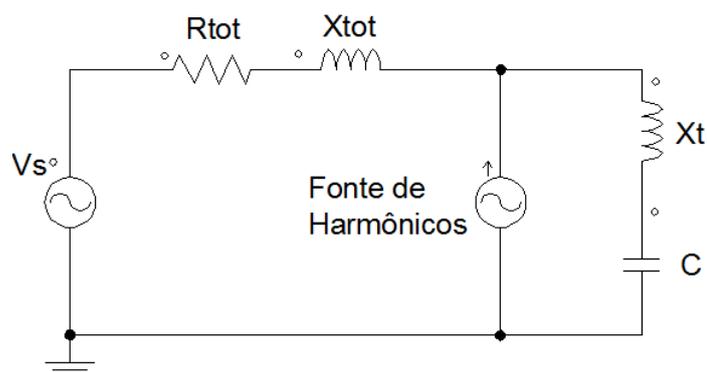


Figura 6 - Circuito equivalente de sistema com potencial para problemas de ressonância série e paralela (Leão, Sampaio, & Antunes, 2014)

O circuito LC descrito pode ser usado para absorver harmônicos, desviando-os da fonte de alimentação. Este é o princípio do filtro sintonizado. Este circuito apresentado pode, também, estar sujeito a ressonância paralela, sendo as correntes harmônicas desviadas em direção a fonte de alimentação. Porém, a frequência que produz a ressonância paralela não é a mesma da que é produzida na ressonância em série (Figura 7).

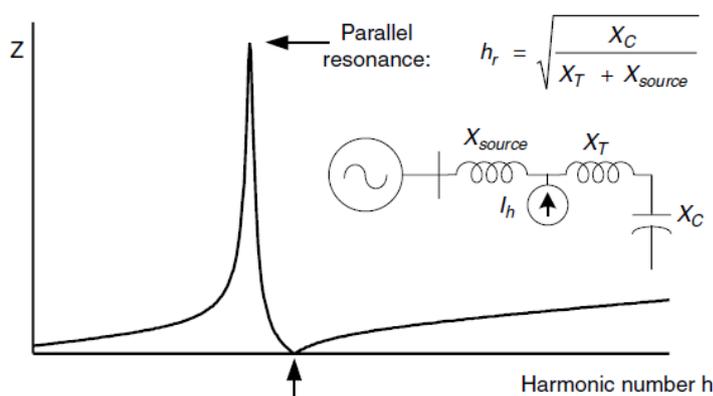


Figura 7 - Resposta em frequência de um sistema com ressonância série e paralela (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Beaty, 2004)

1.4 Métodos de Partida

1.4.1 Partida com Soft-starter

O soft-starter é um equipamento eletrônico capaz de controlar a potência do motor no instante da partida, bem como sua frenagem. Seu princípio de funcionamento baseia-se em

componentes estáticos: tiristores. O esquema genérico de um soft-starter é mostrado na Figura 8 abaixo (Rosa, 2003):

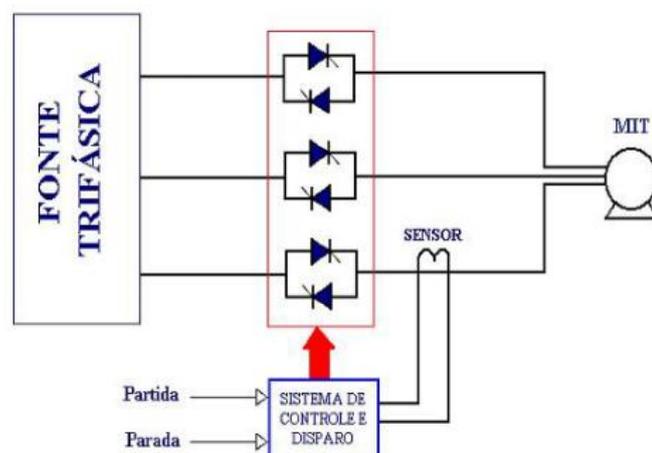


Figura 8 - Esquema de um soft-starter implementado com 6 tiristores para acionar um motor de indução trifásico (MIT)

Para que a partida do motor ocorra de modo suave, o usuário deve parametrizar a tensão inicial (V_p) de modo que ela assuma o menor valor possível suficiente para iniciar o movimento da carga. A partir daí, a tensão subirá linearmente segundo um tempo também parametrizado (t_r) até atingir o valor nominal. Isso é mostrado na Figura 9 (Rosa, 2003):

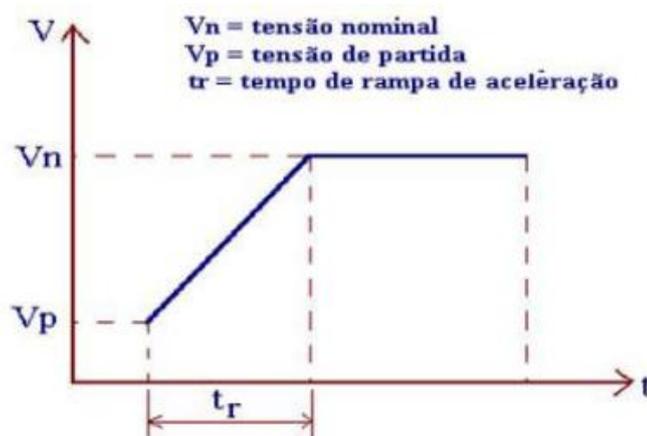


Figura 9 - Curva de aceleração de um MIT usando soft-starter

Na frenagem, a tensão deve ser reduzida instantaneamente a um valor ajustável (V_t), que deve ser parametrizado no nível em que o motor inicia a redução da rotação. A partir desse ponto, a tensão diminui linearmente (rampa ajustável (t_r)) até a tensão final (V_z), quando o motor parar de girar. Nesse instante, a tensão é desligada (Figura 10) (Rosa, 2003).

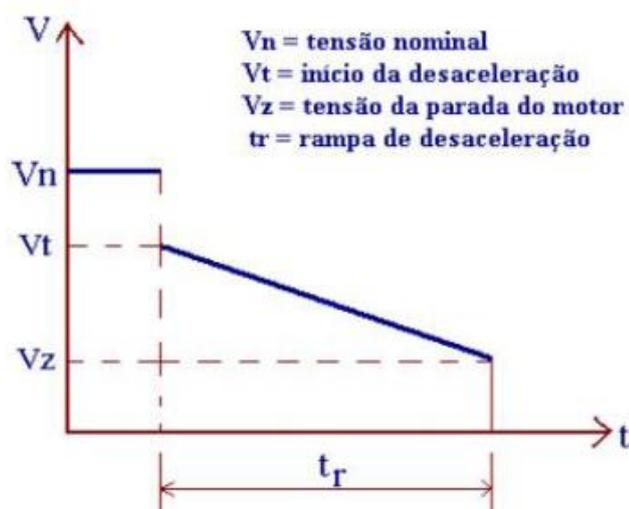


Figura 10 - Curva de desaceleração de um MIT usando soft-starter

1.4.2 Inversor de frequência

O inversor de frequência é um dispositivo eletrônico que transforma energia elétrica CA fixa (tensão e frequência) em energia variável, controlando a potência consumida pela carga. O uso de inversores de frequência é responsável por uma série de vantagens, dependendo dos modelos oferecidos pelos fabricantes, são unidas a capacidade de variar a velocidade com controles especiais já implantados no equipamento. Estes sistemas de variação contínua de velocidade eletrônicos proporcionam, entre outras, as seguintes vantagens: economia de energia, melhoramento do desempenho de máquinas e equipamentos devido a adaptação da velocidade a os requisitos do processo, limita o pico de corrente na partida do motor, reduz a frequência de manutenção dos equipamentos, frenagem direta no motor sem a necessidade de freios mecânicos além de diversas formas de controles preferenciais e controles externos que podem ser até por meio de redes de comunicação. Tudo isso com excelente precisão de movimentos (Gustavo, 2015). Porém, tem como desvantagem uma grande injeção de harmônicos na rede, visto que este equipamento utiliza de cargas não lineares, causando distúrbios na qualidade de energia do sistema.

