

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

RODRIGO SANTOS FONSECA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DE UM  
SISTEMA DE BOMBEAMENTO INDUSTRIAL**

VIÇOSA  
2016

RODRIGO SANTOS FONSECA

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA DE 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  
2016



## **RODRIGO SANTOS FONSECA**

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 08 de dezembro de 2016.

### **COMISSÃO EXAMINADORA**

---

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

---

**Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

---

**Prof. Daniel Khéde Dourado Villa - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

*“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano”*

*(Isaac Newton)*

*Dedico a todos que auxiliaram de algum modo nesta conquista.*

## *Agradecimentos*

Agradeço aos familiares e amigos pelo apoio e compreensão. Ao orientador Mauro Prates, pela colaboração e empenho. Ao Eduardo e o SAAE, pela possibilidade da pesquisa. À Fapemig pelo apoio financeiro.

## *Resumo*

No atual cenário mundial, têm-se uma conscientização cada vez maior quanto à utilização de recursos, dentre estes, a energia elétrica aparece com grande destaque. Uma busca por equipamentos mais eficientes, com um consumo menor e de uso simplificado está crescendo, relacionando também fatores como eficiência energética e melhoria da qualidade de energia. A evolução e o desenvolvimento de tecnologias, que buscam melhorar as operações, os componentes, equipamentos e recursos são indispensáveis, uma vez que a demanda do consumo de energia tem aumentado e também existem outros fatores vinculados aos desequilíbrios gerados nas tensões, correntes e as harmônicas presentes na rede. Os desequilíbrios e problemas relacionados à qualidade de energia elétrica estão associados às cargas desequilibradas no sistema trifásico e às cargas não lineares, estes trazem como consequência a operação irregular de equipamentos, estresse dielétrico, térmico e diminuição da vida útil, portanto, mais do que nunca é interessante um estudo mais aprofundado dessas consequências. Este trabalho propõe um estudo do monitoramento e identificação de distorções no sistema de bombeamento da ETA 1 do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa (SAAE), localizado no Campus da Universidade Federal de Viçosa- UFV, onde são analisadas as distorções harmônicas de tensão e corrente e também as oscilações na frequência, tensão e corrente. As medições foram realizadas através da implantação do equipamento por sete dias completos e consecutivos, em duas ocasiões, como regulamentado pela ONS. O período de medição escolhido se baseou na tentativa de visualizar todo o funcionamento do sistema e todas as variações que este poderia ter, buscando mapear o comportamento e com isso às distorções. Realizou-se também dois ensaios de partida dos motores. Os dados obtidos através do equipamento foram avaliados estatisticamente para verificar o padrão de oscilação e também são analisadas as harmônicas presentes. A partir do cálculo do desvio padrão são avaliadas as oscilações presentes na tensão e corrente, bem como os harmônicos, que são comparados com os valores máximos de Distorção Harmônica Total (DHT) estabelecidos pela norma. Finalmente, através de análises dos resultados, comparando com os valores estabelecidos pelas normas, são propostas soluções, como por exemplo, a instalação de Filtros.



## *Sumário*

1	Introdução.....	13
1.1	Qualidade de energia .....	14
1.2	Distúrbios associados à Qualidade de Energia .....	14
1.2.1	Variações de tensão de curta duração .....	14
1.2.2	Variações de tensão de longa duração .....	15
1.2.3	Desequilíbrios .....	15
1.2.4	Variações de frequência.....	15
1.2.5	Ruído .....	16
1.2.6	Harmônicos.....	16
1.3	Definição quanto às distorções harmônicas.....	18
1.4	Soft Starter .....	20
1.5	Objetivo Geral .....	21
2	Material e Métodos.....	22
3	Resultados e Discussões.....	27
3.1	Primeira medição no sistema de captação da ETA1.....	27
3.2	Segunda medição no sistema de captação da ETA1.....	37
3.3	Medições da partida do Motor 1 .....	43
3.4	Medições da partida do Motor 2.....	48
3.5	Discussão geral.....	52
4	Conclusões.....	55
	Referências Bibliográficas .....	57

## *Lista de Figuras*

Figura 1: Demonstração dos tipos de distúrbios.....	17
Figura 2: Chaves <i>Soft Starter</i> VLT.....	20
Figura 3: Métodos de partida.....	21
Figura 4: Localização da estação de bombeamento no campus da UFV, imagem de satélite.	22
Figura 5: Sistema de bombeamento de água. ....	24
Figura 6: Painel de partida dos motores. ....	24
Figura 7: Fluke conectado ao barramento de entrada.....	25
Figura 8: Diagrama unifilar do sistema de bombeamento.....	26
Figura 9: Tensão trifásica durante o intervalo de sete dias, medidas diretamente na rede de alimentação dos motores.....	28
Figura 10: Corrente trifásica durante o intervalo de sete dias, medidas na rede de alimentação. .....	28
Figura 11: Momentos de acionamento dos motores nas primeiras 85 horas, mostrados com a tensão. ....	30
Figura 12: Momentos de acionamento dos motores nas últimas 85 horas, mostrados com a tensão. ....	30
Figura 13: Momentos de acionamento dos motores nas primeiras 85 horas, de acordo com a variação de corrente. ....	31
Figura 14: Momentos de acionamento dos motores nas últimas 85 horas, mostrados com a variação da corrente. ....	31
Figura 15: Variação das Potências durante os sete dias. ....	32
Figura 16: Variação da Frequência.....	33
Figura 17: DHTv (de tensão) das três fases.....	33
Figura 18: Momentos de acionamento dos motores nas primeiras 85 horas, relacionados com o DHTv. ....	34
Figura 19: Momentos de acionamento dos motores nas últimas 85 horas, dispostos juntamente com o DHTv. ....	34
Figura 20: DHTi (de corrente) das três fases.....	35

Figura 21: Momentos de acionamento dos motores nas primeiras 85 horas, juntamente com o DHTi. ....	35
Figura 22: Momentos de acionamento dos motores nas últimas 85 horas, mostrados com o DHTi. ....	36
Figura 23: Tensões durante a segunda medição no sistema de captação do SAAE. ....	38
Figura 24: Correntes durante a segunda medição no sistema de captação do SAAE. ....	39
Figura 25: Potência durante a segunda medição no sistema de captação do SAAE. ....	39
Figura 26: DHTv da segunda medição na captação do SAAE. ....	40
Figura 27: DHTi da segunda medição na captação do SAAE, do momento zero até a hora 93. ....	41
Figura 28: DHTi da segunda medição na captação do SAAE, da hora 93 até o final da medição. ....	41
Figura 29: Harmônicas individuais de tensão da segunda medição na captação do SAAE. ....	42
Figura 30: Harmônicas individuais de corrente da segunda medição na captação do SAAE, do momento zero até a hora 93. ....	42
Figura 31: Harmônicas individuais de corrente da segunda medição na captação do SAAE, da hora 93 até o final. ....	43
Figura 32: Tensões na partida do motor 1, de 175CV. ....	44
Figura 33: Correntes na partida do motor 1, de 175CV. ....	45
Figura 34: DHTv na partida do motor 1, de 175 CV. ....	46
Figura 35: DHTi na partida do motor 1, de 175 CV. ....	46
Figura 36: Harmônicas individuais de tensão na partida do motor 1, de 175 CV. ....	47
Figura 37: Harmônicas individuais de corrente na partida do motor 1, de 175 CV. ....	47
Figura 38: Tensões na partida do motor 2, de 100CV. ....	48
Figura 39: Correntes na partida do motor 2, de 100CV. ....	49
Figura 40: DHTv na partida do motor 2, de 100 CV. ....	50
Figura 41: DHTi na partida do motor 2, de 100 CV. ....	50
Figura 42: Harmônicas individuais de tensão na partida do motor 2, de 100 CV. ....	51
Figura 43: Harmônicas individuais de corrente na partida do motor 2, de 100 CV. ....	51

## *Lista de Tabelas*

Tabela 1: Faixa de classificação das tensões para 127V de referência .....	15
Tabela 2: Informações sobre os distúrbios .....	17
Tabela 3: Limite de distorção de tensão .....	18
Tabela 4: Limites de Distorção da Corrente para Sistemas de Distribuição (120V a 69kV)... ..	19
Tabela 5: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental) .....	19
Tabela 6: Dados das placas dos motores. ....	23
Tabela 7: Definições do <i>Soft Starter</i> .....	23
Tabela 8: Tempo a partir do momento que os motores foram acionados, em horas. ....	29
Tabela 9: Momento de acionamento do motor na segunda medição. ....	38

# ***1 Introdução***

Os dispositivos elétricos utilizados nas redes elétricas, especialmente os de eletrônica de potência, estão cada vez mais suscetíveis aos desequilíbrios e harmônicos na rede, o que tem ocasionado muitas discussões. Daí a importância do fator Qualidade de Energia Elétrica (QEE).

Hoje em dia os problemas relacionados à Qualidade de Energia são expressivos, pois existe uma quantidade significativa de equipamentos causadores de distúrbios de energia e ao mesmo tempo são sensíveis a tais distúrbios. Com o avanço tecnológico em diversas áreas, principalmente a eletrônica de potência, os equipamentos e maquinários tem se tornado altamente sensíveis às variações da qualidade de energia.

Boa parte dos dispositivos modernos possuem em sua construção controles microprocessados e unidades de eletrônica de potência, o que intensifica alguns dos distúrbios presentes na rede, que anteriormente não eram tão estudados e controlados, pois não causavam efeitos adversos nos equipamentos. Hoje estes distúrbios têm grande influência no funcionamento de diversos componentes elétricos, resultando principalmente em má operação e redução da vida útil destes (Paulilo, 2005).

Nesse sentido, tem aumentado o interesse por parte dos consumidores relacionado ao tema qualidade de energia, visto que a energia elétrica é um produto comercializável, portanto, deve atender aos direitos dos consumidores. Logo, as concessionárias devem possibilitar o fornecimento de energia que garanta o funcionamento seguro e confiável dos equipamentos e componentes. Se tratando de um caso ideal, o serviço deve ser oferecido com continuidade plena e oferta ilimitada de energia elétrica, sendo o sistema elétrico capaz de disponibilizar energia com tensões equilibradas e sem distúrbios na forma de onda, ou seja, tensões senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constantes. Portanto, os desvios e distúrbios presentes junto ao produto de consumo energia elétrica são estudados e corrigidos através do tema Qualidade de Energia Elétrica (QEE) (Paulilo, 2005).

## **1.1 Qualidade de energia**

O termo Qualidade da Energia está relacionado às alterações que podem ocorrer no sistema elétrico, sendo definida como qualquer problema de energia que se manifesta na corrente, na tensão ou no espectro da frequência e que pode ocasionar algum tipo de falha ou operação inadequada de equipamentos conectados à rede. Este tema requer preocupações tanto por parte das concessionárias quanto dos consumidores, por se tratar de um assunto técnico emergencial (Leão, 2014).

Esses problemas podem ser provocados de diversas formas, mas têm-se algumas causas mais prováveis como: chaveamentos em linhas de transmissão, conexão ou desconexão de banco de capacitores e geradores, curtos-circuitos e operação de cargas não lineares.

As questões da Qualidade de Energia estão vinculadas ao produto comercializável energia elétrica, envolvendo todos os processos, desde a produção, o transporte, a distribuição e o consumo deste recurso. Esse sistema tem se tornado cada vez mais complexo e detentor de mais variáveis que influenciam nas condições, devido à variedade de fenômenos que causam distúrbios nas ondas de tensão e corrente (Leão, 2014).

## **1.2 Distúrbios associados à Qualidade de Energia**

Dentre os diversos distúrbios causados por problemas na Qualidade de Energia, são vistos de forma mais detalhada alguns destes, como:

### **1.2.1 Variações de tensão de curta duração**

São caracterizadas por alterações instantâneas e, em geral, ocasionadas pela energização de cargas que requerem altos valores de corrente de partida, ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos de sistema. Os efeitos das variações podem ser de um afundamento momentâneo de tensão (“sag”), uma elevação momentânea de tensão (“swell”), ou mesmo uma interrupção completa do sistema elétrico, de acordo com a falha e as condições que o sistema se encontra (Paulilo, 2005).

### 1.2.2 Variações de tensão de longa duração

As variações de tensão de longa duração são semelhantes aos de curta duração, mas se mantêm no sistema elétrico por um tempo superior a três minutos. Podem ser causadas pela retirada de grandes cargas, perdas de fase, dentre outras possibilidades (Paulilo, 2005). A (ANEEL, 2010) estabelece os limites para caracterização da tensão em três níveis, essas faixas de classificação para regime permanente com valor de referência de 127V são mostradas na Tabela 1.

**Tabela 1: Faixa de classificação das tensões para 127V de referência**

Tensão de Atendimento	Faixa da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$116 \leq TL \leq 133$
Precária	$109 \leq TL < 116$ ou $133 < TL \leq 140$
Crítica	$TL < 109$ ou $TL > 140$

Fonte: ANEEL, 2010, Módulo 8, p. 31.

### 1.2.3 Desequilíbrios

Os desequilíbrios podem ser identificados e definidos através do desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, divididos pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressados em percentual. As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Ou possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos trifásicos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária (Paulilo, 2005).

### 1.2.4 Variações de frequência

Os desvios são variações que ocorrem na frequência fundamental do sistema, 50 ou 60 Hz. Baixas taxas de variações da frequência resultam do balanço dinâmico entre carga e geração no caso de alguma alteração ( $\pm 0,5\text{Hz}$ ). Quando as variações de frequência ultrapassam os limites de operação normal em regime permanente, podem ter ocorrido faltas em sistemas de transmissão, retirada de carga ou de algum gerador (Paulilo, 2005).

### 1.2.5 Ruído

O ruído é um sinal indesejável que aparece nas formas de onda de tensão e corrente, com espectro de frequência menor que 200 kHz, de baixa intensidade, sobrepondo os sinais de corrente ou tensão. Esta interferência resulta de operações inadequadas de equipamentos, instalação incorreta de componentes. O uso de filtros é recomendado para atenuar este sinal (Paulilo, 2005).

### 1.2.6 Harmônicos

Harmônicos de tensões e correntes são sinais senoidais com módulo e ângulo de fase constituídos de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. Quando as ondas de tensão ou corrente harmônicas são combinadas com a frequência fundamental produzem as distorções harmônicas, que geram desequilíbrios e problemas no sistema, (Paulilo, 2005).

Os harmônicos são classificados segundo a sua ordem, através de um fator multiplicado pela frequência fundamental, podendo ser ímpares ou pares. Outra classificação é de acordo com a sequência que ele pertence, podendo ser positiva, negativa e zero. As sequências estão relacionadas com a rotação física em relação à frequência fundamental. Para sistemas equilibrados, a sequência positiva possui seus fasores defasados de 120° graus, que giram no mesmo sentido do sistema original, sendo estes, frequência fundamental, 4.º e 7.º harmônicos. A sequência negativa possui seus fasores defasados de 120° graus, com fase e rotação contrária à do sistema original, sendo neste caso o 2.º, 5.º e 8.º harmônicos. A sequência zero possui fasores em fase angular com a frequência fundamental, são o 3.º e 9.º harmônicos (Leão, 2014).

Alguns dos distúrbios apresentados, suas causas e efeitos são mostrados na Tabela 2.



**Tabela 2: Informações sobre os distúrbios**

Distúrbio	Causas	Efeitos
Sub e sobretensões	- Partidas de motores; - Variações de cargas; - Chaveamento de capacitores; - TAPs de transformadores ajustados incorretamente.	- Redução na velocidade dos motores de indução; - Falhas em equipamentos eletrônicos; - Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores e transformadores; - Operação indevida de relés de proteção, motores e geradores.
Desequilíbrio	- Fornos a arco; - Assimetrias entre as impedâncias.	- Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas; - Geração, pelos retificadores, de 3º harmônico e seus múltiplos.
Variações de frequência	- Perda de geração ou de linhas de transmissão.	- Danos nos geradores.
Ruído	- Chaveamento de equipamentos eletrônicos; - Radiações eletromagnéticas.	- Distúrbios em equipamentos eletrônicos.
Harmônicos	- Cargas não lineares.	- Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; - Operação indevida de disjuntores, relés e fusíveis, etc.

Fonte: Paulilo, 2005, p. 33.

De forma a ilustrar o comportamento de um sinal em cada tipo de distorção apresentado, observa-se por meio da Figura 1 os fenômenos de acordo com a classificação:

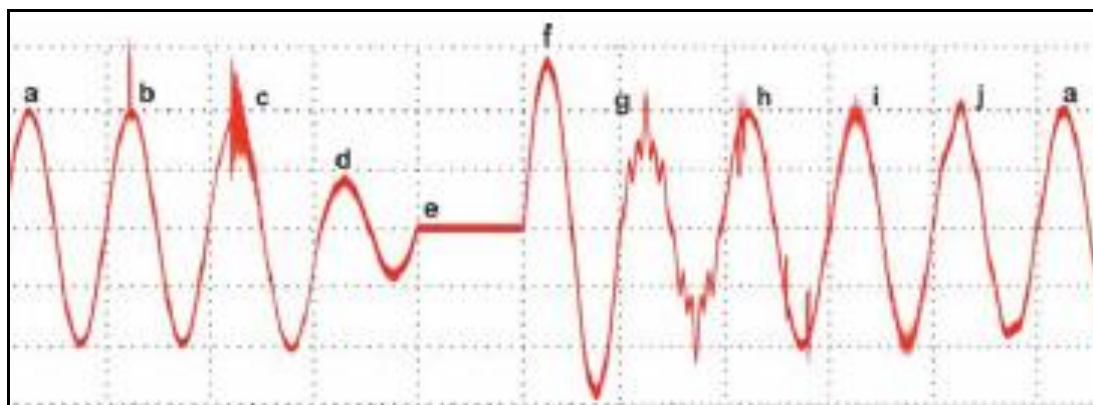
*a- tensão senoidal*

*g – harmônico*

*h - corte de tensão*

*i - ruídos*

*j – inter-harmônicos.*

**Figura 1: Demonstração dos tipos de distúrbios**

Fonte: Paulilo, 2005, p. 28.

### 1.3 Definição quanto às distorções harmônicas

Segundo recomendações da (IEEE, 1992), as distorções harmônicas devem estar dentro de um limite máximo para que estas não comprometam o sistema elétrico. Para se caracterizar os casos, devem ser realizadas medições com equipamentos adequados e seguindo padrões de cálculo, a distorção harmônica total (DHT) calculada para tensão ( $DHT_v$ ) e para corrente ( $DHT_i$ ), que pode ser visto de modo geral a seguir:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N M_h^2}}{M_1} \quad (1)$$

O sinal  $M$  representa a tensão ou a corrente, sendo que o subscrito  $h$  se refere às respectivas harmônicas e o subscrito 1 se refere ao sinal de frequência fundamental.

De acordo com a recomendação da IEEE 519, têm-se os limites máximos de DHT no ponto de acoplamento desde o caso de baixa tensão até alta tensão. Esta norma sofreu revisão no ano de 2014, ganhando alterações que simplificaram o uso e reajustaram alguns limites. São apresentados na Tabela 3 e 4 os índices que se adequam ao sistema estudado. A Tabela 3 mostra o limite de distorção de tensão ( $DHT_v$ ) para sistemas de baixa tensão. A Tabela 4 indica a distorção harmônica de corrente ( $DHT_i$ ) para sistemas com tensão entre 120V e 69kV.

**Tabela 3: Limite de distorção de tensão**

Tensão (V)	$DHT_v$ (%)
$V_n < 1k$	8
$1k > V_n \leq 69k$	5
$69k > V_n \leq 161k$	2,5
$V_n < 161k$	1,5

*Fonte:* IEEE 519, 2014, p. 6.

**Tabela 4: Limites de Distorção da Corrente para Sistemas de Distribuição (120V a 69kV).**

Icc/I1	DHTi (%)
< 20	5
20 < 50	8
50 < 100	12
100 < 1000	15
>1000	20

*Fonte:* IEEE 519, 2014, p. 7.

Onde o termo Icc/I1 indica a razão entre a corrente de curto circuito e a média da demanda de corrente da carga do sistema. A Tabela 5 mostra os níveis das harmônicas individuais de tensão para sistemas de baixa tensão.

**Tabela 5: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental)**

Ordem harmônica	Vn<1kV	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5
	7	6,5
	11	4,5
	13	4
	17	2,5
	19	2
	23	2
	25	2
Ímpares múltiplas de 3	>25	1,5
	3	6,5
	9	2
	15	1
	21	1
Pares	>21	1
	2	2,5
	4	1,5
	6	1
	8	1
	10	1
	12	1
	>12	1

*Fonte:* ANEEL, 2011.

## 1.4 Soft Starter

A chave *soft starter* é um dispositivo eletrônico destinado a de controlar a potência fornecida ao motor no instante da partida, aceleração, funcionamento e frenagem. Uma chave *soft starter* é um módulo eletrônico tiristorizado para partida suave de motores de indução trifásicos do tipo gaiola, como pode ser visto na Figura 2.



**Figura 2: Chaves *Soft Starter* VLT.**

Fonte: drives.danfoss.com.

O módulo substitui as técnicas tradicionais como estrela-triângulo, chave compensadora e autotransformador. A chave *soft starter* faz a transferência gradual de energia para o motor, iniciando suavemente a aceleração do mesmo, reduzindo os trancos e golpes nos componentes mecânicos, evitando picos de corrente e sobrecarga na rede elétrica durante a partida, que auxiliam no aumento da vida útil do motor. Uma comparação entre os métodos de partida, evidenciando os benefícios trazidos pelo *soft starter*, é apresentada na Figura 3.

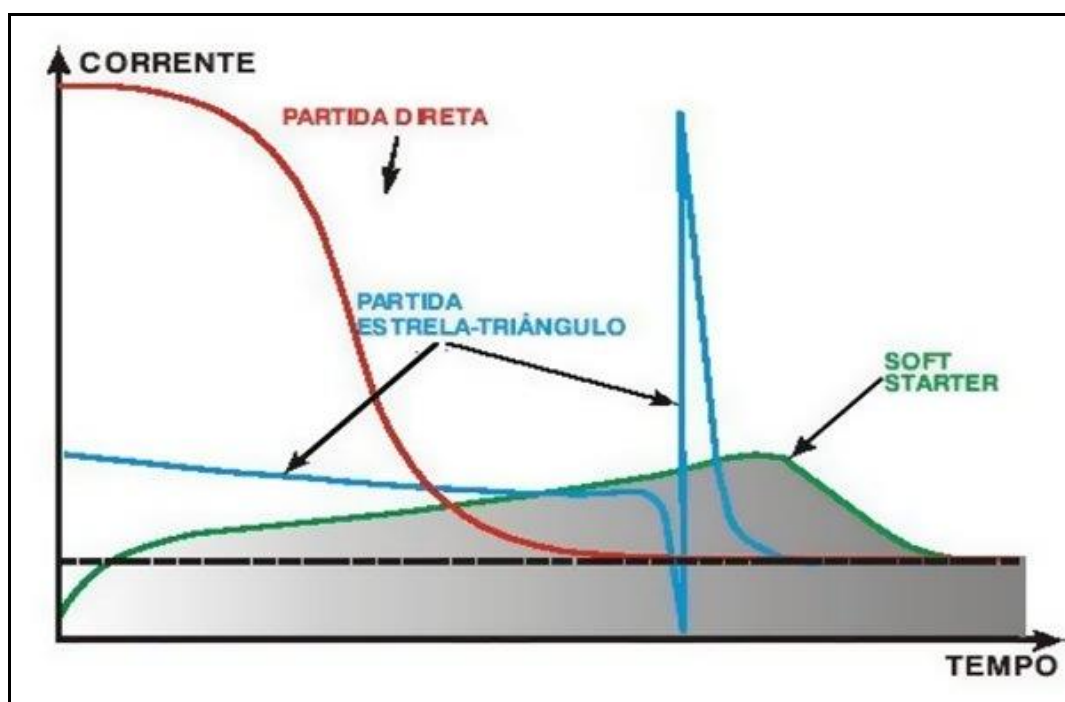


Figura 3: Métodos de partida.

Fonte: [www.mundodaeletrica.com.br](http://www.mundodaeletrica.com.br)

## 1.5 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a Qualidade de Energia Elétrica no tocante dos componentes harmônicos, no sistema de captação de água da Estação de Tratamento de Água (ETA 1) do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa. Os resultados encontrados no ano de 2016 são comparados com o sistema implantado em 2011 e com as medições realizadas em 2017, onde é feito um levantamento da situação atual. De posse das análises é proposto uma melhoria no sistema através de soluções viáveis.

## 2 *Material e Métodos*

Conforme comentado, o estudo foi realizado na central de bombeamento do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa (SAAE), mais especificamente na captação da ETA 1 (Estação de Tratamento de Água 1), situado no campus da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, que tem como manancial o Ribeirão São Bartolomeu, com capacidade de produção diária de 100 litros por segundo, ou 360 m<sup>3</sup>/h. A Figura 4 mostra uma vista parcial do sistema.

No setor de captação ocorre o direcionamento do recuso hídrico para uma das Estações de Tratamento de Água da cidade através do bombeamento da água. Este bombeamento é feito através do conjunto motor-bomba, onde um motor de indução é acionado para realizar o transporte da água.



**Figura 4: Localização da estação de bombeamento no campus da UFV, imagem de satélite.**

Fonte: [www.google.com.br/maps](http://www.google.com.br/maps).

A estação de bombeamento de água é composta por três motores de indução, com partida eletrônica por meio do *soft starter*. No período da primeira medição apenas dois

motores estavam em funcionamento e, na segunda medição, apenas um dos motores entrou em operação. Os dados foram coletados utilizando os equipamentos:

- Multímetros;
- Analisador de qualidade de energia: Fluke 435.

A Tabela 6 mostra os dados de placas dos motores de indução trifásicos de alto rendimento utilizados.

**Tabela 6: Dados das placas dos motores.**

Identificação	Motor 1	Motor 2
Marca	Weg	Siemens
Tipo do motor	Alto rendimento	Alto rendimento
Tipo do rotor	Gaiola de esquilo	Gaiola de esquilo
Potência	132kW/175 CV	73,5kW/100 CV
Tensão	220/380/440 V	220/380/440 V
Corrente	418/242/209 A	235/138/118 A
Frequência	60 Hz	60 Hz
Fator de Potência	0,87	0,86
RPM	1785	1785
Peso	805 kg	460 kg
Rendimento	95,3%	94,5%

Os dados da chave *soft starter* são mostrados na Tabela 7.

**Tabela 7: Definições do *Soft Starter*.**

Identificação	Nominal
Marca	VLT®
Tipo	Trifásico
Modelo	MCD 500
Tensão	110 e 220 VAC
Frequência	60Hz

O sistema de captação do SAAE conta com um banco de capacitores em cada quadro de acionamento dos motores, para corrigir o fator de potência. O Motor 1, de 175 CV, possui

um banco da WEG composto com 50kVAr, o Motor 2 também apresenta um banco de capacitores da WEG, mas com potência de 25kVAr.

As figuras 5 e 6 mostram respectivamente os motores e a parte do quadro de distribuição, ilustrando a chave *soft starter*.



**Figura 5: Sistema de bombeamento de água.**



**Figura 6: Painel de partida dos motores.**



Após a verificação do painel de alimentação dos motores, foram realizadas medições para detectar possíveis distúrbios de energia e harmônicos presentes. Em primeiro lugar foram efetuadas medições de tensão e corrente, em valores eficazes para análise de prováveis desequilíbrios.

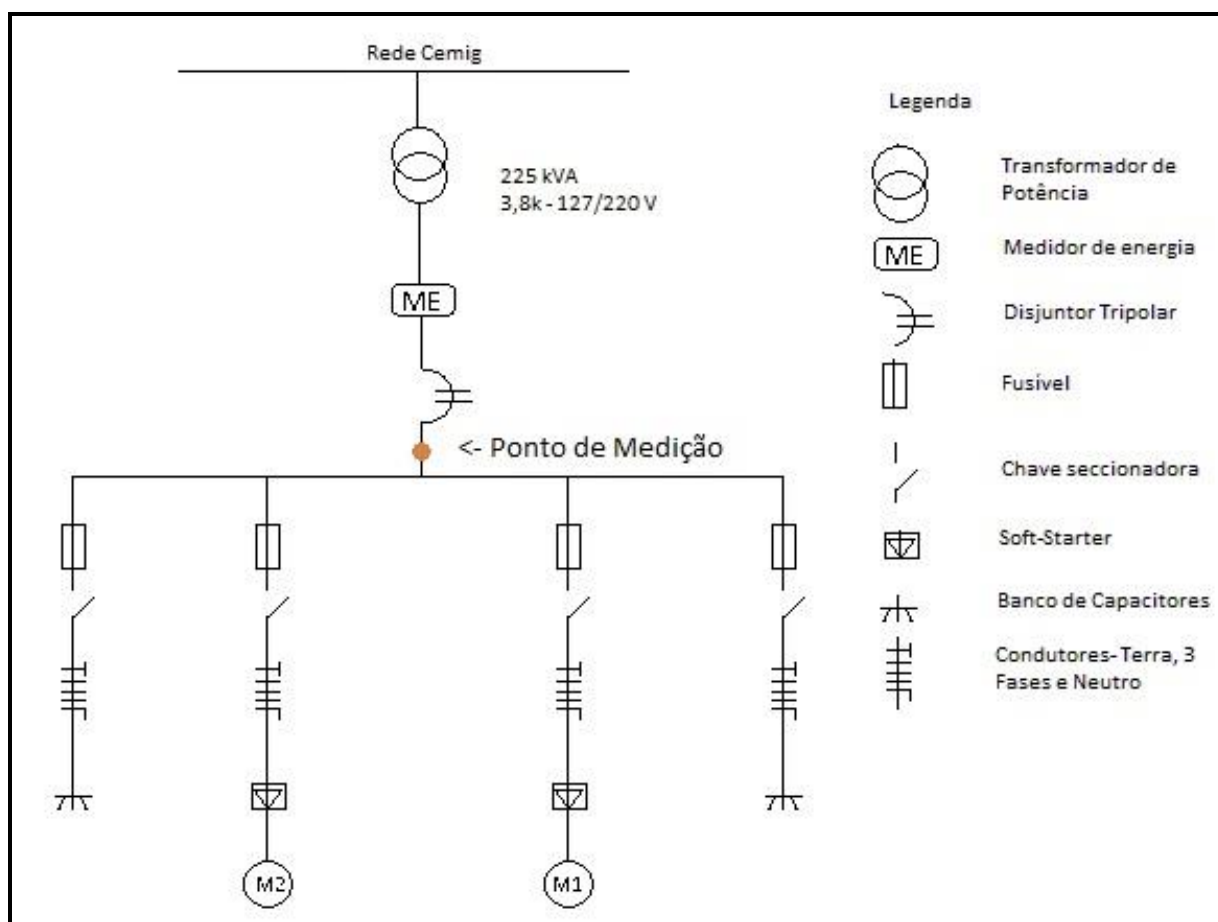
Para isso foram utilizados multímetros e o analisador de qualidade de energia, Fluke 435, conforme mostrado na Figura 7.



**Figura 7: Fluke conectado ao barramento de entrada.**

Este medidor captura os dados de tensão, corrente, harmônicos, frequência e demais variáveis em cada amostragem. A partir desses dados é possível fazer uma avaliação estatística das grandezas envolvidas.

A Figura 8 mostra o diagrama unifilar da instalação e no ponto de medição, ilustrado na figura, o local onde o Fluke foi instalado.