1.5 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar a qualidade de energia, com foco na distorção provocada pelos harmônicos, para os métodos de partida soft-starter, com e sem banco de capacitores e, partida com inversor de frequência, no sistema de bombeamento de água do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), em Viçosa-MG.

Dado o objetivo geral, têm-se como objetivos específicos:

- Estudar a necessidade do uso de cada equipamento;
- Analisar se os limites máximo de distorção harmônica estão sendo obedecidos;
- Verificar a influência do banco de capacitores na produção de ressonância no sistema.

2 Materiais e Métodos

2.1 Introdução

O presente estudo foi realizado no sistema de bombeamento de água do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE). Fundado em 1970, o SAAE presta serviços de saneamento básico na cidade de Viçosa-MG, melhorando a qualidade de vida e buscando um desenvolvimento sócio econômico para a população viçosense. Hoje, o SAAE atende 88% da população com rede de esgoto e 98% com água tratada, sendo também responsável pela limpeza urbana de Viçosa (SAAE, 2015).

O SAAE tem duas estações de tratamento de água, uma no bairro Bela Vista e outra no bairro Viçosa, sendo denominadas, respectivamente, ETA I e ETA II (Brustolini, 2012).

Como parte do presente estudo, foram feitas análises da qualidade de energia na ETA II (Figura 11), que é responsável pela captação, tratamento e bombeamento da água para uma das caixas d'água de distribuição para a população da cidade. Em específico o estudo foi feito na bomba d'água que leva a água tratada para a caixa de distribuição (Figura 12). Neste local foi utilizado o equipamento soft-starter para acionamento do motor em conjunto com um banco de capacitores.



Figura 11 - Estação de tratamento de Água ETA II.



Figura 12 - Bombeamento ETA II para caixa d'água.

Outra análise foi realizada na Estação Elevatória do Bairro de Ramos (Ramos), que é utilizado para bombear a água de um ponto intermediário da cidade até a caixa d'água do bairro (Figura 13). Neste local, foi estudado um sistema onde foi utilizado um inversor de frequência para partida do motor.



Figura 13 - Bombeamento bairro de Ramos.

Os diagramas das Figura 14 e Figura 15 mostram a distribuição de cargas da instalação e o ponto onde foi colocado o medidor de energia. O circuito de iluminação foi desconsiderado no presente estudo.

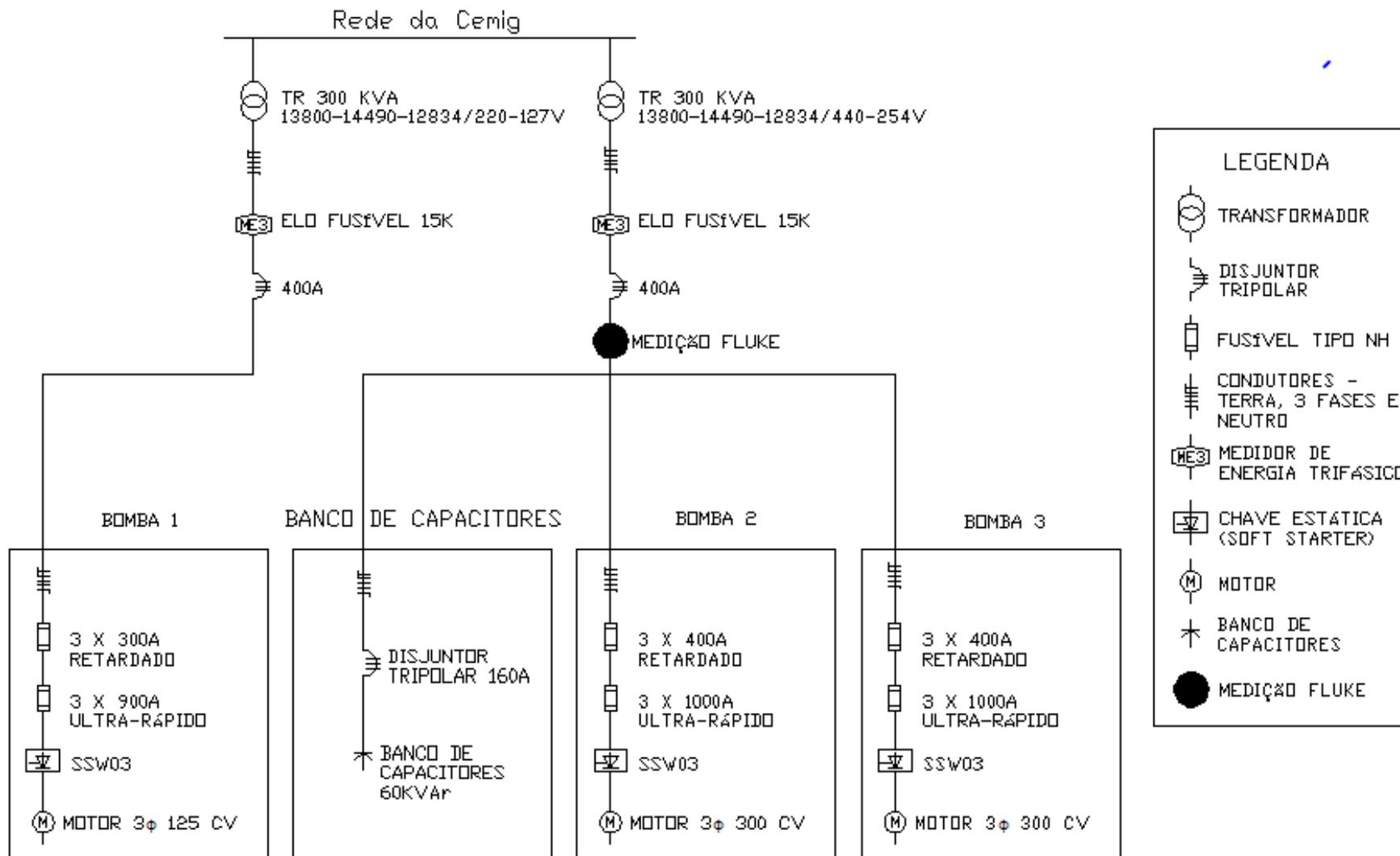


Figura 14 - Diagrama unifilar das cargas no bombeamento em ETA II.

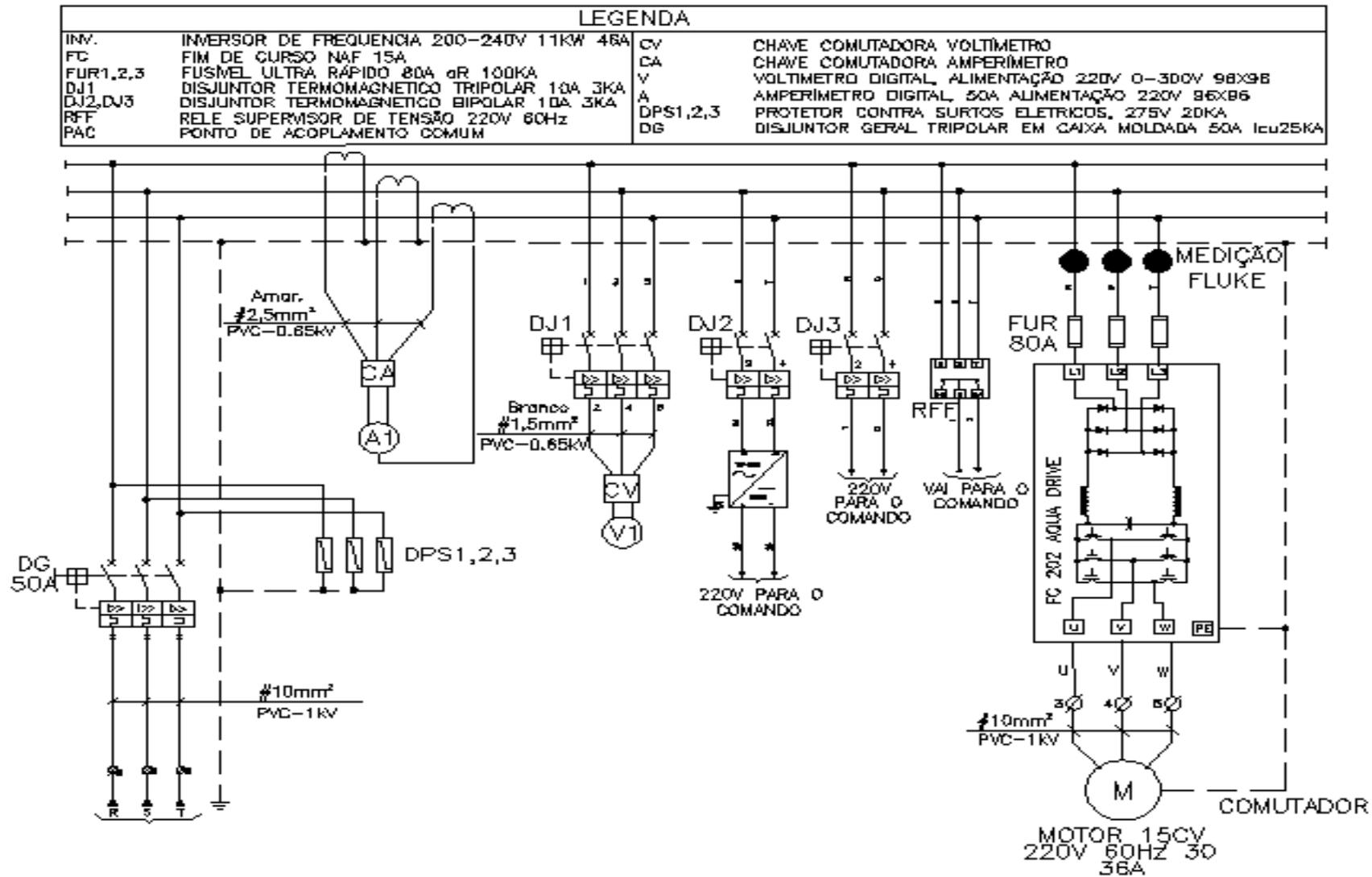


Figura 15 - Diagrama multifilar das cargas no bombeamento da Estação Elevatória de Ramos.

2.2 Descrição dos Materiais

Conforme apresentado nos diagramas unifilares anteriores, o sistema é composto de soft-starters, banco de capacitores, motores e inversores de frequência. Uma descrição detalhada durante a partida de cada um destes equipamentos é apresentada a seguir.

2.2.1 No ETA II - Partida com Soft-starter

Descrição de placa do motor utilizado para coleta dos dados.

Fabricante: WEG Alto Rendimento Plus
Modelo: 0A35635
Tipo: Trifásico
Estrutura: Gaiola de Esquilo
Frequência: 60Hz
Fs: 1,15
Potência: 220(300) kW (HP)
Velocidade: 1790 RPM
Tensão Nominal: 440 V
Corrente Nominal: 348 A
FP: 0,87

Descrição da chave soft-starter.

Fabricante: WEG Full Digital Plus
Modelo: SSW 03
Tipo: Trifásico
Frequência: 60Hz

Descrição Banco de Capacitores

Fabricante: WEG
Modelo:10186125
Frequência: 60 Hz
Tensão: 440 V
Potência: 60 kVAr

2.2.2 No Ramos - Partida com Inversor de Frequência

Descrição de placa do motor utilizado para coleta dos dados.

Fabricante: WEG Alto Rendimento Plus
Modelo: 1008636607

Tipo: Trifásico
Estrutura: Gaiola de Esquilo
Frequência: 60Hz
Fs: 1,15
Potência: 11(15) kW (HP)
Velocidade: 3510 RPM
Tensão Nominal: 220 V
Corrente Nominal: 35,4 A
FP: 0,90

Descrição da chave inversora de frequência.

Fabricante: Danfoss
Modelo: VLT AQUA Drive

Tipo: Trifásico
Frequência: 60Hz
Potência: 11(15) kW (HP)
Tensão Nominal: 240 V
Corrente Nominal: 42 A
Rampa de aceleração: 60 s
Rampa de desaceleração: 30 s

2.2.3 Analisador de Qualidade de Energia

Foi utilizado o analisador de qualidade de energia trifásica série Fluke 435, que permitiu a análise dos parâmetros, eventos e anomalias relacionadas à energia.

2.3 Considerações de Caso

2.3.1 ETA II

A estação ETA II conta com três motobombas, sendo que duas utilizam motores de 300 HP e a outra um motor de 25 HP. A existência de três motores facilita a manutenção de um destes e permite o bombeamento em função da necessidade da vazão para abastecimento da cidade, podendo ser ligados individualmente.

Para obtenção dos dados, o equipamento de análise de energia foi instalado no ponto indicado da Figura 14 no barramento da rede, antes das chaves de partida do motor, como mostrado na Figura 16.



Figura 16 - Medição no barramento da ETA II

O aparelho foi calibrado para obter amostras a cada 0,5 segundos por um tempo de 19 minutos. Os parâmetros medidos para estudo dos fenômenos da qualidade de energia foram a corrente, a tensão, os harmônicos individuais de tensão e corrente, o THD, a frequência e outros. Para o presente estudo, foram utilizados os valores máximos coletados de THD, harmônicas de tensão, harmônicas de corrente, corrente e tensão em cada uma das três fases (L1, L2 e L3).

Como o sistema já estava em funcionamento normal, começou-se a coleta de dados com o motor de 300 Hp (Bomba 2) ligado juntamente com o banco de capacitores durante um tempo de 3'08" (Etapa 1). Em seguida, o motor foi desligado e ligado novamente, ainda com o banco de capacitor, e desta vez permaneceu ligado em regime permanente por mais 4'19" (Etapa 2). Após esta etapa, o processo foi feito novamente, porém, sem o banco de capacitores, ficando em regime permanente por 3'49" (Etapa 3). Por fim, o sistema foi desligado e ligado pela última vez, mas com o banco de capacitores, permanecendo ligado por um tempo de 1'31" (Etapa 4). Estas etapas podem ser visualizadas na Figura 17.

Para um melhor entendimento do processo de medição, na Figura 17 estão indicados os valores da corrente e da tensão obtidos na fase L1 durante toda a medição.