**Figura 8: Diagrama unifilar do sistema de bombeamento.**

As medições foram realizadas seguindo indicações da (ONS, 2011), considerando até a 25ª harmônica para os níveis de distorções harmônicas totais e para a taxa de distorção de demanda, durante sete dias consecutivos.

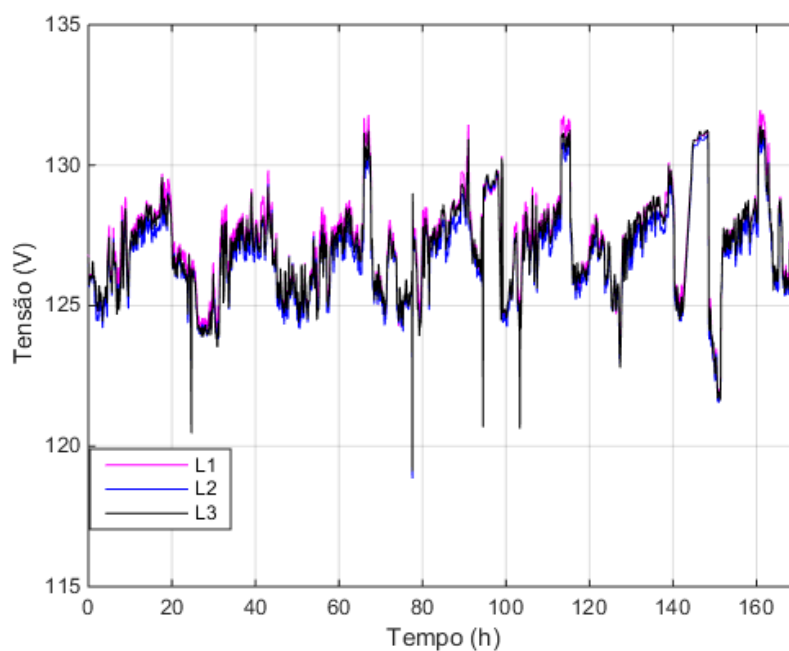
### **3    *Resultados e Discussões***

A partir dos dados obtidos pelo Fluke 435 foram feitas análises das variações na amplitude da tensão e corrente de cada fase, além do monitoramento da distorção harmônica total,  $DHT_v$  e  $DHT_i$  das medições, que foram organizadas da seguinte forma, a primeira medição no sistema de captação, a verificação realizada com a segunda medição no mesmo sistema, a partida do Motor 1 e a partida do Motor 2, apresentadas na sequência do trabalho.

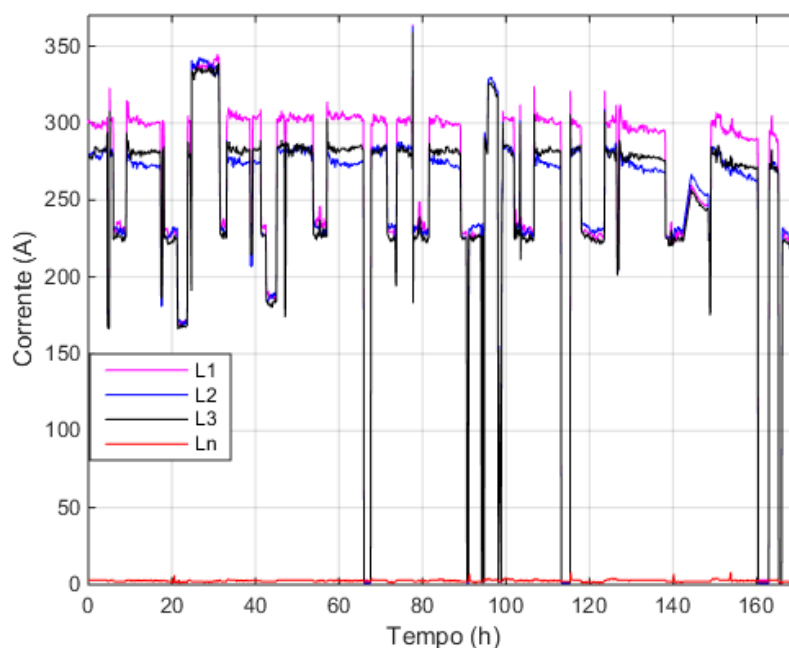
#### **3.1    *Primeira medição no sistema de captação da ETA1***

O equipamento foi instalado no dia onze de abril de 2016, sendo ligado às 11:03 horas, com configuração de tempo de amostragem de 5 (cinco) minutos, a fim de garantir que a medição abrangesse os sete dias determinados. Para uma melhor visualização dos resultados, o início do funcionamento foi considerado como um instante de tempo igual a zero. O equipamento permaneceu ligado até o dia dezoito de abril às 14:18 horas, totalizando 171,25 horas de medição. Esta medição ocorreu um mês antes do período de racionamento em Viçosa, iniciado no dia 17/05/2016.

As formas de onda da tensão e corrente, medidas nos sete dias, de são apresentadas nas Figuras 9 e 10 respectivamente. A Figura 9 mostra as tensões de fase 1, 2 e 3 medidas na rede que alimenta diretamente os motores. Já a Figura 10 traz as correntes de linha dos três condutores, além da corrente do neutro. O sistema do SAAE apresentou fator de potência com valor médio de 0,91 atrasado.



**Figura 9:** Tensão trifásica durante o intervalo de sete dias, medidas diretamente na rede de alimentação dos motores.



**Figura 10:** Corrente trifásica durante o intervalo de sete dias, medidas na rede de alimentação.

Observa-se uma variação nas formas de ondas de tensão e corrente, tendo como máximo de 131,96V e mínimo de 118,65 V para a tensão e máximo de 364A e mínimo de 1A para a corrente. A tensão ficou na média de 127,05V com desvio padrão igual a 1,68V e, a

corrente ficou com média de 254,32A e desvio padrão 65,90A, mostrando que houve grande oscilação entre os valores de corrente.

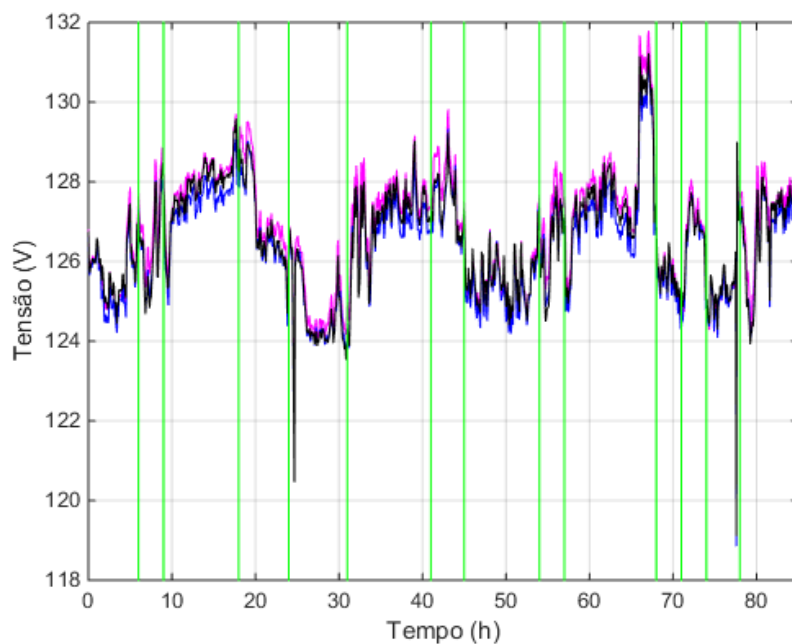
De acordo com (ANEEL, 2010), são estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, avaliando nos pontos de conexão com a rede de distribuição e com as unidades consumidoras. Nas medições do SAAE a variação ocorrida na tensão foi caracterizada como adequada, pois os valores do máximo e mínimo estão dentro da faixa que vai de 116V até 133V, como mostrado na Tabela 1.

Os valores de corrente mais altos e aproximadamente constantes, acima de 280A, indicam os intervalos em que o Motor 1 estava em funcionamento, que possui potência igual a 175CV, valores de corrente próximos a 235A indicam o funcionamento do Motor 2, com potência de 100CV. Essa diferenciação fica melhor descrita através do momento de acionamento de cada motor, desde o instante inicial, como mostrado na Tabela 8.

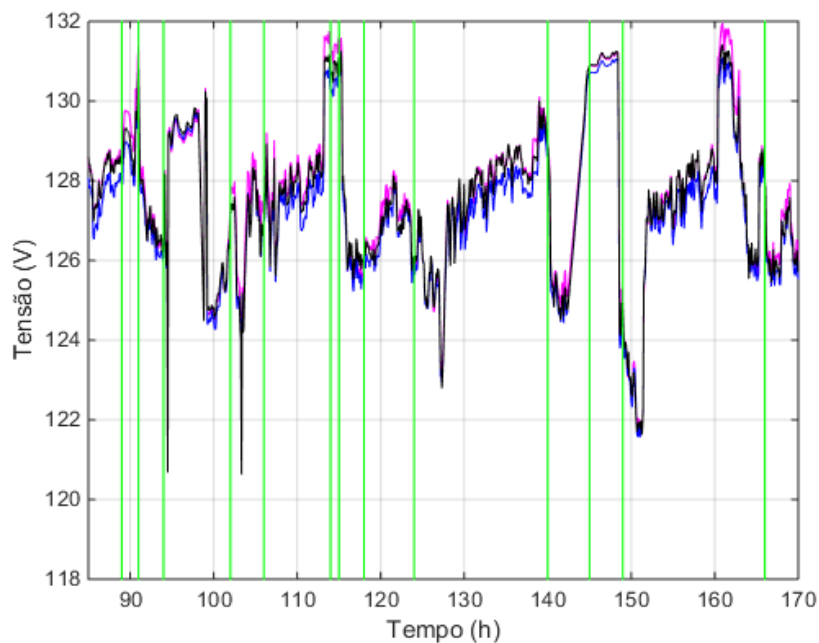
**Tabela 8: Tempo a partir do momento que os motores foram acionados, em horas.**

Data	Motor 1 (h) 175 CV	Motor 2 (h) 100CV
11/04/2016	9	6
12/04/2016	13, 24 e 33	18 e 31
13/04/2016	37, 45 e 57	41 e 54
14/04/2016	61, 68 e 74	71 e 78
15/04/2016	85, 94 e 106	89, 91 e 102
16/04/2016	109, 115 e 124	114 e 118
17/04/2016	133 e 149	145
18/04/2016	157 e 167	166

Os momentos, em horas, dos acionamentos dos motores são marcados nos gráficos da tensão para as primeiras 85 horas de medição e para o restante da medição, conforme as Figuras 11 e 12.



**Figura 11: Momentos de acionamento dos motores nas primeiras 85 horas, mostrados com a tensão.**



**Figura 12: Momentos de acionamento dos motores nas últimas 85 horas, mostrados com a tensão.**

As marcações dos acionamentos dos motores são mostradas nos gráficos de corrente, para as 85 horas iniciais e para o restante da medição, conforme as Figuras 13 e 14 respectivamente.

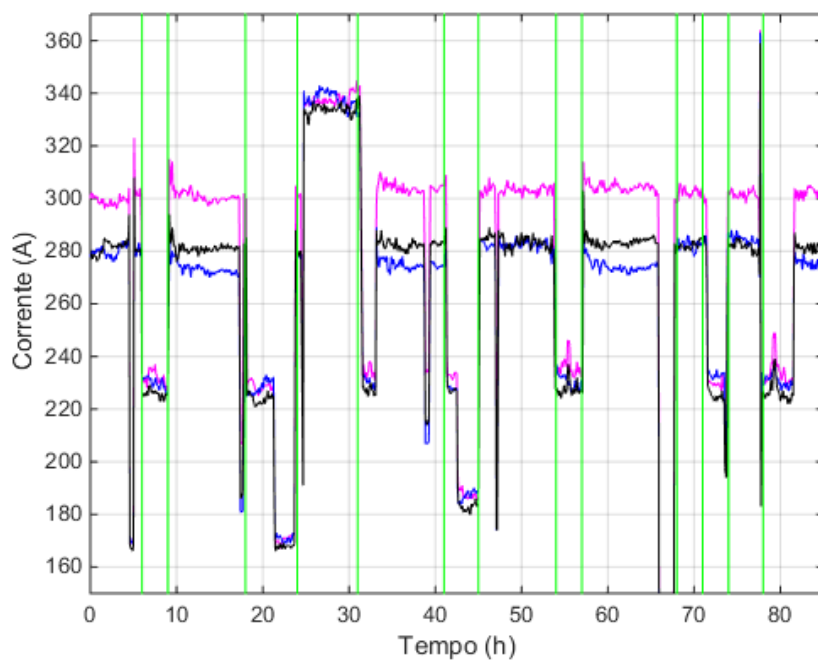


Figura 13: Momentos de acionamento dos motores nas primeiras 85 horas, de acordo com a variação de corrente.

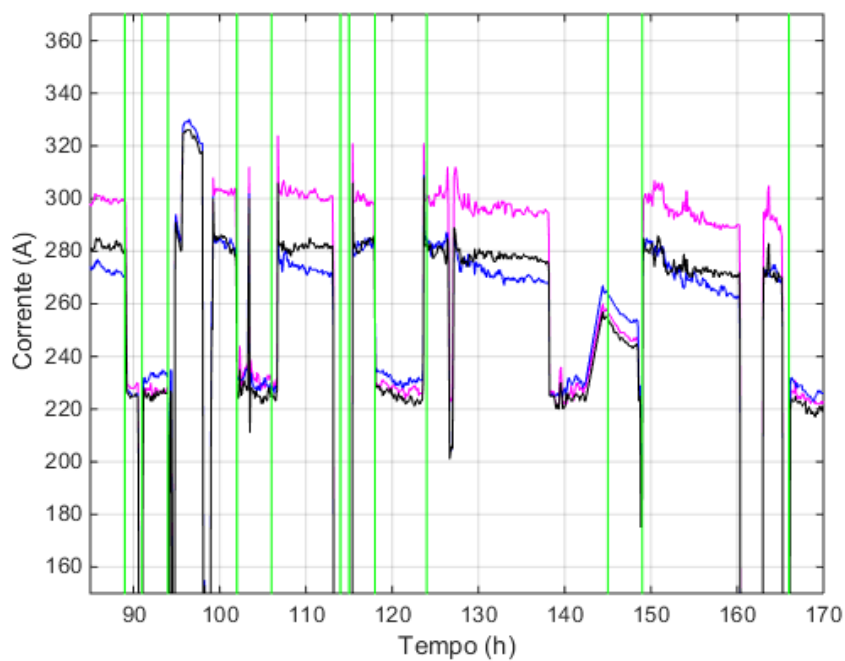


Figura 14: Momentos de acionamento dos motores nas últimas 85 horas, mostrados com a variação da corrente.

As marcações verticais na cor verde representam os momentos de acionamento, ou seja, quando um motor é desligado e o outro acionado, pois estes não funcionam ao mesmo tempo, sendo um procedimento padrão do SAAE. Através das Figuras de 11 a 14 pode-se notar que em muitos casos as maiores oscilações de corrente e tensão coincidem com os momentos onde há troca de carga, alternando o acionamento entre os motores. Além disso, há um desbalanceamento nas fases, sendo que a fase L1 está com valores superiores de tensão e consequentemente de corrente. O caso da corrente é mais visível, pois apresenta em média a diferença de 17A entre a fase L1 e L2, o que corresponde a cerca de 5% de acréscimo em relação a média das correntes das demais fases. Esse desbalanceamento gera correntes excessivas circulando no motor, provocando perdas, elevação de temperatura e consequentemente redução da vida útil (Rezende, 2013).

Além dos dados de tensão e corrente, foram monitorados a variação da potência, da frequência e o DHTv, mostrados, respectivamente, nas Figuras 15, 16 e 17. É apresentada a potência trifásica.