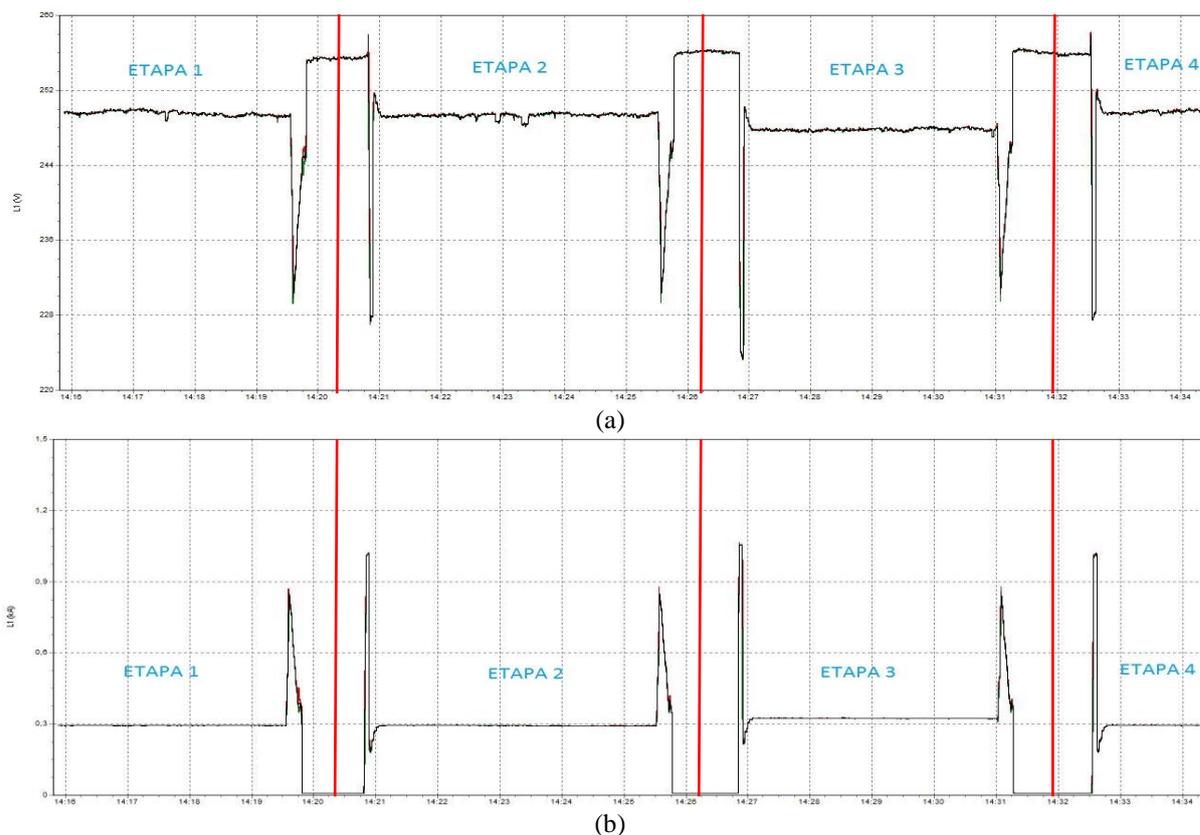


Figura 17 - Valores da tensão (a) e corrente (b) de todo o processo monitorado na ETA II.

Para comparação, foram utilizados os dados coletados em regime permanente, quando o motor foi ligado com o banco de capacitores (Etapa 2) e quando estava sem o banco de capacitores (Etapa 3).

2.3.2 Ramos

Na medição efetuada no Bairro de Ramos, o aparelho foi calibrado para obter amostras a cada 0,5 segundo por um tempo de 16 minutos. Os parâmetros medidos para estudo dos fenômenos da qualidade de energia foram a corrente, a tensão, os harmônicos individuais de tensão e corrente, o THD, a frequência e outros. Para o presente estudo, foram utilizados os valores máximos coletados de THD, harmônicas de tensão, harmônicas de corrente, corrente e tensão em cada uma das três fases (L1, L2 e L3).

O ponto de apoio do Bairro de Ramos conta com duas bombas de 15 HP, que são acionadas individualmente. O fato de ter dois motores facilita a manutenção, caso alguma dê defeito.

Para obtenção dos dados, o equipamento de análise de energia foi instalado no ponto indicado da Figura 15 no barramento da rede, antes das chaves de partida do motor, como mostrado na Figura 18.



Figura 18 - Medição no barramento de Ramos

Neste local, o acionamento do motor é feito com um inversor de frequência.

Na Etapa 1, foi realizado o acionamento de um dos motores de 15 HP que ficou em regime permanente por 6'08". Em seguida este motor foi desligado e ligado por mais duas vezes, permanecendo em regime permanente por um tempo de 1'21" (Etapa 2) e por 1'57" (Etapa 3), ambas em regime permanente.

Neste local não havia o banco de capacitores devido a menor potência dos motores. Então, nenhum equipamento foi retirado durante as medições. Para uma melhor visualização do processo utilizado na coleta de dados, será exposto os valores da corrente e da tensão da fase L1, evidenciando as etapas (Figura 19).

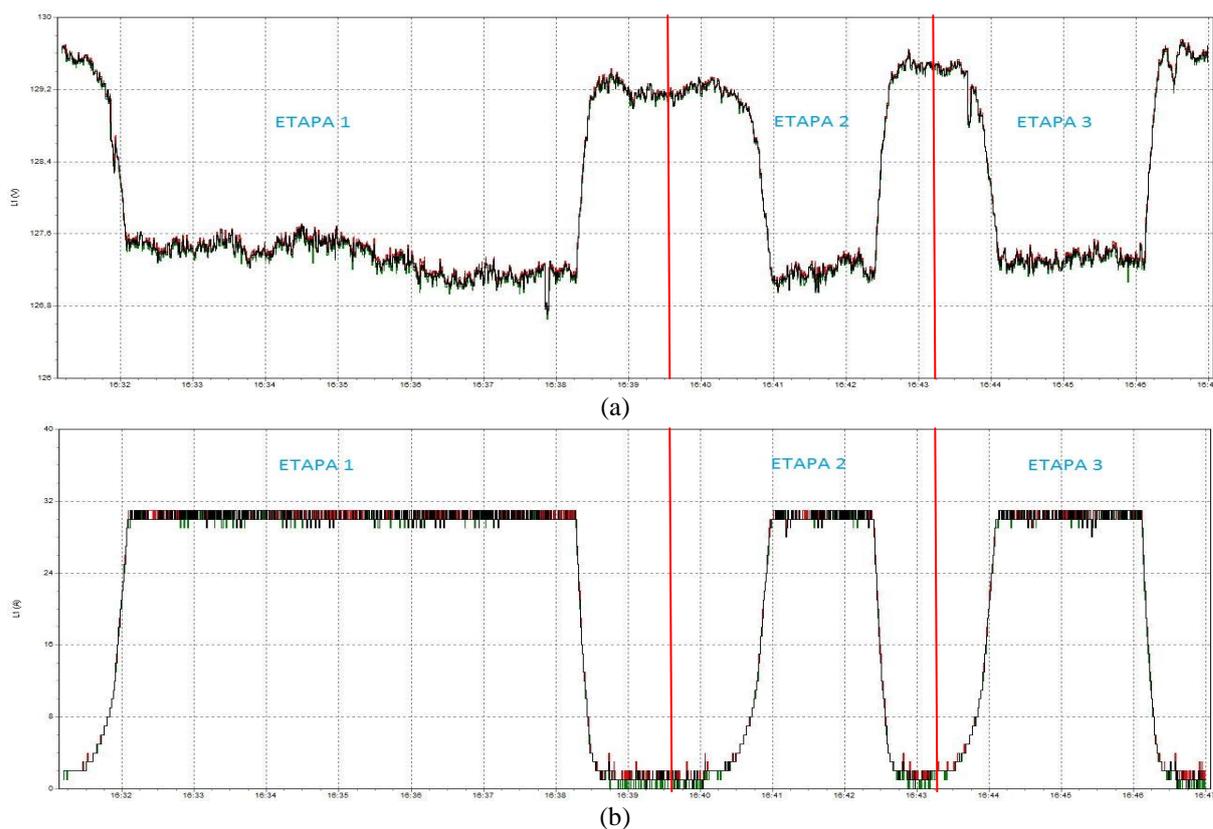


Figura 19 - Valores da tensão (a) e corrente (b) de todo o processo monitorado no Bairro de Ramos

Apenas os valores coletados no regime permanente de maior tempo foi utilizado para análise de dados.

3 Resultados e Discussão

Os resultados apresentados nesta seção são divididos em duas etapas: a primeira trata-se das medições realizadas na ETA II e a segunda no Bairro de Ramos.

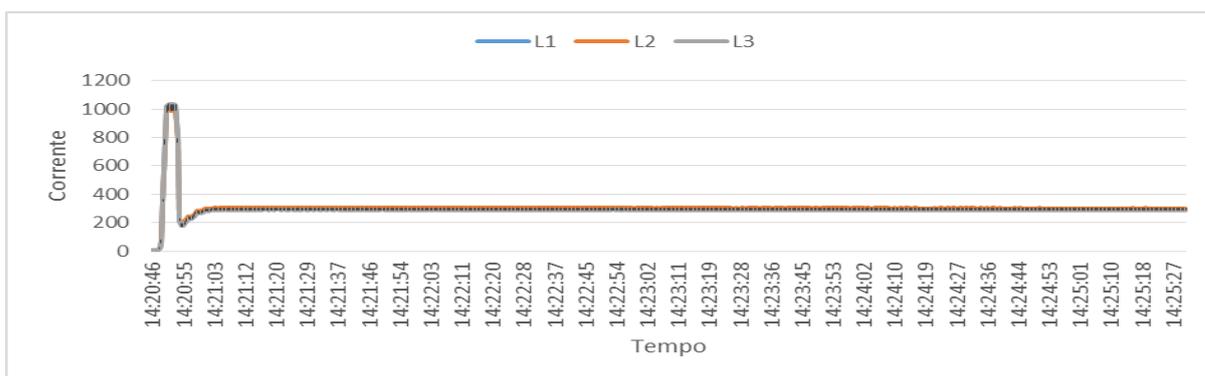
3.1 ETA II

3.1.1 Análise da tensão e corrente

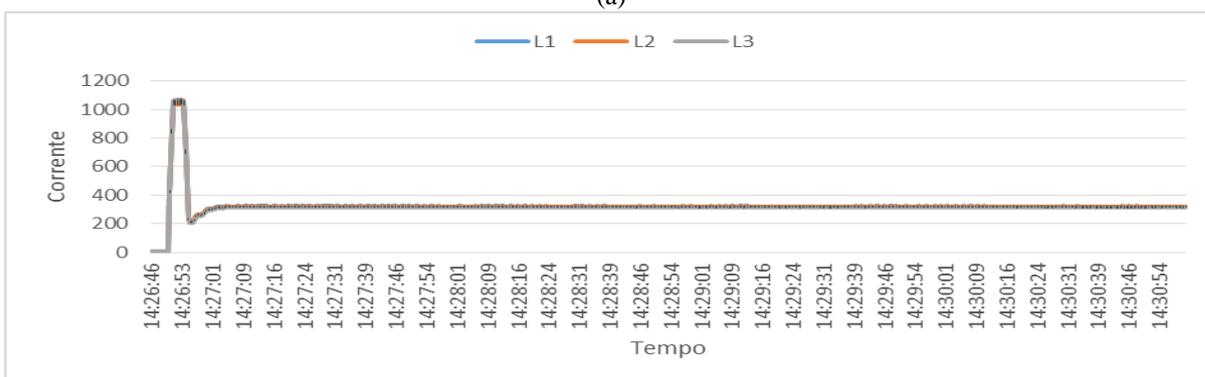
Os estudos foram realizados na presença do banco de capacitores (Etapa 2) e sem o banco de capacitores (Etapa 3). Nas Figura 20 e Figura 21, pode-se observar o comportamento da corrente e da tensão, respectivamente, quando ligados com e sem o banco de capacitores.

Na partida do motor observa-se que o aparelho soft-starter pode não ter sido parametrizado corretamente pois, há um aumento brusco da corrente absorvida pelo motor. Isso ocorre porque, estando parado, não há força contra-eletromotriz que se oponha ao fluxo de corrente. Ao iniciar as primeiras revoluções, com o surgimento da força contra-eletromotriz, o fluxo de corrente diminui e se estabiliza no seu valor nominal. Em regime permanente, a corrente se estabiliza em torno de 295,81 A com o banco de capacitores e, sem o banco de capacitores, em 319,92 A, ou seja, um aumento de aproximadamente 24 A, evidenciando que o Banco de Capacitor (BC) é eficiente na correção do fator de potência.

Na medição da tensão, há uma ligeira queda de tensão na partida, o que é normal em partida de motores. Em regime permanente, pode-se observar que, quando ligado em conjunto com o banco de capacitores a tensão se estabelece por volta dos 249,96 V e apresenta algumas variações no decorrer da medição. Um fator que pode ter causado essas pequenas oscilações é a ligação de algum outro motor e/ou equipamento nas mediações do mesmo, visto que no local estão presentes vários outros motores. Desacoplando o banco de capacitores do sistema, a tensão teve uma pequena queda de aproximadamente 1,5 V, se mantendo volta de 248,63 V.

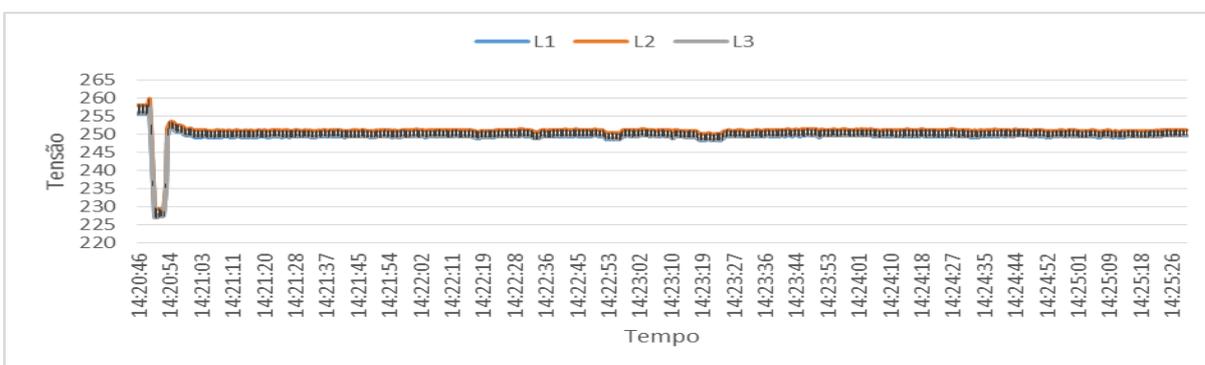


(a)

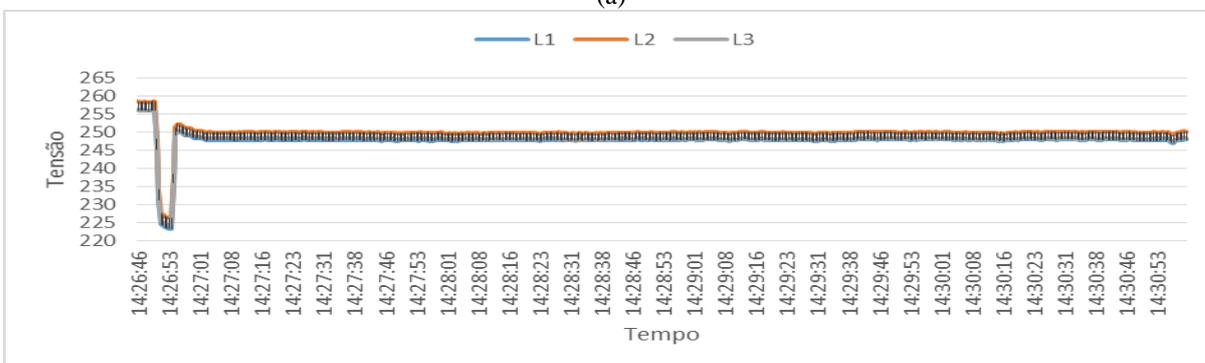


(b)

Figura 20 - Correntes trifásicas na partida e em regime permanente para o sistema (a) com e (b) sem o banco de capacitores



(a)



(b)

Figura 21 - Tensões trifásicas na partida e em regime permanente para o sistema com (a) e sem (b) o banco de capacitores

3.1.2 Análise Harmônica

Os valores máximos dos harmônicos individuais de tensão em cada fase podem ser visualizados na Figura 22.