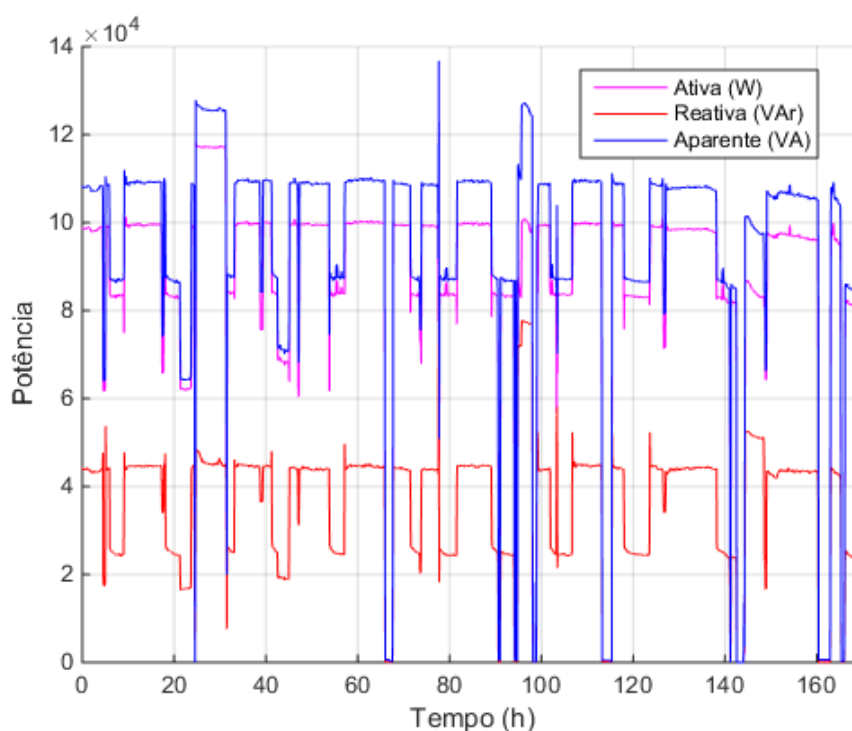


Figura 15: Variação das Potências durante os sete dias.



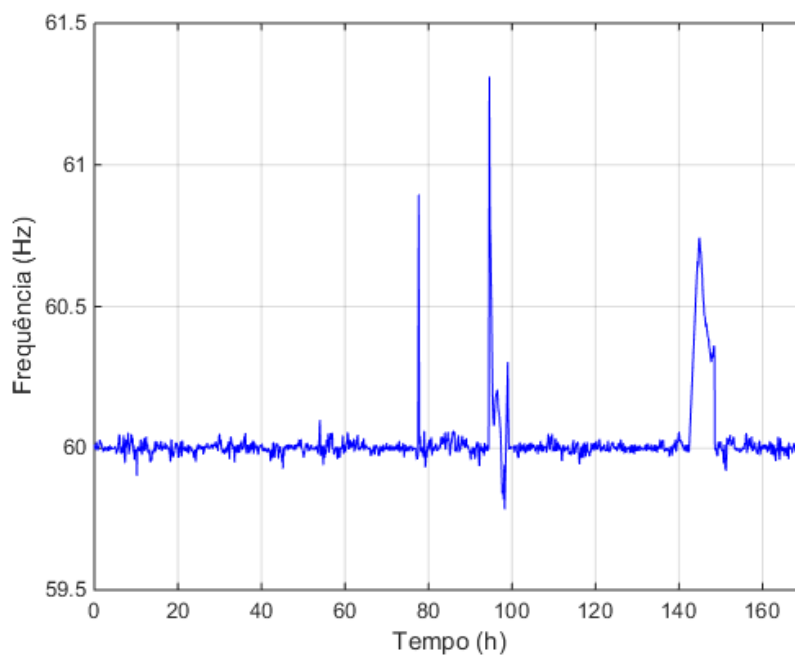


Figura 16: Variação da Frequência

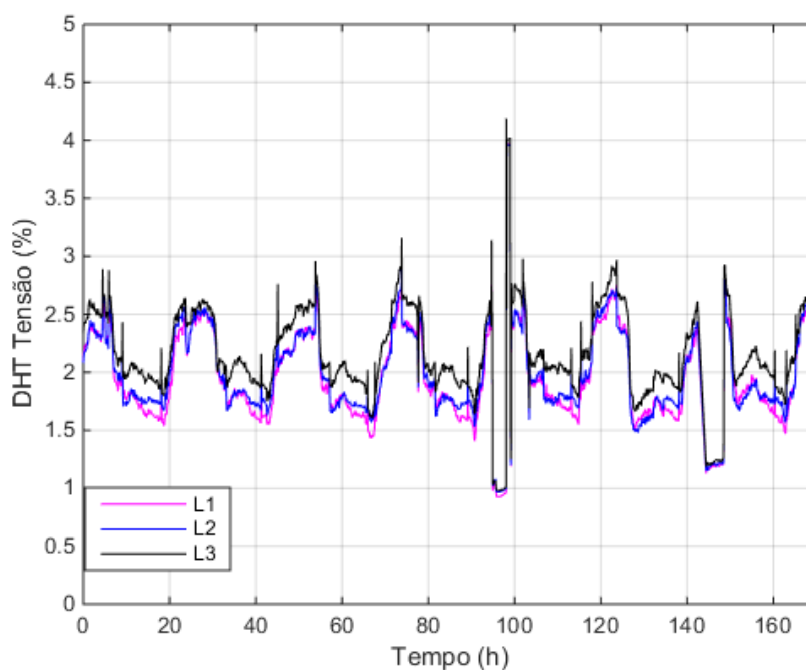


Figura 17: DHT<sub>v</sub> (de tensão) das três fases.

A fim de verificar a coincidência dos momentos de acionamento dos motores e os picos de DHT<sub>v</sub>, são mostrados respectivamente as marcações dos instantes para as primeiras 85 horas e para o restante da medição, nas Figuras 18 e 19 respectivamente.

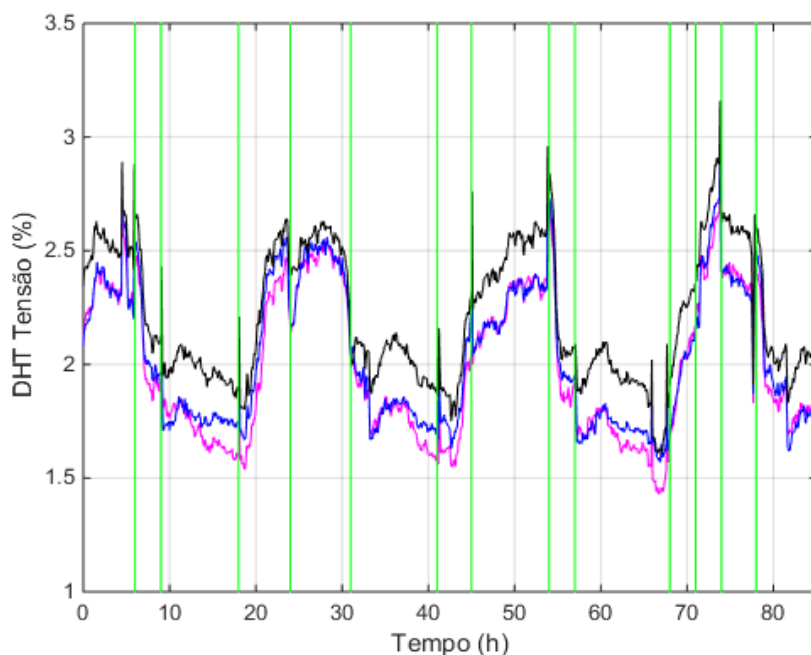


Figura 18: Momentos de acionamento dos motores nas primeiras 85 horas, relacionados com o DHTv.

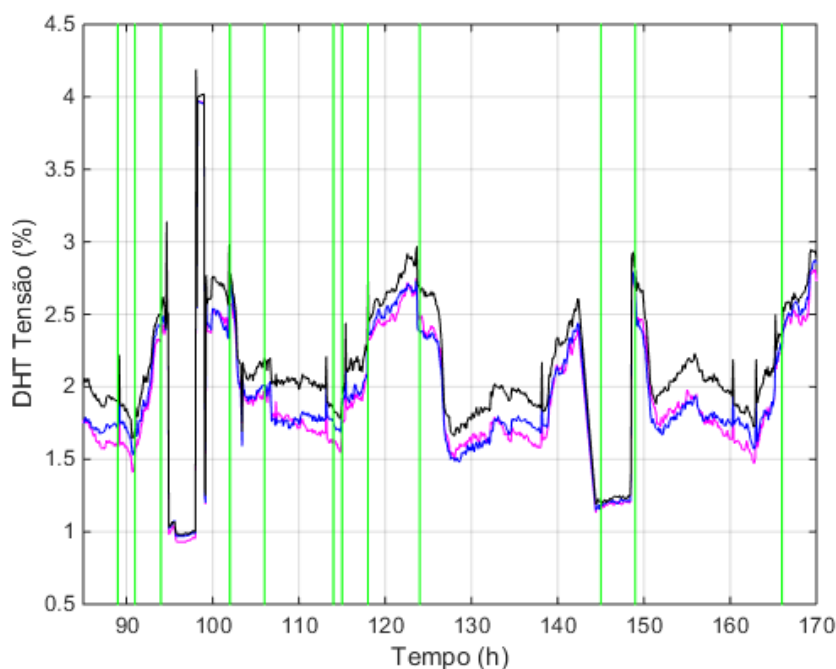


Figura 19: Momentos de acionamento dos motores nas últimas 85 horas, dispostos juntamente com o DHTv.

Também foram analisados os dados de DHT<sub>i</sub>, como mostrado na Figura 20 e, de forma similar, são apresentados os momentos de acionamento dos motores, marcados nos gráficos do DHT<sub>i</sub>, para as 85 horas iniciais e para o restante da medição, respectivamente, nas Figuras 21 e 22.

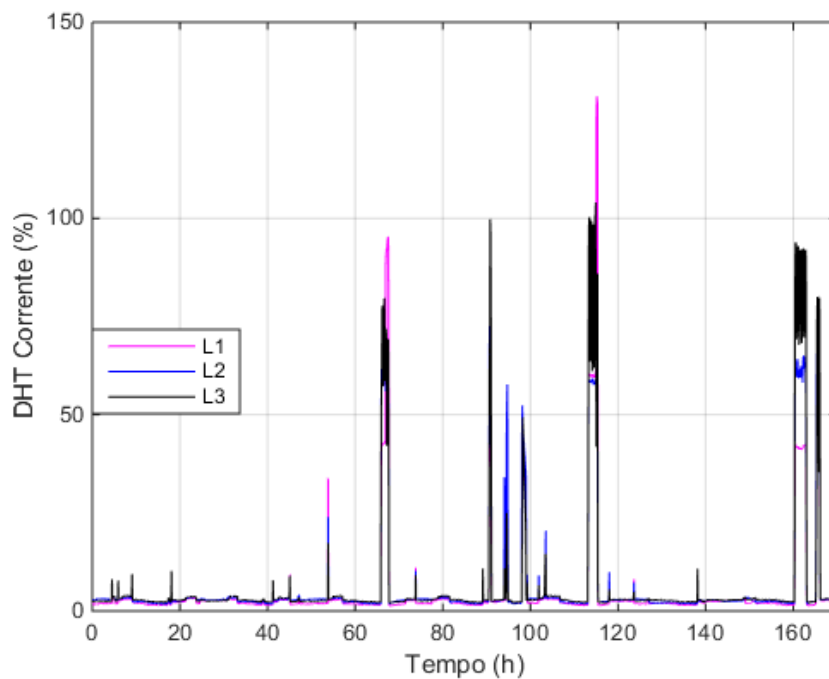


Figura 20: DHTi (de corrente) das três fases.

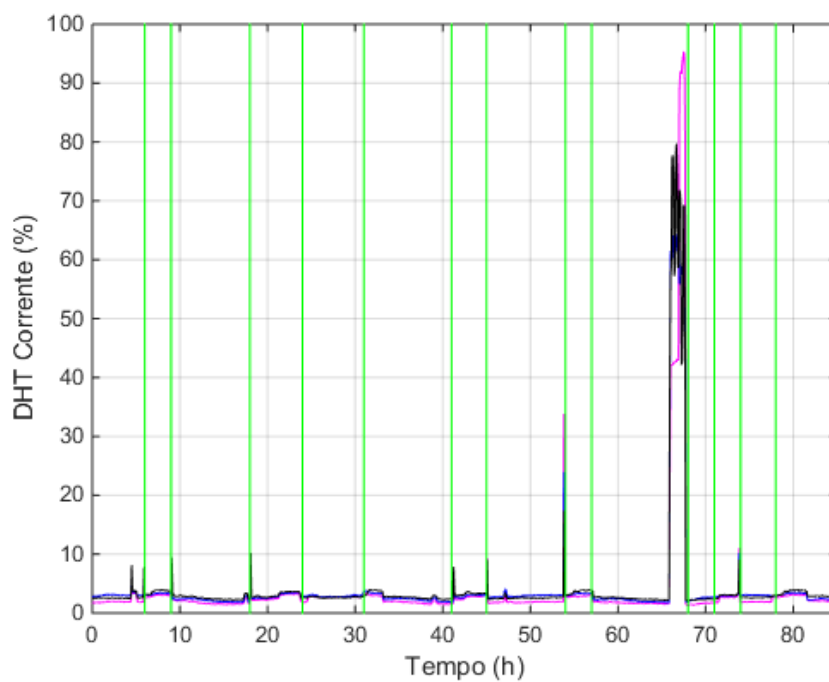
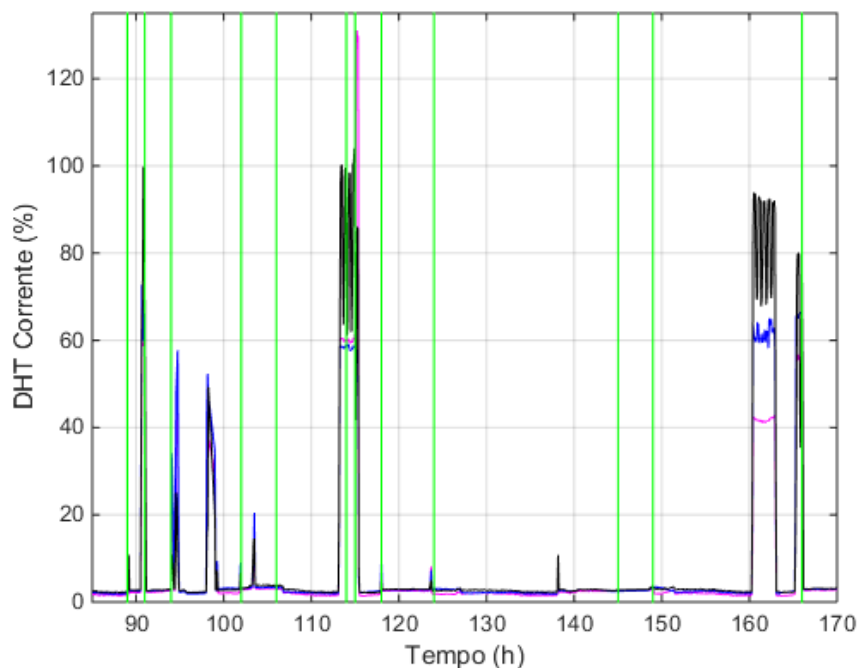


Figura 21: Momentos de acionamento dos motores nas primeiras 85 horas, juntamente com o DHTi.



**Figura 22: Momentos de acionamento dos motores nas últimas 85 horas, mostrados com o DHTi.**

A frequência teve o valor máximo de 61,31Hz e mínimo de 59,78Hz, com média total de 60,02Hz na medição. A (ANEEL, 2010) orienta que a frequência deve permanecer com valores entre 59,9Hz e 60,1Hz para condições normais. Em média o sistema se encontra dentro deste limite, entretanto, em diversos momentos ela supera o valor de 0,5Hz para mais ou para menos que a referência. Essa variação de frequência indica situações com retirada/entrada de cargas grandes ou de um gerador na rede. No sistema do SAAE, comumente o gerador é acionado, de tempos em tempos, realiza-se o teste de funcionamento e a manutenção periódica do mesmo, além de ser acionado quando há algum problema na rede.