Com o banco de capacitores, os harmônicos que mais se destacaram foram o 5º, 7º e 11º com valores, respectivamente, de 2,69, 0,35, 0,49 por cento do valor da tensão fundamental. Por outro lado, sem o banco de capacitores, os harmônicos mais expressivos foram o 3º, 5º e 7º, com valores de 0,32, 2,31, 0,24, respectivamente. Observa-se que na presença do banco de capacitores, os harmônicos de ordem 5, 7 e 11 tiveram um aumento de 0,38, 0,11 e 0,33, respectivamente. Harmônicos de ordens mais elevadas também foram verificados, porém, seus valores foram muito pequenos, sendo insignificantes para o estudo. Conforme

Tabela 2, a distorção harmônica de tensão individual somente precisa ser tratada quando ultrapassam limites estabelecidos. Estes limites são 6,5, 7,5, 6,5 e 4,5 para os harmônicos 3, 5, 7 e 11, respectivamente (

Tabela 2).

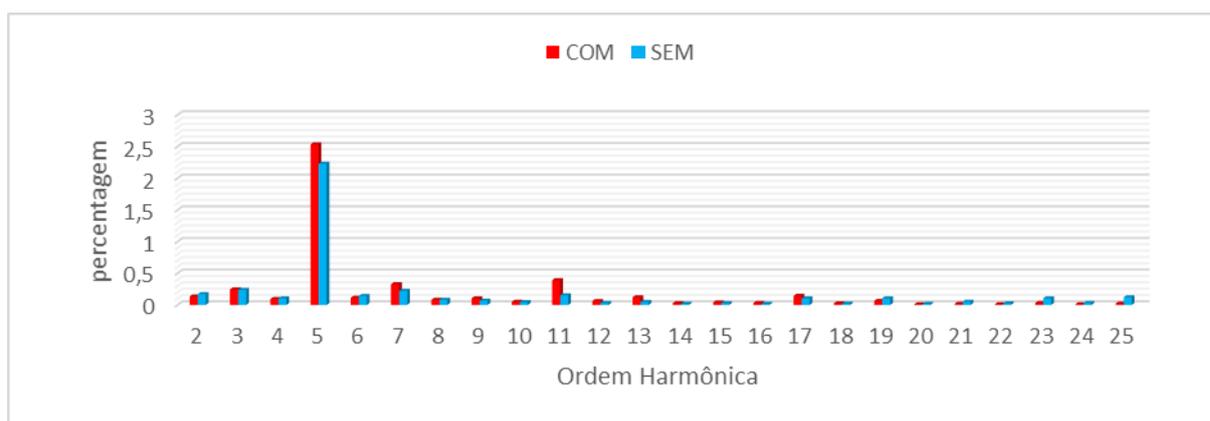


Figura 22 - Valor máximo, em porcentagem, dos harmônicos de tensão 2 a 25, em sistema com e sem banco de capacitores - ETA II

Os harmônicos de corrente mais expressivos na presença do banco de capacitores foram os de ordem 3, 5 e 7, com valores de 0,72, 3,88, 0,78, respectivamente. Na retirada do banco de capacitores, os harmônicos que mais se destacaram foram os de ordem 3, 5, 7, e 11, sendo que os de ordem 3 e 7 apresentaram valores muito próximos. Na presença do banco de capacitores, os harmônicos a partir da 8ª ordem foram ligeiramente filtrados, porém, houve um acréscimo nos harmônicos de ordem 3, 5 e 7 de, respectivamente, 0,14, 1,14, 0,16 e um decréscimo de 0,98 no harmônico de ordem 11 (Figura 23).

Devido ao posicionamento do banco de capacitores com a carga (fonte de harmônicos) o circuito tem uma potencial chance a ter problemas com ressonância série e paralela.

Quando o sistema entra em ressonância série com o banco de capacitor, a impedância do banco de capacitores tende a praticamente zero, fazendo com que boa parte da corrente harmônica em ressonância escoe pelo banco de capacitores. Sendo assim, pode ser explicado o fato de o harmônico de ordem 11 ter diminuído na presença do banco de capacitores. Esse aumento de corrente no banco de capacitor pode acabar gerando uma sobrecorrente e danificar o banco. Outro fato observado é o aumento expressivo da harmônica de ordem 5. Este aumento pode ser explicado devido a ressonância paralela com a frequência emitida pelo banco de capacitores, fazendo com que a impedância e a tensão no banco de capacitores seja máxima, diminuindo a corrente harmônica em ressonância que fluirá pelo banco de capacitores, enviando-a para a rede (Leão, Sampaio, & Antunes, 2014). Este fato fica melhor evidenciado pelo esboço da impedância em linha vermelha tracejada na Figura 23.

Mesmo com o aumento em diversas ordens harmônicas, os níveis de referência individuais não ultrapassaram os limites estipulados para um bom funcionamento do sistema, sendo eles de 4% (Tabela 3).

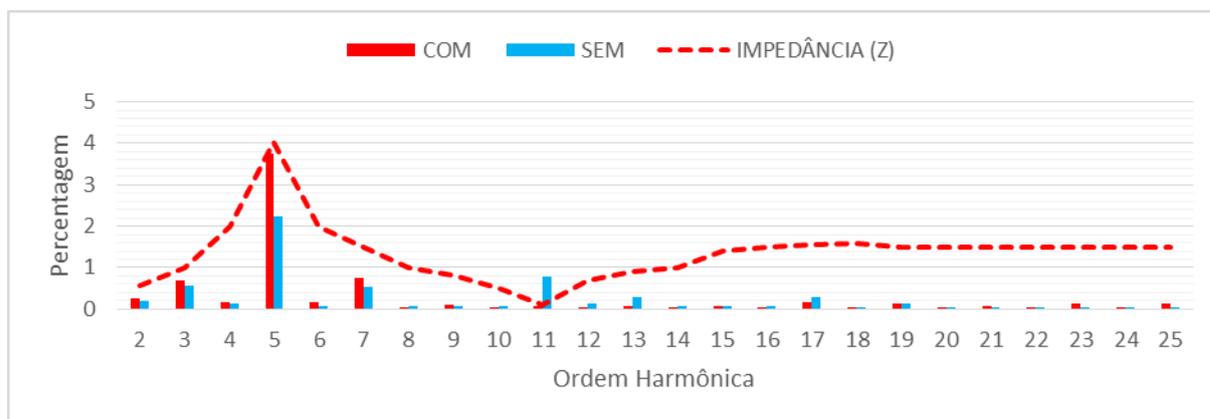


Figura 23 - Valor máximo, em porcentagem, dos harmônicos de corrente 2 a 25, em sistema com e sem banco de capacitores - ETA II

A partir da Tabela 5, observa-se que quando acoplado o banco de capacitores, o nível médio de THD de tensão fica em 2,61% da tensão fundamental. Quando analisado o mesmo sistema, porém, sem o banco de capacitores, o nível médio de THD de tensão abaixa aproximadamente 0,3% e seus valores ficam em 2,32%. Respeitando os níveis máximos de 10% da tensão fundamental (Tabela 1).

Tabela 5 - Valores médios de THD de tensão e de corrente encontrados, em percentual, com e sem banco de capacitores

	Parâmetros	Valor Médio Medido (%)	Valor Limite (%)
THD de Tensão	Com Banco de Capacitores	2,61	10
	Sem Banco de Capacitores	2,32	10
THD de Corrente	Com Banco de Capacitores	2,48	4
	Sem Banco de Capacitores	3,91	4

Analisando o THD de corrente (Tabela 5) observa-se que quando acoplado o banco de capacitores no sistema, o nível médio de THD de corrente estabelece em 2,48% e, quando sem o banco de capacitores, o nível de THD de corrente aumenta aproximadamente 1,4%, ficando 3,91% da corrente fundamental.

Em ambos os casos, o nível máximo aceitável de 4,0% da corrente fundamental não foi excedido (Tabela 3).

3.2 Ramos

3.2.1 Análise da tensão e corrente

Na Figura 24 e Figura 25 pode-se observar o comportamento da tensão e da corrente nas três fases (Etapa 1) durante a partida com o inversor de frequência e em regime permanente. Comparando os métodos de partida dos motores com soft-starter e inversor de frequência, mesmo que utilizados motores diferentes, observa-se que a forma com que a corrente é fornecida ao motor pela partida com soft-starter, o motor absorve uma quantidade repentina muito grande de corrente até que consiga cessar a força contra-eletromotriz e entrar em estado permanente. Na partida com o inversor de frequência, o fornecimento de corrente para cessar o fluxo de corrente é feito aos poucos, evitando com isso um provável afundamento de tensão no sistema.

A tensão no sistema em regime permanente se estabiliza em torno de 127,8 V com um desbalanceamento na fase L2.

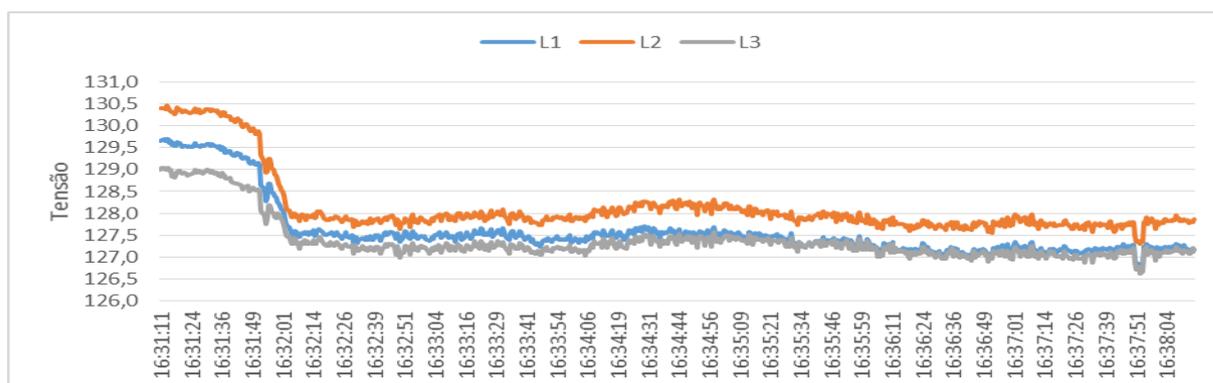


Figura 24 - Tensões trifásicas na partida e em regime permanente – Ramos

Após a partida do motor, o sistema entra em regime permanente e estabelece sua corrente em 33,26 A sendo coerente com a corrente nominal do motor indicada na placa do motor (35,4 A).

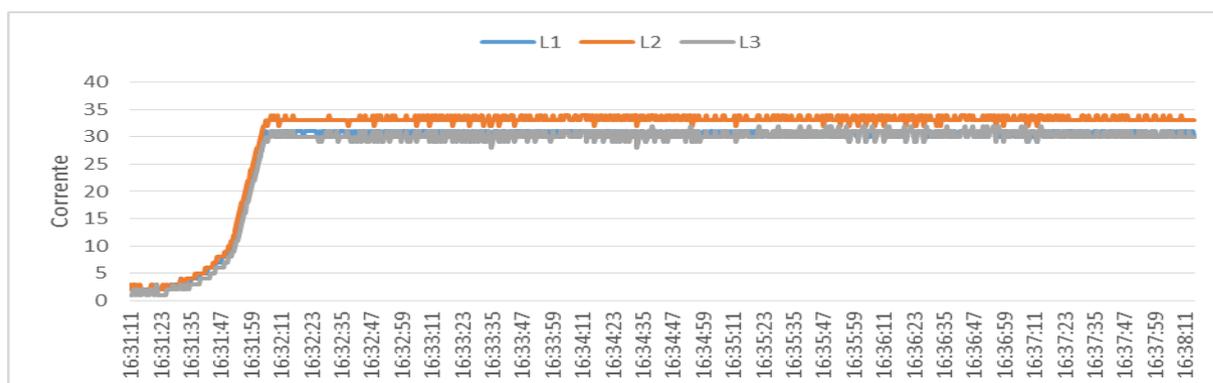


Figura 25 - Correntes trifásicas na partida e em regime permanente – Ramos

3.2.2 Análise harmônica

Uma vez feita as medições com o fluke 435, as distorções harmônicas máximas individuais de tensão foram plotadas (Figura 26) e, então, pode-se observar que as harmônicas mais expressivas foram as de ordem 5, 7 e 11 com valores de 1,96, 0,8, 0,6% do valor da frequência fundamental, respectivamente, respeitando o limite estabelecido da (IEEE STD 519-1992, 1992), de 7,5, 6,5 e 4,5% da tensão fundamental.

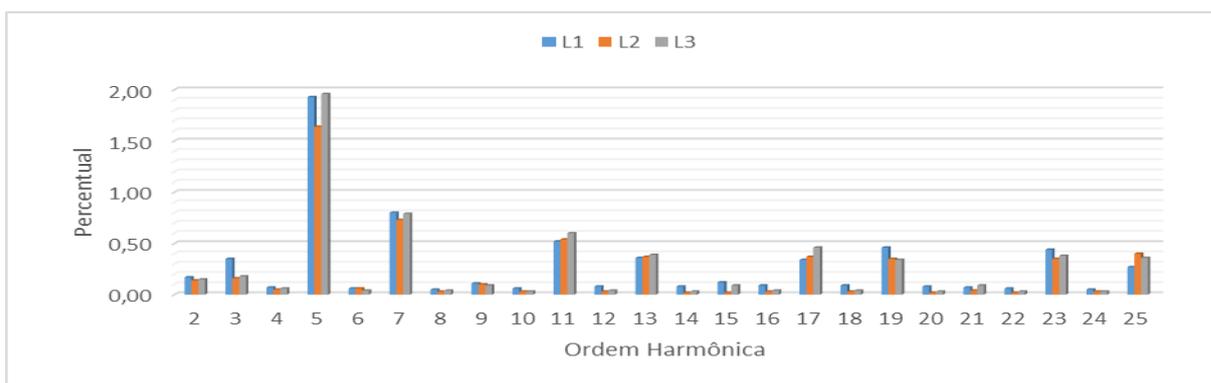


Figura 26 - Valor máximo da tensão para cada fase, em percentagem, dos harmônicos 2 a 25, no sistema do bairro de Ramos

Analisando a distorção harmônica máxima individual de corrente, observa-se que valores muito altos foram atingidos, sendo os de ordem 3, 5, 7 e 11 os que mais se destacaram, ultrapassando o limite máximo estabelecido (Tabela 3), onde os harmônicos menores que a 11ª ordem devem estar abaixo de 4% da corrente fundamental. Nota-se que o 5º harmônico atingiu um valor de 30,7% do valor da frequência fundamental, ultrapassando significativamente o limite estabelecido pela norma. Porém, outros harmônicos também ultrapassaram os valores máximos aceitáveis, que foram os de ordem 2, 13, 17, 19, 23 e 25, conforme Figura 27.