O  $DHT_v$  em média teve o valor de 2,03%, variando com o pico de 4,19% e mínimo de 0,93%, com desvio padrão de 0,39%. O  $DHT_i$  teve a média de 5,63%, com máximo de 131,1% e mínimo de 1,36%, apresentando desvio padrão de 13,68%. O valor de desvio padrão baixo como no caso do  $DHT_v$  indica que os dados ficaram próximos da média encontrada, um valor muito grande para o desvio indica que houve muita oscilação, ou seja, a sua medida mostra o quanto essa média pode variar para mais ou para menos.

A análise das distorções é feita baseando nas Tabelas 3 e 4, sabendo que a tensão de referência é 127V e a razão entre a corrente de curto circuito a média da corrente de demanda máxima ( $I_{cc}/I_1$ ) encontra-se na faixa menor que 20.

Tendo como base os limites de distorção harmônica tabelados, as medições indicaram que o sistema não supera o valor máximo para tensão, que seria de 8% para o DHT<sub>v</sub>, sendo que este se encontra com média de 2,03%. O DHT<sub>i</sub> máximo previsto na norma para o caso é de 5%, entretanto, verificou-se a média de 5,63%, que excede o limite estipulado.

De acordo com (MALTA, 2011), a ETA 1 apresentava DHT<sub>v</sub> médio para as três fases de 2,4% e DHT<sub>i</sub> com o motor operando em regime permanente de 2,8%, na situação a vazio o DHT<sub>i</sub> apresenta um valor mais elevado, nesse caso cerca de 5,2%, neste período, o Motor 1 possuía conectado a ele um banco de capacitores de 40kVAr e o Motor 2 um de 15kVAr. Esses dados foram obtidos por medições da partida e em regime permanente de motores acionados com *soft starter* na ETA 1 no ano de 2011. Nesta época, o acionamento não era exclusivamente via *soft starter*, mas outros métodos como chave compensadora e estrela-triângulo. As medições realizadas por (MALTA, 2011) tiveram duração de aproximadamente dez minutos cada, colhendo dados desde partida até o regime permanente, mas as comparações realizadas se basearam apenas nas medições do regime permanente, que são condizentes com o estudo desenvolvido neste trabalho. Atualmente, com o sistema da ETA 1 reformulado, todos os motores passaram a ser acionados através de *soft starter*, o que provocou melhorias na partida das máquinas, entretanto, houve um aumento da DHT<sub>i</sub>.

### **3.2 Segunda medição no sistema de captação da ETA1**

Como validação dos dados encontrados, foi realizada uma nova medição na captação da ETA1 do SAAE de Viçosa. A segunda medição teve início no dia dois de janeiro de 2017 às quatorze horas e término no dia dez de janeiro de 2017 às oito horas da manhã. Neste intervalo ocorreu o funcionamento apenas do Motor 2, de 100 CV, caracterizado na Tabela 6. Os momentos de acionamento do motor são mostrados na Tabela 9, tendo como referência o tempo zero como o horário que o Fluke foi ligado. A amostragem foi definida novamente em 5 minutos, pois era o único intervalo que possibilitava a medição por mais de sete dias. Os resultados das tensões e correntes podem ser vistos respectivamente na Figura 23 e 24, já as potências por fase podem ser vistas na Figura 25.

Tabela 9: Momento de acionamento do motor na segunda medição.

Data	Motor 2 (h) 100CV	
	Desligado	Ligado
02/01/2017	-	-
03/01/2017	16	17
04/01/2017	40	42
05/01/2017	-	-
06/01/2017	88	90
07/01/2017	112	113
08/01/2017	-	-
09/01/2017	157	160
10/01/2017	-	-

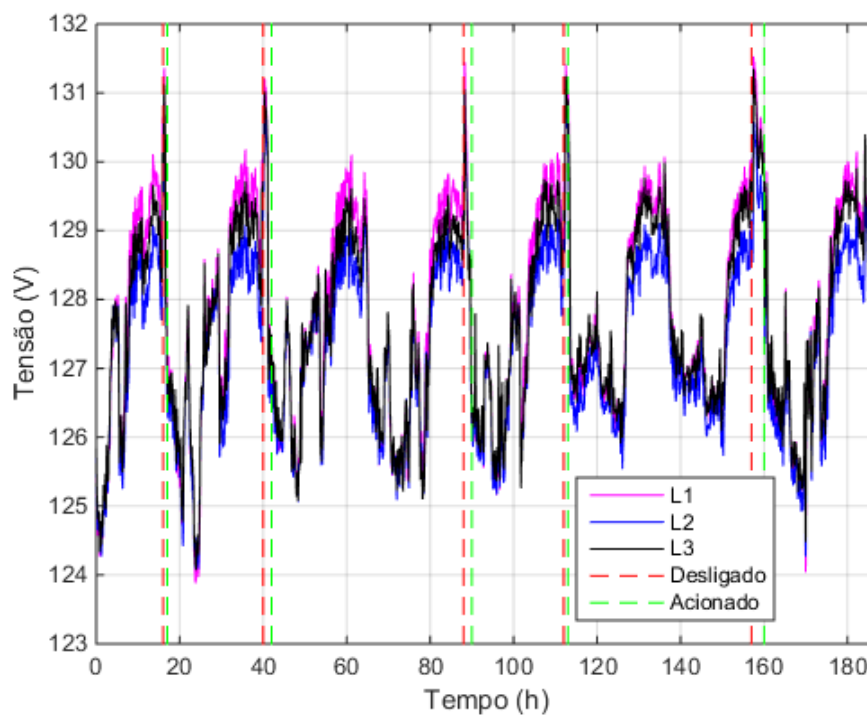


Figura 23: Tensões durante a segunda medição no sistema de captação do SAAE.

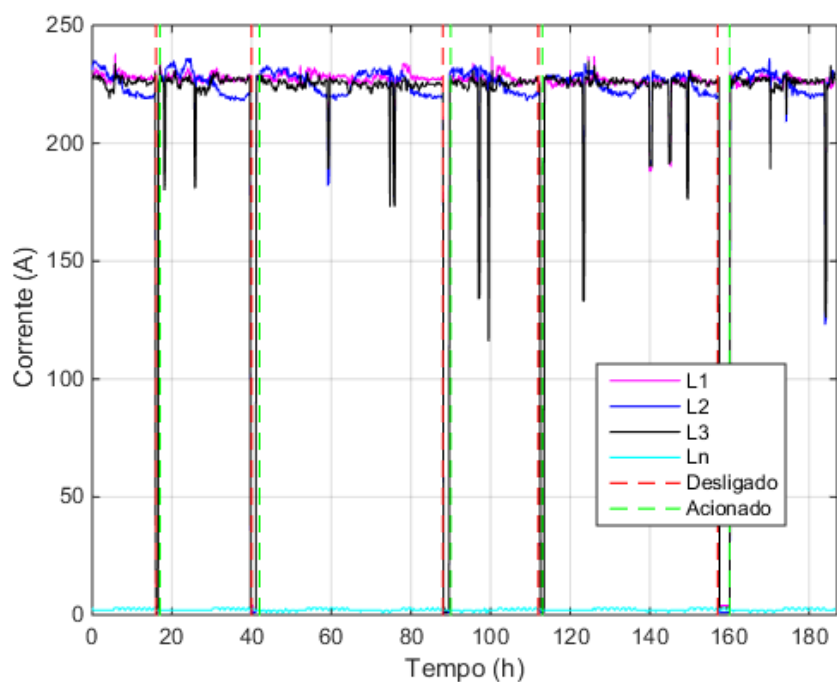


Figura 24: Correntes durante a segunda medição no sistema de captação do SAAE.

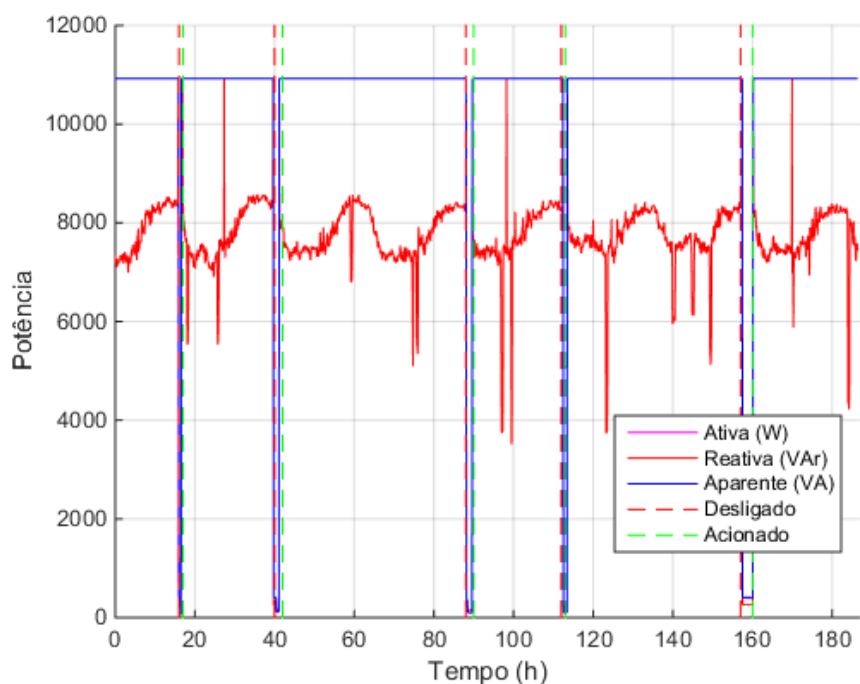


Figura 25: Potência durante a segunda medição no sistema de captação do SAAE.

Seguiu-se o mesmo procedimento anterior, tomando o tempo de início da medição como zero e realizando o somatório de horas a partir de então. Durante a medição, a tensão apresentou o valor máximo de 131,53V e mínimo de 123,88V, o que caracteriza o nível de tensão como adequado, de acordo com a Tabela 1. A corrente máxima foi de 238A e a

mínima ficou próxima de zero, momentos onde a carga foi desligada. A potência ativa apresentou o valor próximo a 11kW por fase com fator de potência total de 0,94. Para as figuras, foram marcados os momentos que o motor foi desligado e os momentos de acionamento com traçados verticais nas cores vermelha e verde respectivamente, em algumas ocasiões a seguir, as figuras não tiveram essa marcação para evitar o conflito de linhas e cores.

O estudo dos harmônicos realizado é mostrado de acordo com cada índice, sendo mostrado o DHTv na Figura 26, o DHTi nas Figuras 27 e 28, as harmônicas individuais de tensão da fase L1 na Figura 29 e as harmônicas individuais de corrente da fase L1 nas Figuras 30 e 31.

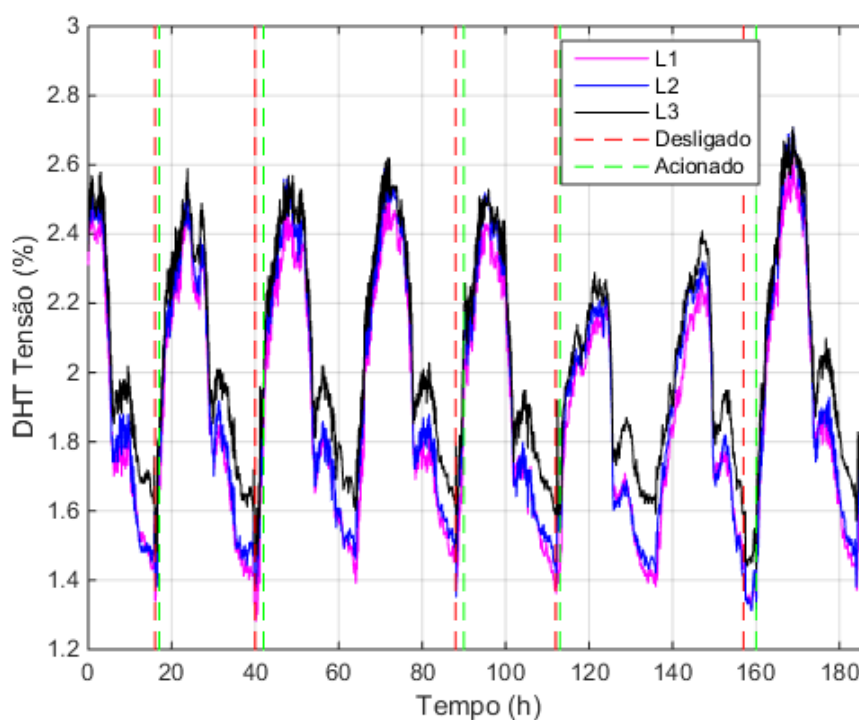


Figura 26: DHTv da segunda medição na captação do SAAE.



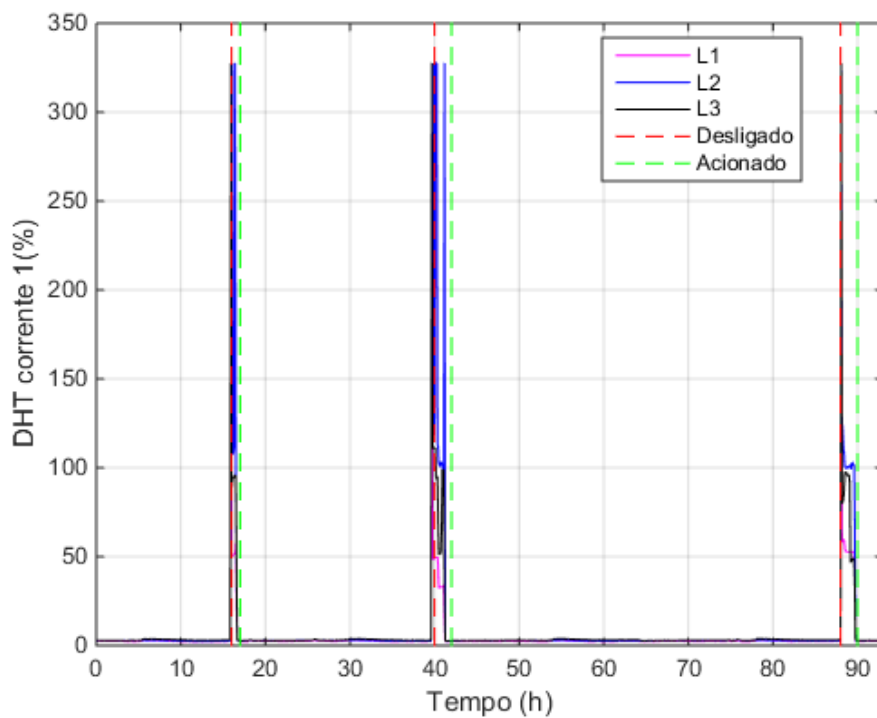


Figura 27: DHTi da segunda medição na captação do SAAE, do momento zero até a hora 93.

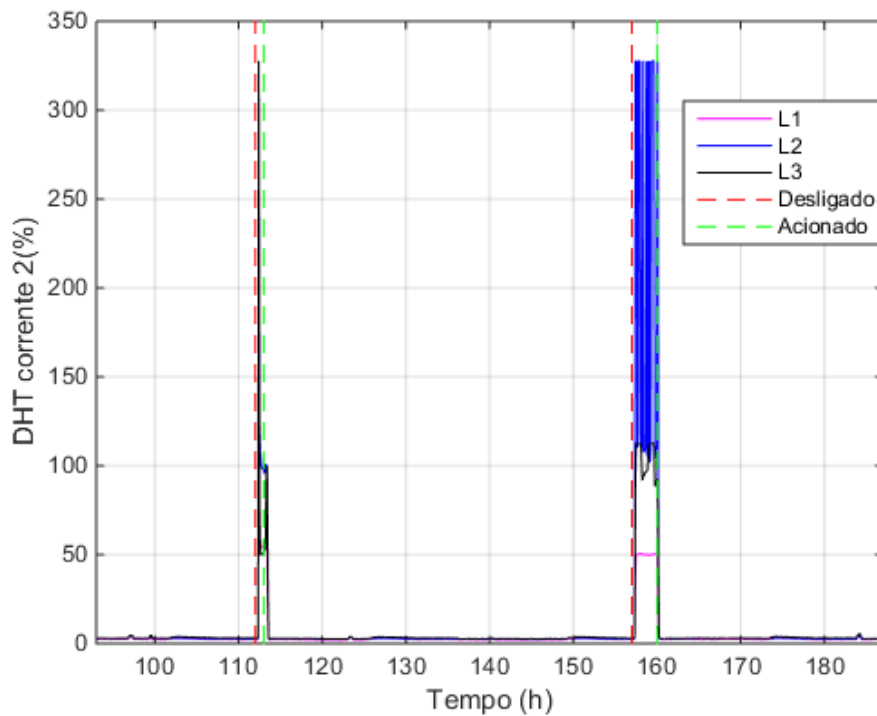


Figura 28: DHTi da segunda medição na captação do SAAE, da hora 93 até o final da medição.

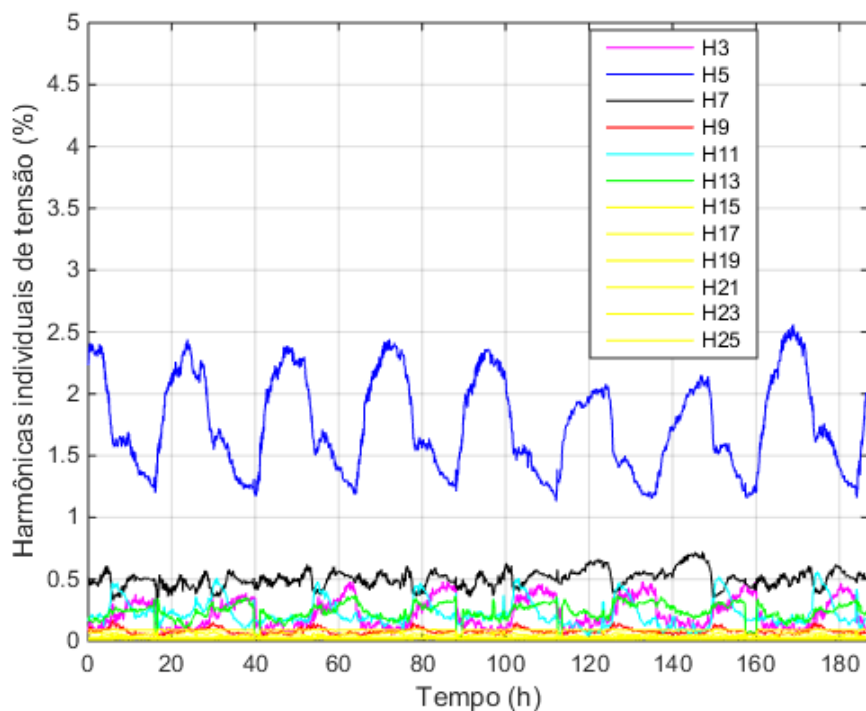


Figura 29: Harmônicas individuais de tensão da segunda medição na captação do SAAE.

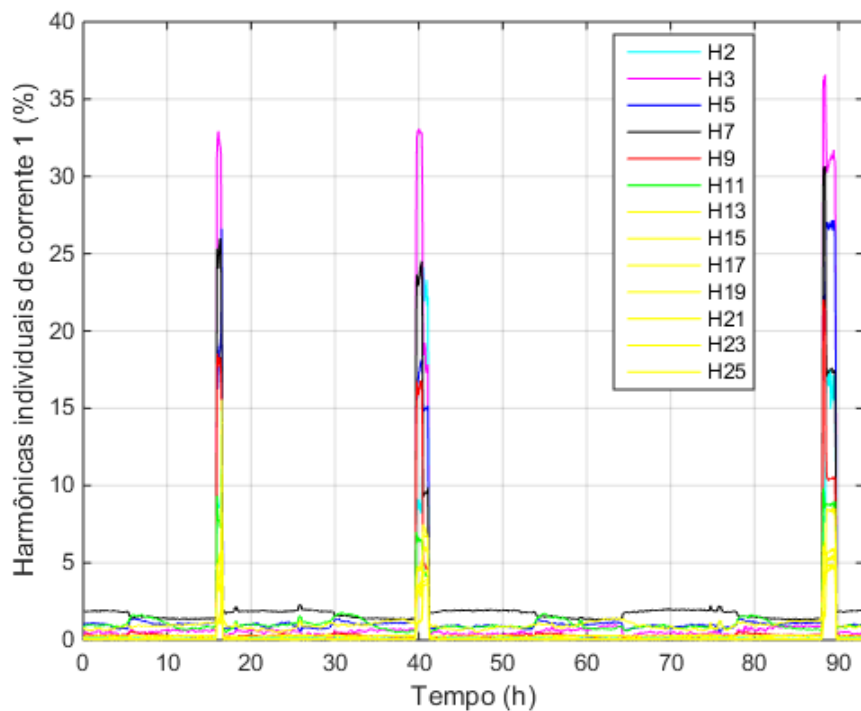
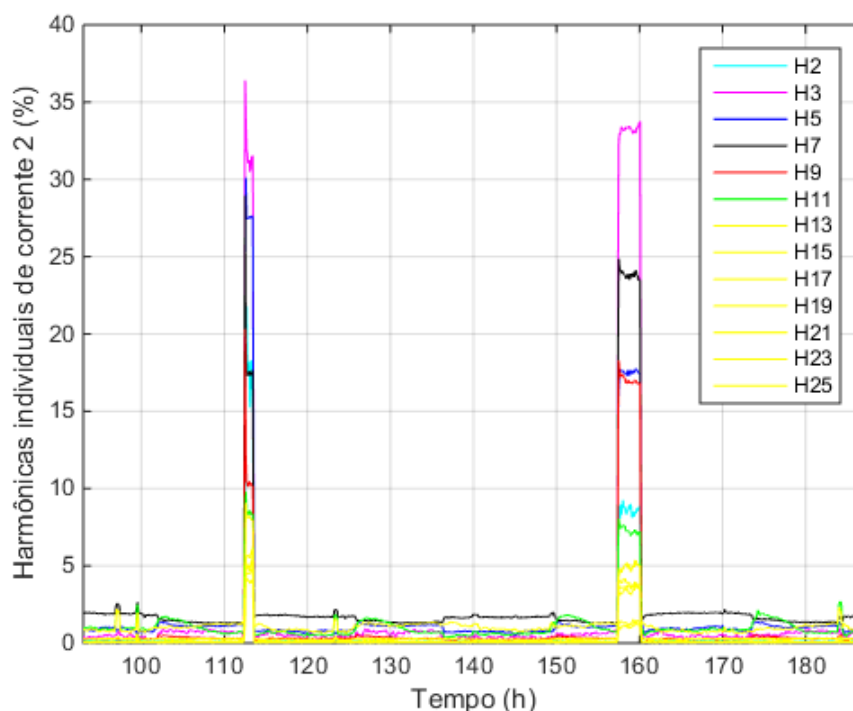


Figura 30: Harmônicas individuais de corrente da segunda medição na captação do SAAE, do momento zero até a hora 93.



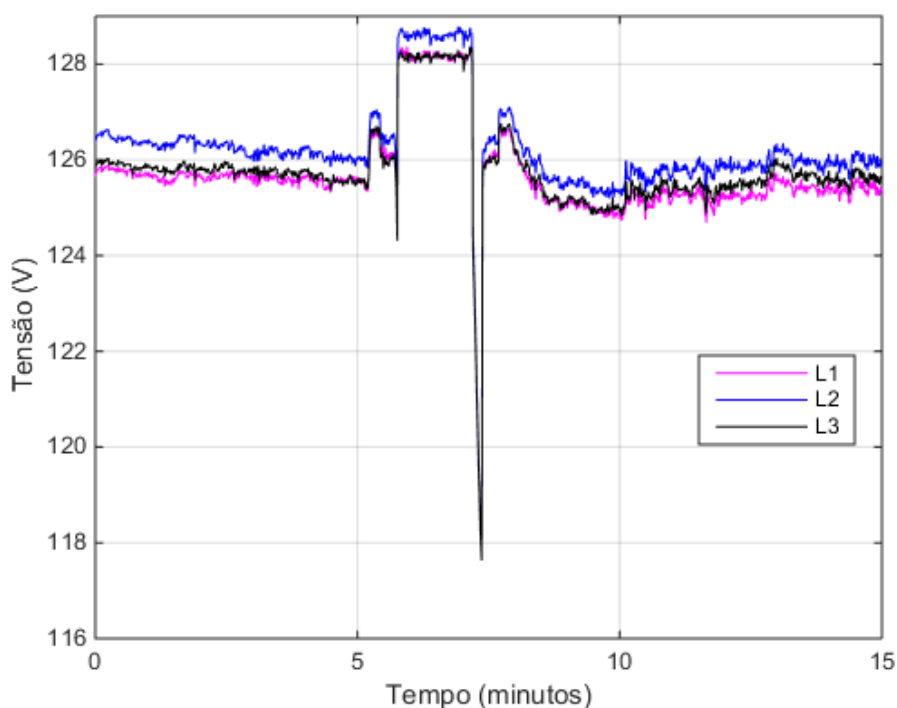
**Figura 31: Harmônicas individuais de corrente da segunda medição na captação do SAAE, da hora 93 até o final.**

O DHTv apresentou média de 1,95%, ficando dentro dos limites estabelecidos na Tabela 3, embora variou de 1,28% até 2,71%. O DHTi teve o mínimo igual a 2,05% e máximo de 327,67% e, apresentou média de 7,27%, valor acima do estabelecido na Tabela 4, que é de 5%. O DHTi apresentou uma média alta por influência dos picos presentes na medição, alguns destes ultrapassaram o índice de 300%, mas de modo geral, se manteve com valor abaixo de 5%, estabelecido pelo (IEEE 519, 2014). Verificando mais detalhadamente o sistema, verificamos que as harmônicas individuais de tensão mais influentes são a 5°, 7°, 3°, 11° e 13° respectivamente, mas todas apresentaram índices abaixo dos estabelecidos, conforme especificações da Tabela 5, já as harmônicas individuais de corrente mais influentes são a 3°, 7°, 5°, 9° e 2° respectivamente.

### 3.3 Medições da partida do Motor 1

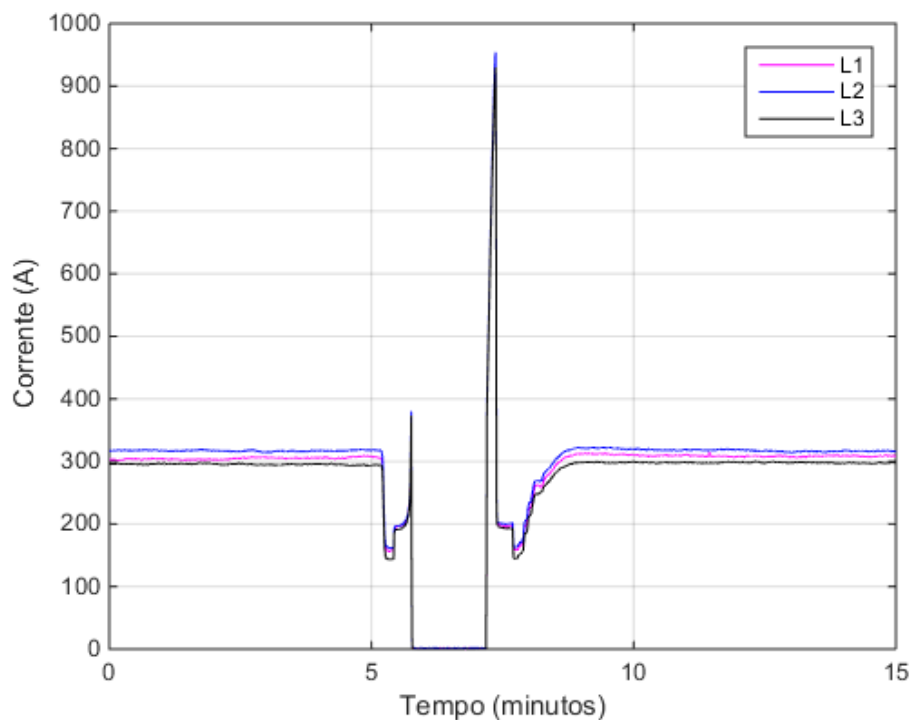
Como complemento das medições um e dois realizadas no sistema de captação do SAAE, foram obtidos os dados da partida de cada motor. A medição apresentada para o Motor 1 foi efetivada por (MALTA, 2011), pois o SAAE estava sendo submetido à algumas correções na ETA1 no período que as medições estavam sendo realizadas, o que impediu o

acionamento do Motor 1 na mesma data quando foi realizada o ensaio do Motor 2. O ensaio contou com as tensões e correntes das três fases em condições normais de funcionamento do motor, como pode ser encontrado nas Figuras 32 e 33 respectivamente. O Fluke foi ligado quando o motor funcionava em regime permanente, em seguida o motor foi desligado, aguardando por alguns minutos e religado, para que verificasse a partida deste. A medição foi realizada no dia 21/09/2011, iniciando às 9:25 horas e sendo encerrada às 9:45 horas, com tempo de amostragem de 0,5 segundos, o menor apresentado pelo Fluke, que permite visualizar melhor o aspecto das oscilações.



**Figura 32: Tensões na partida do motor 1, de 175CV.**

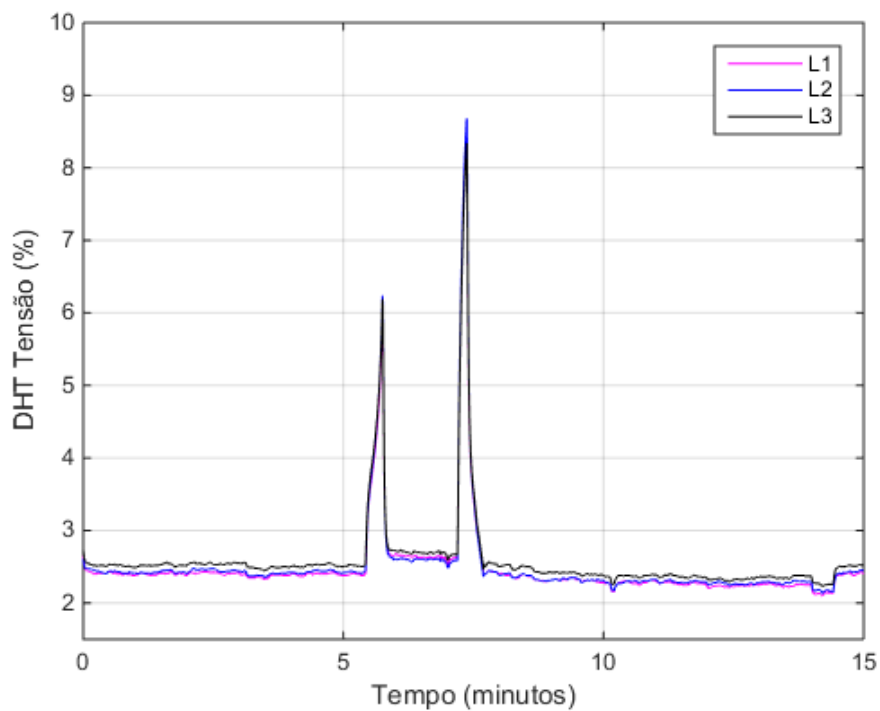
Fonte: MALTA, 2011.