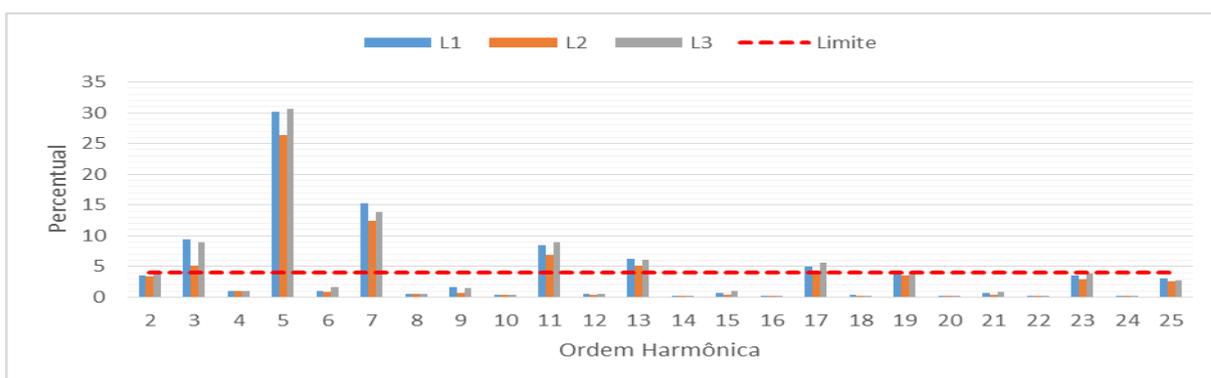


Figura 27 - Valor máximo da corrente para cada fase, em percentagem, dos harmônicos 2 a 25, no sistema do bairro de Ramos

Em relação aos harmônicos de tensão a distorção harmônica total (THD) no ponto de medição ficou dentro dos limites de 10% estabelecidos pela norma, obtendo valores máximos de 2,45%.

Já o THD medido para a corrente, foi da ordem de 37,75%, ultrapassando o limite estipulado pela norma (Tabela 3), que é de 5%. Porém, é importante ressaltar que mesmo atingindo distorções harmônicas acima do limite estabelecido pela norma, essa distorção pode não ser significativa para a rede, uma vez que esse equipamento pode possuir uma corrente muito baixa diante da corrente total da rede, podendo as amplitudes dos harmônicos serem insignificantes em comparação a outras cargas ligadas ao mesmo alimentador conforme apresentado por (Teixeira, 2009).

4 Conclusões

O presente estudo revelou quais os tipos de harmônicos são predominantes em regime permanente nos motores de indução quando acionados por soft-starter e inversor de frequência, além de evidenciar problemas de ressonância em banco de capacitores. Outro aspecto importante a ser destacado é que algumas das cargas medidas ultrapassam os valores de harmônicos estabelecidos pela norma.

O sistema analisado no ETA II demonstra que o banco de capacitores não é tão eficiente com relação aos harmônicos, pois, mesmo que esteja filtrando as harmônicas de alta frequência, está causando um aumento nas harmônicas de ordem 5 e 7. Ressalta-se que os níveis máximos estipulados para as distorções harmônicas individuais de tensão e corrente e nos níveis de THD não foram ultrapassados com e sem o banco de capacitores, mas que, dependendo do aumento de cargas, essa ressonância pode piorar a qualidade de energia do sistema. Porém, o banco de capacitores está atuando corretamente, corrigindo o fator de potência do motor.

Na Estação Elevatória do Bairro de Ramos, mesmo com o grande número de harmônicos individuais de corrente e o THD de corrente excedendo o limite estabelecido, não se pode dizer que o sistema está gerando grande interferência na rede, visto que não se sabe a sua corrente total. Porém, com a instalação de um filtro de harmônicos, conseguir-se-ia diminuir relativamente o THD de corrente..

Para trabalhos futuros, sugere-se fazer um estudo mais detalhado da interferência da distorção harmônica na ETA II, visto que no local estão presentes vários outros motores e sistema de iluminação. Observando então o distúrbio causado por cada motor no sistema e, fazer uma medição antes do transformador para obter o distúrbio total entregue a rede de distribuição pelos equipamentos em funcionamento da ETA II.

Referências

- ANEEL. (2011). *Revisão da Regulamentação sobre a Qualidade do Produto no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica*. Brasília: ANEEL.
- Brustolini, E. J. (2012). *Estudo da Eficiência Energética da Estação Elevatória de Água Bruta do Ribeirão São Bartolomeu - SAAE e Viçosa*. Viçosa: UFV.
- Creder, H. (2007). *Instalações Elétricas*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- Deckmann, S. M., & Pomilio, J. A. (2010). *IT - 012 Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica*. Campinas: UNICAMP/FEEC/DSCE.
- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., & Beaty, H. W. (2004). *Elétrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill.
- Ferreira, D. D. (2010). *Análise de Distúrbios Elétricos em Sistemas de Potência*. Rio de Janeiro: UFRJ.
- FLUKE. (2000). *Compreendendo Harmônicos de Energia*. Everett: FLUKE.
- Gustavo, E. (26 de 06 de 2015). *Técnicas em Eletrotécnica e Instrumentação Industrial*. Fonte: <http://eletrotecnicaeinstrumentacao.blogspot.com.br/2014/02/partida-de-motores-trifasicos-com.html>
- IEEE 519. (1992). *IEEE STD 519-1992 - Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems (ANSI) of IEEE Standards Board*. New York, USA: IEEE.
- International Standard. (2003). *IEC 61000-4-30*. Geneva: IEC.
- Leão, R. P., Sampaio, R. F., & Antunes, F. L. (2014). *Harmônicos em Sistemas Elétricos*. Rio de Janeiro: elsevier.
- Malta, P. L. (2011). *Estudo da Qualidade de Energia no Acionamento de Máquinas Elétricas no SAAE de Viçosa*. Viçosa: UFV.
- Martins, J. S., & Afonso, J. L. (2004). Qualidade da Energia Elétrica. *O Eletricista*, 66-71.
- Olson, M. (26 de 06 de 2015). *Power International Fórum Qualidade*. Fonte: <http://www.ipqdf.com/pt/tag/quality-of-power/>
- ONS. (2009). *Submódulo 2.8 Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes*. ONS.
- Paulilo, G. (2005). *Qualidade de Energia*. Campinas.
- Pomilio, J. A. (26 de 06 de 2015). *NORMAS RELATIVAS À CORRENTE DE LINHA: HARMÔNICAS DE*. Fonte: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/pfp/Cap1.pdf>
- Rocha, M. (26 de 06 de 2015). Fonte: Fontes Sistemas de Energia: <https://fontessistemasdeenergia.wordpress.com/2014/04/04/94/>
- Rosa, A. d. (2003). *Simulação de um soft-starter para acionamento de motores de indução*. Goiana.
- SAAE. (26 de 06 de 2015). *SAAE - VIÇOSA*. Fonte: <http://www.saaevicosa.com.br/portal/Schneider/Procobre>.
- Schneider/Procobre. (2003). *Qualidade de energia Harmônicas*. Schneider Electric .
- Silva, S. R. (2012). *EEE959 - Qualidade da Energia Elétrica: Harmônicos em Sistemas Elétricos*. Belo Horizonte: UFMG.
- Teixeira, D. Â. (2009). *Análise das Distorções Harmônicas - Estudo de Caso de um Sistema Industrial*. Belo horizonte: UFMG.