**Figura 33: Correntes na partida do motor 1, de 175CV.**

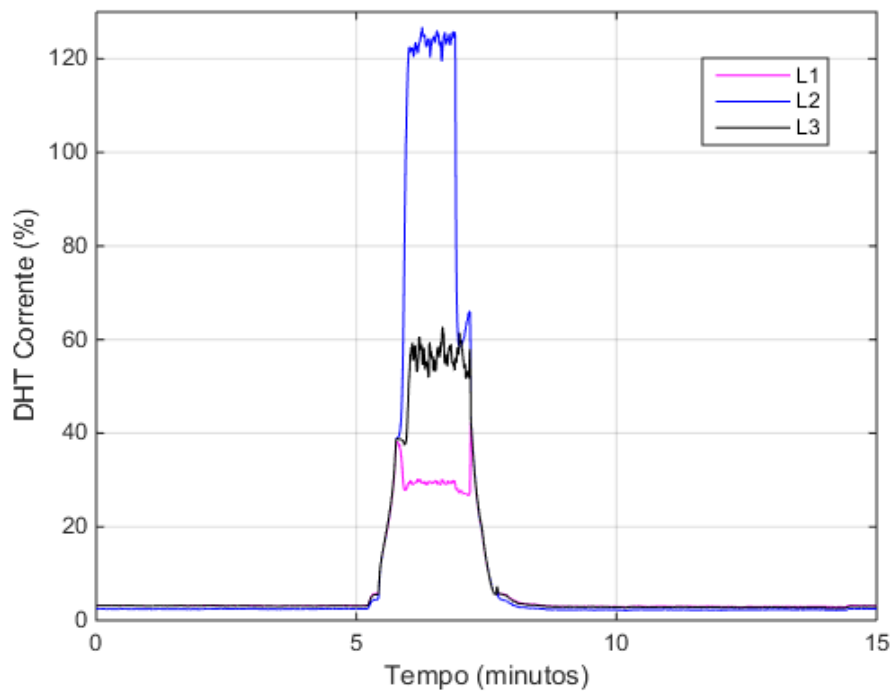
Fonte: MALTA, 2011.

A partida foi realizada no sétimo minuto de medição, onde pode-se notar uma queda brusca nas tensões e um pico nos valores de corrente. A corrente atingiu o máximo de 954A no momento do acionamento do motor, mas este valor perdurou por apenas alguns segundos. A fase dois se apresenta com valores superiores aos demais para a tensão, mas corresponde a menos que 1% de desbalanceamento, ocasionando pouco mais de 3% de diferença entre a fase com maior corrente e a média dos valores de corrente. Os índices de  $DHT_v$ ,  $DHT_i$ , as harmônicas individuais de tensão da fase L1 e as harmônicas individuais de corrente da fase L1 são vistos nas Figuras 34, 35, 36 e 37 respectivamente.



**Figura 34: DHTv na partida do motor 1, de 175 CV.**

Fonte: MALTA, 2011.



**Figura 35: DHTi na partida do motor 1, de 175 CV.**

Fonte: MALTA, 2011.

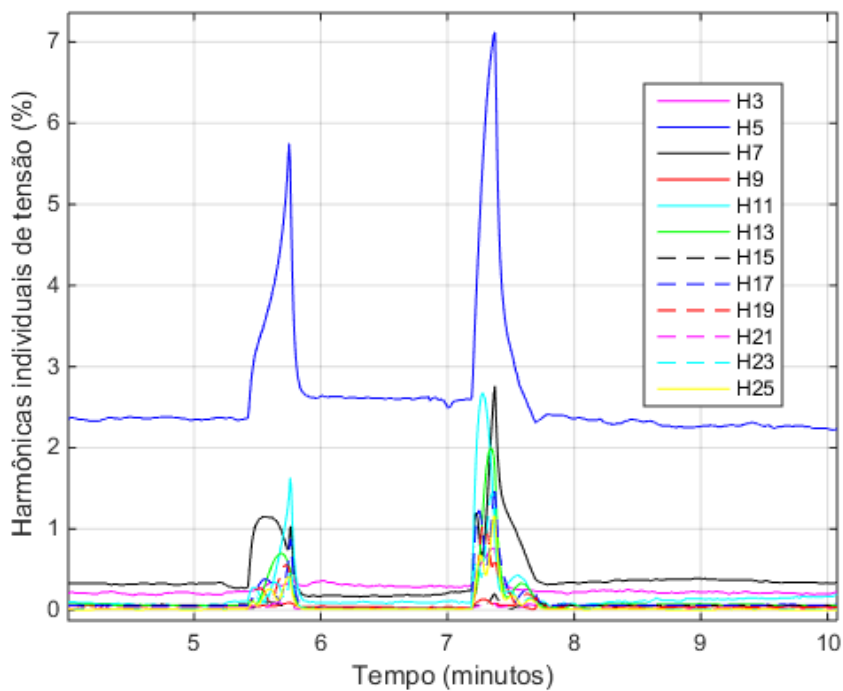


Figura 36: Harmônicas individuais de tensão na partida do motor 1, de 175 CV.

Fonte: MALTA, 2011.

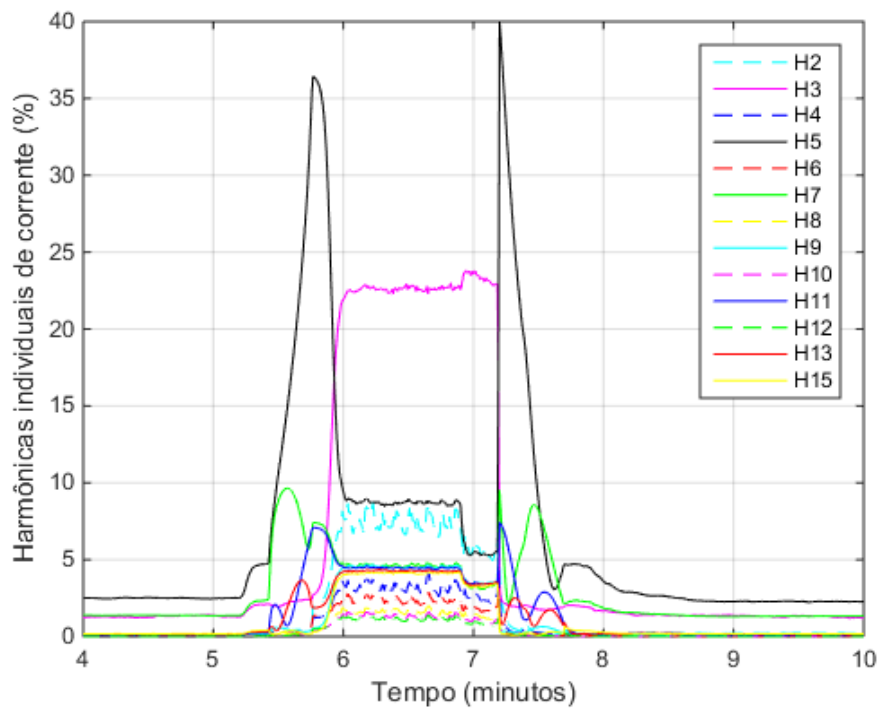


Figura 37: Harmônicas individuais de corrente na partida do motor 1, de 175 CV.

Fonte: MALTA, 2011.

O DHTv apresentou o mínimo de 2,1% e máximo igual a 8,68%. O DHTi variou de 2,13% até 126,74%. Ambos os valores extremos de distorção harmônica ocorreram na fase L2, que apresentou o nível de tensão superior as demais. Os valores máximos dos índices de distorção harmônica total ocorreram no momento em que o motor foi acionado. Analisando as harmônicas individuais, tem-se para a tensão uma influência maior da 5<sup>o</sup>, 7<sup>o</sup>, 11<sup>o</sup> e 13<sup>o</sup> harmônicas respectivamente, e para a corrente, a ordem de maior influência é a 5<sup>o</sup>, 3<sup>o</sup>, 7<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup> e 3<sup>o</sup> harmônicas. Embora assumam um valor elevado no momento de acionamento do motor, as harmônicas apresentam índices baixos em regime permanente e, as harmônicas de tensão permanecem abaixo dos índices apresentados na Tabela 5.

### 3.4 Medições da partida do Motor 2

A partida do Motor 2 foi realizada no dia 11/01/2017 às 8:26 da manhã, com o Fluke sendo ligado quando o motor estava em regime permanente e desligando-o, logo em seguida o motor é religado e o Fluke consegue pegar o momento da partida do motor, sendo encerrada a medição às 8:42 da manhã. O tempo de amostragem utilizado foi de 0,5 segundos, o menor disponível pelo Fluke. As tensões e correntes para o Motor 2, de 100 CV podem ser vistas nas Figuras 38 e 39 respectivamente.

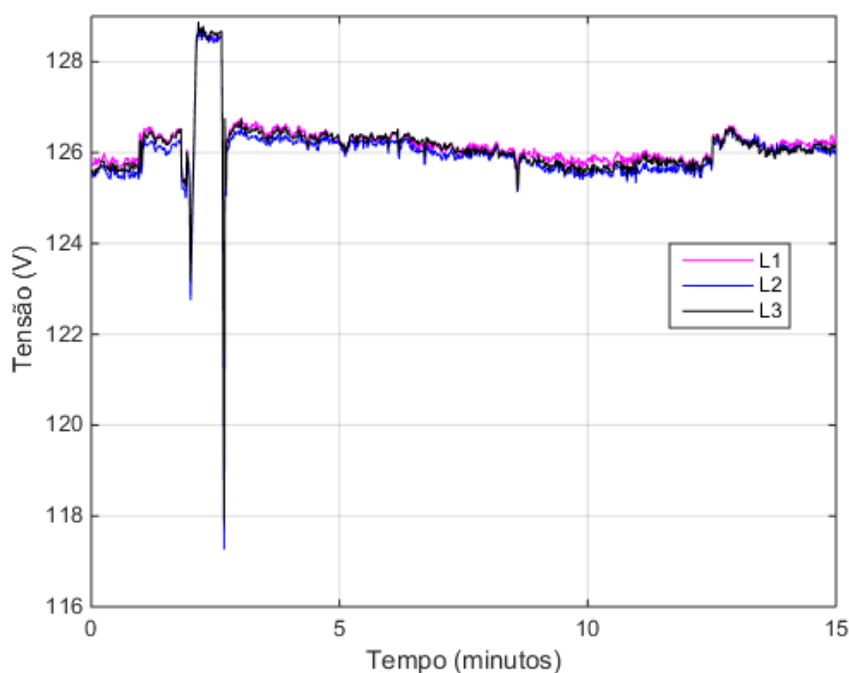
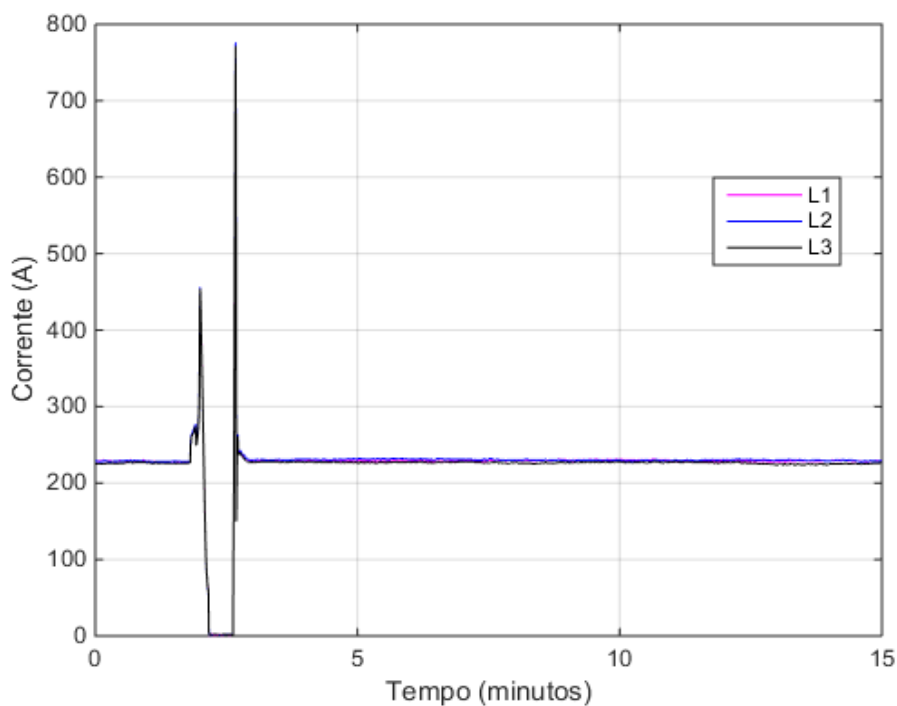


Figura 38: Tensões na partida do motor 2, de 100CV.





**Figura 39: Correntes na partida do motor 2, de 100CV.**

A tensão variou de 127,26V até 128,88V, com o valor mínimo ocorrendo no momento da partida do Motor 2, um pouco antes do terceiro minuto de medição. A corrente apresentou máximo de 776A, também no acionamento do Motor 2 e, valor mínimo próximo a zero, quando o motor havia sido desligado.

Os índices de DHT<sub>v</sub>, DHT<sub>i</sub>, as harmônicas individuais de tensão do condutor L1 e as harmônicas individuais de corrente do condutor L1 são apresentados nas Figuras 40, 41, 42 e 43 respectivamente.

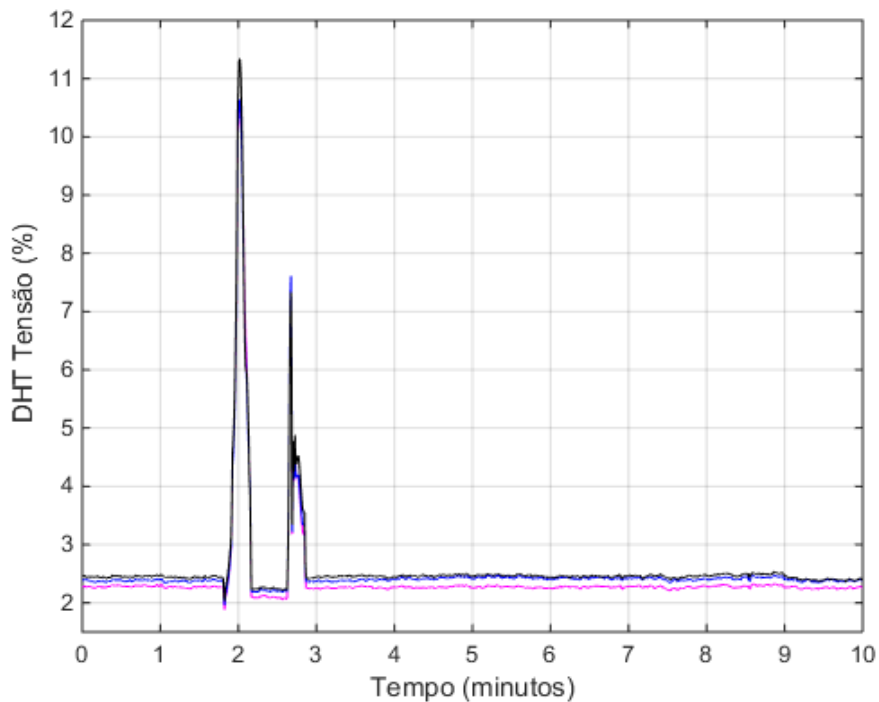


Figura 40: DHTv na partida do motor 2, de 100 CV.

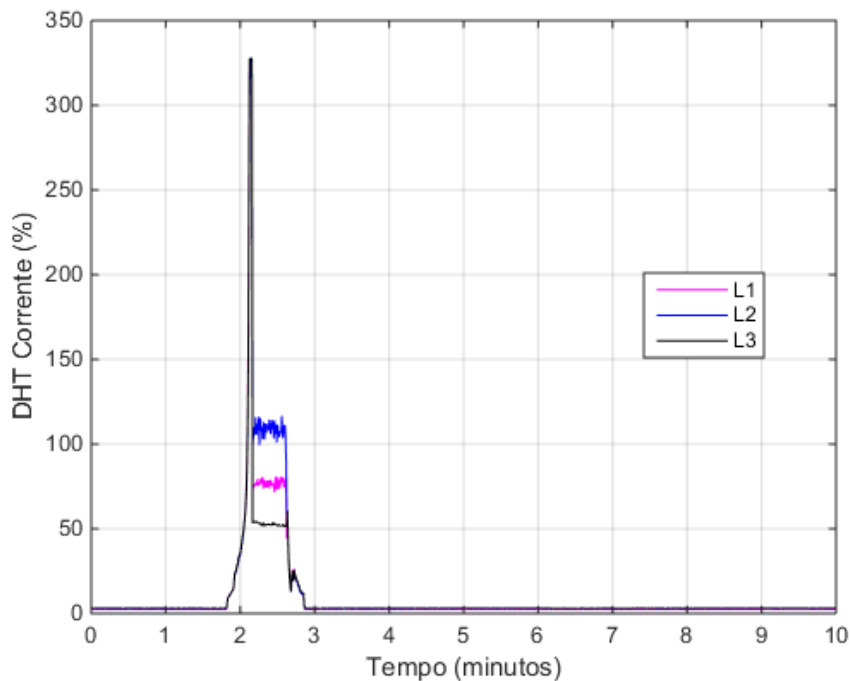


Figura 41: DHTi na partida do motor 2, de 100 CV.

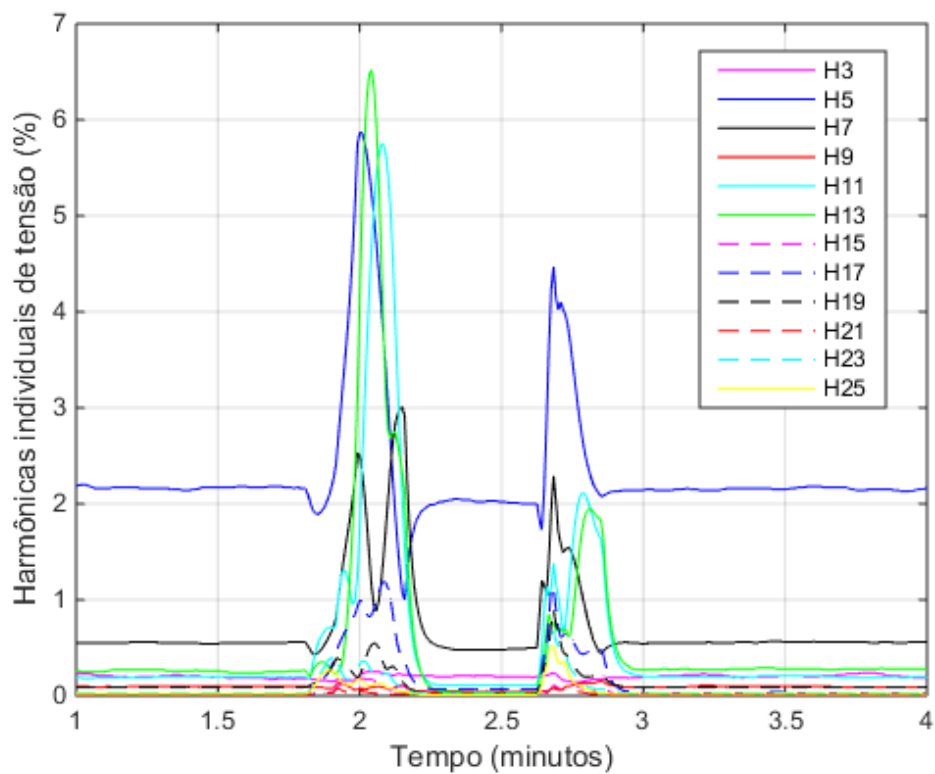


Figura 42: Harmônicas individuais de tensão na partida do motor 2, de 100 CV.

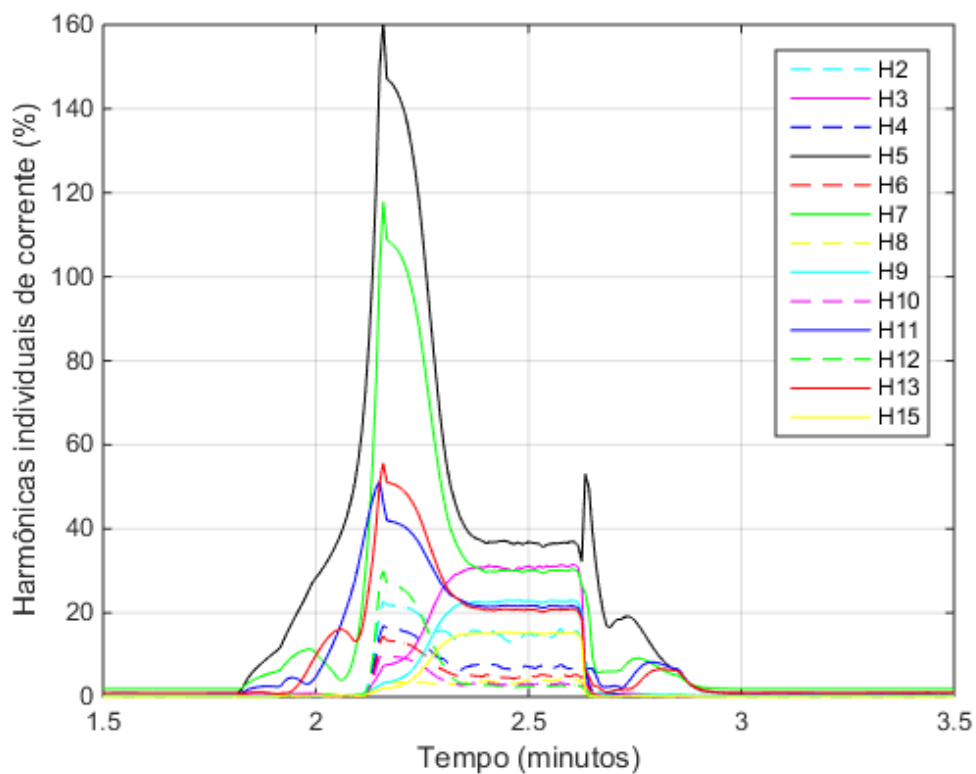


Figura 43: Harmônicas individuais de corrente na partida do motor 2, de 100 CV.

Os maiores picos do DHTv e DHTi ocorreram quando o Motor 2 foi desligado, diferentemente da partida do Motor 1, pode-se notar que o botão para desligar o Motor 2 é acionado e, por operação dos componentes do quadro de acionamento, há um aumento na corrente e alguns segundos após realmente ocorre o desligamento. O DHTv teve mínimo de 1,88% e máximo de 11,34%, já o DHTi variou de 2,38% até 327,67%. Em regime permanente ambos os índices apresentam valores abaixo dos determinados nas Tabelas 3 e 4. Analisando as harmônicas de forma individual, encontramos como maior predomínio para a tensão a 5°, 11°, 13° e 7° harmônicas, entretanto, de acordo com a Tabela 5, todas as harmônicas individuais se encontram dentro dos limites estabelecidos em regime permanente. Para a corrente, há um destaque na 5°, 7°, 13°, 11° e 3° harmônicas respectivamente.

### **3.5 Discussão geral**

A primeira medição apresentou problemas em relação ao DHTi, pois ultrapassava o limite estabelecido pela norma e, com as correntes relativas ao Motor 1, de 175 CV, ao comparar as apresentadas nas Figuras 13 e 14 com as da Figura 33. Quando em regime permanente, é possível verificar que o Motor 1 funciona com corrente bem abaixo da nominal, de 418A, em ambos os casos. Nas situações cotidianas, o ribeirão São Bartolomeu tem capacidade de produção de 400m<sup>3</sup>/h, mas o motor em condições nominais pode atingir cerca de 450m<sup>3</sup>/h, logo, ele atua abaixo das condições nominais para conseguir bombear uma quantidade inferior de água como mostrado na Figura 32, condição usual de funcionamento. Entretanto, durante a primeira medição realizada na captação do SAAE o município de viçosa passava por um período de estiagem e, neste intervalo o Motor 1 passou a atuar com cerca de 310m<sup>3</sup>/h, redução que ocorreu antes do início do racionamento, pois o manancial São Bartolomeu se encontrava com níveis muito baixos de água, fazendo com que o motor operasse com a válvula sendo estrangulada para reduzir a vazão e, por trabalhar com carga inferior à nominal, apresentou menores correntes e rendimento. Outro fator determinante para essa discrepância entre o valor medido e o valor nominal de corrente do Motor 1 se deve ao fato da medição ser realizada após o banco de capacitores, portanto, com o fator de potência já corrigido há redução da corrente. Pode ser verificado através da Figura 15, que mostra as potências durante o intervalo, que o Motor 1 atua com potência ativa de aproximadamente 100kW, quando a nominal é de 132kW, já o Motor 2 tem potência nominal de 73,5kW e atua com cerca de 83kW.

Durante a segunda medição no sistema de captação, o Motor 1 não entrou em funcionamento, portanto, durante todo o intervalo foi possível verificar o comportamento do sistema com a atuação apenas do Motor 2, de 100 CV. Novamente o índice de DHTi apresentou média superior ao valor determinado pela norma, entretanto, neste caso o DHTi apresentou uma porcentagem bem abaixo da permitida durante quase todo o período de medição, mas alguns picos, inclusive que superaram 300%, fizeram com que a média geral se elevasse para uma quantidade acima da permitida.

As partidas dos motores possibilitaram conhecer os valores de pico das correntes no momento de acionamento e na determinação das principais harmônicas que atuam na rede, fato que auxiliará para encontrar o filtro ideal para correção do sistema de bombeamento.

Para solucionar o problema encontrado com relação à DHTi, é indispensável conhecer o sistema completo. Além disso, deve-se realizar simulações para aprofundar as análises e verificar o processo de filtragem para cada harmônico individual com maior influência, além de estudar as demais consequências que podem ser causadas na rede. Este estudo poderia indicar a escolha de um filtro passivo sintonizado nas frequências harmônicas necessárias, já sendo suficiente para que a DHTi fosse reduzida ao patamar máximo exigido. Assim, os estudos dos harmônicos tornam-se imprescindíveis para a definição do equipamento correto, seja na forma de bancos de capacitores, seja na forma de filtros de harmônicos para melhoria da rede, já que é comum que locais onde há problemas com harmônicos também tenham problemas relacionados com a correção do fator de potência. A escolha do filtro harmônico ideal deve, portanto, ser muito criteriosa, pois dependendo do banco de capacitores já presente no sistema para correção do fator de potência, pode ocorrer ressonância entre o filtro e o capacitor, surgindo outros problemas indesejados. Atualmente existem uma variedade de filtros de harmônicos, sejam eles passivos ou ativos. Conhecendo o sistema, é possível projetar corretamente o filtro com relação às especificações e aspectos econômicos.

Os filtros disponíveis no mercado são compostos por circuitos capazes de separar sinais elétricos (correntes e tensões), alterando as características de amplitude e fase desses sinais. Este processo de separação depende da característica das curvas de impedância de cada filtro com relação ao espectro de frequências. De acordo com a definição da finalidade de filtragem, o tipo de filtro e a característica da frequência empregada, rejeitam-se sinais de

frequências indesejáveis e a deixam passar as demais. Por isso é tão importante conhecer o sistema a ser corrigido, para que seja possível fazer a escolha mais viável.

A definição exata do filtro deve ser realizada após a verificação das condições significativas para sua escolha e os benefícios que trarão, como exemplo, um filtro sintonizado na 5ª harmônica normalmente acarreta numa diminuição de até 30% da 7ª harmônica, fator relevante, pois em muitos casos apenas a sintonia na 5ª harmônica se torna suficiente para regularizar os efeitos do DHT. O investimento no filtro correto possibilitaria melhora no nível de tensão, diminuição da interferência em sistemas de controle, redução das perdas e da temperatura em cabos, além de diminuir em até 70% os índices do  $DHT_v$  e  $DHT_i$ .

## 4 *Conclusões*

Este trabalho apresentou um estudo de qualidade de energia em um sistema de bombeamento industrial, com foco principal em distorções harmônicas de tensão e corrente no sistema.

Foram realizadas análises nas variações ocorridas na tensão e corrente durante o intervalo de medição, de forma a verificar se os sinais estavam em condições adequadas de uso, como regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL. Os índices de DHT foram investigados na tentativa de conhecer os momentos de pico, a proporção destes em relação à média e as condições que se encontravam perante a norma regulamentadora (IEE 519, 2014), além das harmônicas individuais com maior influência no sistema.

Os desequilíbrios nas tensões de fase, como encontrado por meio do estudo, tem influência direta no desequilíbrio das correntes, sendo que 1% de desequilíbrio na tensão pode acarretar em cerca de 7,5% de desequilíbrio de corrente (Rezende, 2013), trazendo como consequência o aumento das perdas, correntes excessivas circulando, elevação da temperatura, redução do conjugado e da vida útil, além de diversos outros problemas. Este assunto deve ser verificado mais a fundo, para encontrar a fonte do problema e possibilitar que este seja sanado.

O fato do  $DHT_i$  exceder o limite máximo delimitado pela norma enfatiza a necessidade da implantação de um filtro para realizar a atenuação dos harmônicos. De modo geral, o filtro deverá atuar de forma a reduzir o  $DHT_i$ , entretanto, deve se alertar sobre os efeitos causados pela influência da ressonância em filtros passivos. Esse excesso do  $DHT_i$  ainda pode ser causado por o sistema operar em uma eficiência mais baixa em determinados momentos, o que diminui o fator de potência e eleva as distorções harmônicas.

A correção busca garantir um melhor funcionamento, além de possibilitar que os motores e componentes presentes funcionem com um tempo de vida mais prolongado, portanto, para esse sistema, faz-se necessário a implementação de um filtro, que irá diminuir os harmônicos para frequências mais elevadas. Contudo, por se tratar de empreendimento comercial, deve-se levar em conta o custo associado à implementação da correção e também

as despesas que as distorções podem vir a causar no sistema, como mau funcionamento e diminuição da vida útil de equipamentos elétricos. A implementação do filtro deve ocorrer posteriormente ao período de estudo do sistema e realização das simulações, quando será possível defini-lo da forma mais correta possível.

O tema estudado tem aspectos muito relevantes quando se trata do assunto da Qualidade de Energia Elétrica, pois aborda problemas e acontecimentos frequentes na rede elétrica, além do estudo ser feito em um setor estratégico. Como sequência ao trabalho, tem-se a importância de realizar simulações que descrevam com exatidão o sistema, que permitam verificar alternativas diferentes para solução do caso. Faz-se necessário a realização de uma análise mais profunda, de forma a desenvolver uma modelagem para o sistema, possibilitando verificar todos os problemas e variações que estejam presentes, como os afundamentos de tensão, desequilíbrios e desvios.



## ***Referências Bibliográficas***

- ANEEL. (2010). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL
- ANEEL. (2011). Revisão da Regulamentação sobre a Qualidade do Produto no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL
- 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.; Beaty, H. Wayne. Electrical Power Systems Quality. MCGRAW-HILL, 1996.
- IEEE 519. (2014). IEEE STD 519-2014 - Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems (ANSI) of IEEE Standards Board. New York, USA: IEEE.
- 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.
- ONS (2011). Submódulo 2.8. Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes. Brasil.
- Padilla, J. V. (2008). Qualidade de Energia Elétrica. O setor Elétrico. Brasil
- Paulilo, G. (2005). Qualidade de Energia. Campinas.
- Rezende, P.H.O; Samesima, M.I. (2013). Efeitos do desequilíbrio de tensões de suprimentos nos motores de indução trifásico. Uberlândia.
- Tsutyia, M.T. Abastecimento de Água. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004. 634 p.